

Técnica Industrial 336

Ingeniería ferroviaria

APLICACIÓN DE CLASIFICADORES AUTOMÁTICOS

A la monitorización de la condición de funcionamiento de material rodante ferroviario

ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO HUMANO

Más allá del laboratorio: análisis del movimiento humano con máquinas deportivas utilizando 'smartphones'

ESTUDIO DE LA CORROSIÓN EN EQUIPOS DE UNA EDAR

Para la planificación de medidas preventivas

MOTOCICLETA DE COMPETICIÓN

Estimación de prestaciones en una motocicleta de competición

ANÁLISIS TÉCNICO Y FUNCIONAL DEL PATERNOSTER ROMANO

Modelado 3D y análisis mecánico

REPORTAJE

Innovación en el ferrocarril: desde la locomotora de vapor hasta el hyperloop

INNOVACIÓN

GeoCENmap, empresa ganadora del Premio a la Innovación Tecnológica, Empresarial y Sostenibilidad

ENTREVISTA

Mayte Castillo, directora de Rodalies de Catalunya en Renfe, y miembro del Consejo Asesor del Máster en Sistemas Ferroviarios y Tracción Eléctrica de la UPC

➤ *Campus Virtual: Oferta formativa - Selección de cursos*

Herramientas colaborativas y trabajo en la nube.

Eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior.

Marketing Digital.

Diseño de la infraestructura de recarga del Vehículo Eléctrico según la ITC 52 del REBT.

Autoempleo. Plan de Empresa desarrollado.

Las 5S, Herramienta de Lean Manufacturing.

Especialización en Diseño de Evacuación de Ocupantes en locales, edificios y establecimientos industriales.

Expero en Seguridad contra Incendios.

Cálculo de la Huella de Carbono Corporativa.

Realización de Expedientes de Marcado CE de maquinaria y productos de construcción.

Diseño e inspección de instalaciones eléctricas de Alta Tensión según el nuevo Reglamento R.D. 337/2014.

Normativa de Seguridad Industrial.

Esto es tan sólo una muestra del catálogo de cursos técnicos que encontrará en nuestra Plataforma online. Los cursos son constantemente renovados y adaptados a las necesidades actuales.

www.ingenierosformacion.com

EN PORTADA Ingeniería ferroviaria



- 08 Innovación en el ferrocarril: desde la locomotora de vapor hasta el hyperloop** El ferrocarril es uno de los inventos más revolucionarios de la historia, que ha transformado la forma de viajar, transportar mercancías y comunicarse entre distintas regiones y países. *Marita Morcillo.*
- 12 ENTREVISTA Mayte Castillo.** Directora de Rodalies de Catalunya en Renfe, y miembro del Consejo Asesor del Máster en Sistemas Ferroviarios y Tracción Eléctrica de la UPC. *Mónica Ramírez.*
- 14 ENTREVISTA Sonia Segade.** Gerente de Transformación Tecnológica de Renfe. *Mónica Ramírez.*
- 16 ENTREVISTA Aníbal Luis Piqueras Casado.** Jefe de Ingeniería e Investigación de Proyectos de Alta Velocidad en Renfe. *Mónica Ramírez.*
- 18 ENTREVISTA Adrián Fernández Carrasco.** Director gerente de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles. *Marita Morcillo.*
- 22 El proyecto Conciencia de Tren: acercando la ciencia y la tecnología del ferrocarril a la ciudadanía.** La mezcla de cercanía y cotidianeidad, historia y logro industrial, es una combinación que hace del ferrocarril un elemento atractivo para el público. *Fundación de los Ferrocarriles Españoles.*
- 24 ENTREVISTA Juan Carlos López.** General Manager en CAF Digital & Design Solutions y responsable de ingeniería para el desarrollo de proyectos ferroviarios. *Mónica Ramírez.*
- 26 ENTREVISTA Lucas Esteban González.** Ingeniero mecánico y Chief Operating Officer en CAF Digital Manufacturing. *Mónica Ramírez.*
- 28 La rodadura de ruedas independientes guiadas de Talgo. Oportunidades para optimizar el contacto rueda-carril.** Desde sus inicios en los años 40, el tren Talgo ha utilizado diversas tecnologías no convencionales, que han configurado una marca claramente diferenciada. *Miguel Sánchez, David Abellán, Manuel García, José Carlos Miguel y José Luis López.*
- 34 ENTREVISTA Francisco José González Roberto.** Ingeniero eléctrico y mecánico, jefe de Sostenibilidad y responsable del Proceso de Gestión de la Energía del Grupo Renfe, y presidente de la Asociación de los Amigos del Ferrocarril de Collado Villalba. *Mónica Ramírez*
- 36 Neoballast: nuevo árido sostenible de altas prestaciones y durabilidad extendida para balasto.** Neoballast es un nuevo balasto duradero y de alto rendimiento para infraestructuras ferroviarias sostenibles, creado a partir de un proyecto europeo cofinanciado por la Comisión Europea bajo el programa H2020 Fast Track to Innovation. *Miquel Morata Royes y Valentí Fontserè Pujol.*

Foto de portada: Shutterstock.

ACTUALIDAD

- 04 ENTREVISTA María Muñoz Martínez** Directora General de Industria y de la Pyme del Ministerio de Industria y Turismo: "La contribución de las pymes al crecimiento de la economía española es esencial, dado que son casi la totalidad del tejido empresarial". *Mónica Ramírez.*
- 06 Gemelos digitales: el camino hacia la transformación del sector industrial.** La tecnología de los gemelos digitales permite a las empresas tecnológicas y del sector industrial simular procesos y optimizar recursos para tomar decisiones más acertadas. *Mónica Ramírez.*

90 FERIAS Y CONGRESOS

ARTÍCULOS

- 38 ORIGINAL**
Application of automatic classifiers for condition monitoring of railway rolling stock
Aplicación de clasificadores automáticos a la monitorización de la condición de funcionamiento de material rodante ferroviario
E. Ruiz Torres, A. Bustos Caballero, H. Rubio Alonso, C. Castejón Sisamón
- 46 ORIGINAL**
Beyond the lab: human motion analysis with sports machines using smartphones
Más allá del laboratorio: análisis del movimiento humano con máquinas deportivas utilizando 'smartphones'
Rosa Pàmies Vilà, Lluïsa Jordi Nebot, Joan Puig Ortiz
- 52 ORIGINAL**
A study of the corrosion in the equipment of a WWTP for planning preventive measures
Estudio de la corrosión en equipos de una EDAR para la planificación de medidas preventivas
M.D. Sánchez Blanco, F.C. Gómez de León Hijes, F.J. Navarro Sánchez
- 62 ORIGINAL**
Estimación de prestaciones en una motocicleta de competición
Technical and functional analysis of a water lifting system from Roman times
A.M. Gómez Amador, A. Joya Machado, L. Prieto Fernández, A. Quesada González, J.J. Jiménez de Cisneros Fonfría, H. Rubio Alonso
- 70 ORIGINAL**
Análisis técnico y funcional de un sistema de elevación de agua de la época romana
Performance estimation of a racing motorcycle
A. Noriega González, I. Fernández de Bustos

INGENIERÍA Y HUMANIDADES

- 92 INGENIEROS EN LA HISTORIA** Hideo Shima, el ingeniero mecánico impulsor del "tren bala"
Laura Álvaro

96 Publicaciones

Técnica Industrial Revista cuatrimestral de ingeniería, industria e innovación revisada por pares. www.tecnicaindustrial.es

Directora: Mónica Ramírez Helbling

Secretario de redacción: Enrique Soriano Heras (Universidad Carlos III de Madrid). Consejo de redacción: Alessandro Ruggiero, Petr Valášek, Juan Antonio Monsoriu, Rubén Puche Panadero, Roberto D'Amato, Manuel Islán Marcos, Jesús Manuel García Alonso, Higinio Rubio Alonso y Fernando Blaya Haro. Consejo asesor: Jorge Arturo Ávila Rodríguez (México), Manuel Campo Vidal (España), Nuria Martín Chivelet (España), Sara Nauri (Reino Unido), Jerry Westerweel (Holanda).

Redacción, administración y publicidad: Avda. Pablo Iglesias, 2, 2º. 28003 Madrid. Tel: 915 541 806 / 809. revista@tecnicaindustrial.es

Impresión: Monterreina. C/ Cabo de Gata, 1-3, Área empresarial Andalucía 28320 Pinto, Madrid.

Depósito legal: M. 167-1958 ISSN: 0040-1838. ISSN electrónico: 2172-6957.

PROFESIÓN

3 Editorial La seguridad industrial es un derecho, no una opción
José Antonio Galdón Ruiz

78 Acto de entrega del II Premio a la Innovación Tecnológica, Empresarial y Sostenibilidad, y celebración del 70 aniversario de la revista Técnica Industrial. El evento tuvo lugar, el pasado 22 de septiembre, en la sede del Colegio de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales de Madrid (COGITM), y contó también con una conferencia sobre “El futuro de las fundaciones” y una mesa redonda acerca de los retos de sector industrial, con destacados ponentes, expertos en este ámbito.



84 GeoCENmap, empresa ganadora del II Premio a la Innovación Tecnológica, Empresarial y Sostenibilidad de la Fundación Técnica Industrial. La Tierra tiene un campo eléctrico natural que, al igual que el campo magnético, está presente en todo el planeta. Tiene su origen en procesos internos de la dinámica terrestre, y es bien conocido por geólogos y geofísicos, quienes lo han estudiado durante siglos.



86 El COGITI presenta en Zamora las Oficinas de Asesoramiento Industrial para promover la industrialización de zonas despobladas de España. El objetivo del COGITI, a través de sus Colegios Oficiales, es liderar la identificación de territorios clave para atraer e impulsar la ejecución de dichos proyectos, que permitan maximizar los recursos de los distintos territorios.



86 El presidente de COGITI participó en el XVII Congreso Centroamericano de Ingeniería Industrial y Mecánica Industrial

88 ENTREVISTA Manuela Delgado Cruz.
 Ingeniera Técnica Industrial y product manager de productos digitales: “La falta de referentes es la principal causa de la brecha de género en las áreas STEM”.
Mónica Ramírez.



95 UAITIE Premio Nacional de Iniciación a la Investigación Tecnológica 2024
 La Unión de Asociaciones de Ingenieros Técnicos Industriales y Graduados en Ingeniería de la rama industrial de España (UAITIE) lanza la convocatoria 2024 (novena edición) del concurso juvenil de ciencia y tecnología más prestigioso de todo el país.



Técnica Industrial Fundada en 1952 como órgano oficial de la Asociación Nacional de Peritos Industriales, es editada por la Fundación Técnica Industrial, vinculada al Consejo General de Colegios de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales de España (COGITI).

**Fundación Técnica Industrial
 Comisión Ejecutiva**

Presidente José Antonio Galdón Ruiz
Vicepresidenta Ana M^a Jáuregui Ramírez
Secretario Jesús E. García Gutiérrez
Tesorero Alejandro Sotodosos Fernández
Interventor Antonio Ruiz Saiz
Vocales Diego Pérez Muñiz y Mar López Almagro
Gerente Santiago Crivillé Andreu

Patronos

Unión de Asociaciones de Ingenieros Técnicos Industriales de España (UAITIE), Cogiti y Colegios de Ingenieros Técnicos Industriales, representados por sus decanos:

- A Coruña** Macario Yebra Lemos
- Álava** Alberto Martínez Martínez
- Albacete** Emilio Antonio López Moreno
- Alicante** Antonio Martínez-Canales Murcia
- Almería** Francisco Lores Llamas
- Aragón** Enrique Zaro Giménez
- Ávila** Samuel Gavilán López
- Badajoz** Vicenta Gómez Garrido
- Illes Balears** Juan Ribas Cantero
- Barcelona** Miquel Darnés i Cirera
- Bizkaia** Alberto García Lizarranzu
- Burgos** Antonio Ruiz Saiz
- Cáceres** Fernando Doncel Blázquez
- Cádiz** Domingo Villero Carro
- Cantabria** Luis Miguel Muñiz González
- Castellón** José Luis Ginés Porcar
- Ciudad Real** José Carlos Pardo García
- Córdoba** Francisco López Castillo
- Garraf i l'Alt Penedès** Mar López Almagro
- Gipuzkoa** Santiago Beasain Biurrrarena
- Girona** Jordi Fabrellas Payret
- Granada** Fernando Terrón Bote
- Guadalajara** Juan José Cruz García
- Huelva** Manuel León Gómez
- Jaén** Rafael Fernández Mesa
- La Rioja** Jesús Velilla García
- Las Palmas** José Antonio Marrero Nieto
- León** José Antonio Cuba Cal
- Lleida** Ramón Grau Lanau
- Lugo** Jorge Rivera Gómez
- Madrid** José Antonio Galdón Ruiz
- Málaga** José B. Zayas López
- Manresa** Jordi Valiente Prat
- Región de Murcia** César Nicolas Martínez
- Navarra** Luis Maestu Martínez
- Ourense** Santiago Gómez-Randulfe Álvarez
- Palencia** Jesús de la Fuente Valtierra
- Principado de Asturias** Diego Pérez Muñiz
- Salamanca** José Luis Martín Sánchez
- S. C. Tenerife** Antonio M. Rodríguez Hernández
- Segovia** Gabriel Vallejo Álvarez
- Sevilla** Ana M^a Jáuregui Ramírez
- Soria** Levy Garrijo Tarancón
- Tarragona** Joan Gabriel Talam Maigí
- Toledo** Ángel Carrero Romero
- Valencia** Angélica Gómez González
- Valladolid** Rafael Álvarez Palla
- Vigo** Jorge Cerqueiro Pequeño
- Zamora** Jose Luis Hernández Merchán

La seguridad industrial es un derecho, no una opción

Para comenzar con este alegato en favor de la “seguridad industrial”, deberíamos comenzar por situar debidamente la misma y recordar la literalidad del art. 51.1 de la Constitución Española:

1. Los poderes públicos garantizarán la defensa de los consumidores y usuarios, protegiendo, mediante procedimientos eficaces, la seguridad, la salud y los legítimos intereses económicos de los mismos.

Por tanto, nos encontramos ante una obligación que tienen las administraciones frente a la ciudadanía, velar por que convivamos con instalaciones seguras, y ésta es la base de la existencia de las profesiones reguladas, los Colegios Profesionales con funciones públicas delegadas y, por supuesto, los profesionales de la Ingeniería.

Es decir, las profesiones reguladas del ámbito de la Ingeniería justifican su existencia en la proporcionalidad y eficacia que las mismas trasladan al ámbito de la seguridad de la ciudadanía, y la protección del medio ambiente, siendo éstas las razones imperiosas de interés general que permiten la restricción de acceso a determinados ámbitos profesionales, conforme a la normativa comunitaria y española.

No en vano, y desde el año 2009, cuando se traspuso la Directiva de Servicios en España (CE/36/2005), con la famosa Ley Ómnibus (25/2009) y la Ley 17/2009, sobre el libre acceso a las actividades de servicios y su ejercicio, que trajo como consecuencia el RD 1000/2010, sobre visado colegial obligatorio, se viene cuestionando e infravalorando el concepto de seguridad industrial por las diferentes administraciones, bajo una irresponsable confusión de conceptos, que pretende incluir los conceptos de técnico competente, proyecto técnico, certificado, visado, etc., dentro de la “burocracia administrativa”, lo cual resulta cuanto menos “peligroso”.

La seguridad industrial comprende las instalaciones de todo tipo (eléctricas, contra incendios, productos petrolíferos, climatización, gas, aparatos elevadores, alumbrado, alta tensión, etc.), que conforman los espacios donde vivimos, por los que transitamos, donde disfrutamos y descansamos; en definitiva, forman parte de nuestra vida diaria y, por tanto, deben ser seguros y saludables, y para ello, no se pueden relajar las exigencias.

Este año hemos vivido varios incidentes mortales que, sin entrar a valorar las causas o culpables, sí que podrían haber sido evitados mediante un mayor control, lo que a su vez genera mayor conciencia de la importancia de la seguridad en las instalaciones y, sobre todo, evita la inseguridad que muchas veces, y después de cada siniestro, se traslada a la sociedad.

La incertidumbre genera inseguridad en todos sus sentidos, pero al margen de conceptos globales y de sentido común, y centrándonos en la seguridad de las personas, los ciudadanos necesitamos certezas en forma de derechos, que, a su vez, sufragamos con nuestros impuestos, de que todos los locales, establecimientos, instalaciones y espacios abiertos al público, reúnen las condiciones de seguridad necesarias para ser utilizadas, y ésta es una de las razones de ser nuestros profesionales.

Muchas veces, y a la vista de determinados requisitos, tenemos la sensación de que las administraciones están más interesadas y ponen más interés en recaudar o proteger el patrimonio cultural, lo cual también es necesario, que en proteger la seguridad de los ciudada-



Foto: Shutterstock.

nos, que se está convirtiendo en un concepto diluido, por la “economía liberal” erróneamente aplicada.

Se ha pasado del control ex ante al control ex post, lo que podría ser un procedimiento sensato siempre y cuando se exigiese la participación de un profesional cualificado y colegiado, que genere garantías y certezas y, sobre todo, asuma la responsabilidad de la correcta ejecución y seguridad de las instalaciones, lo cual no siempre es así, dado que algunas administraciones optan por un modelo de declaración responsable que realiza el propio titular de la actividad o instalaciones, sin que tan siquiera se exija la participación de un técnico, siendo el propio promotor el que, bajo su criterio, y con la manifiesta incompatibilidad de intereses respecto a sus prioridades empresariales y económicas, afirma que se cumple con la normativa.

Este hecho, a su vez, presenta una inseguridad jurídica al propio promotor de la actividad, que si no tiene el asesoramiento de un profesional técnico, puede realizar inversiones en un local, que si no reúne los requisitos necesarios para dicha actividad, podrá ser cerrado por la Administración una vez implantada y funcionando la misma, lo cual, a su vez, y en función del tiempo que transcurra entre la apertura del mismo y la inspección de la Administración, no solo causará perjuicios económicos importantes para el promotor, sino que se puede haber puesto en peligro la seguridad de las personas usuarias de dichas instalaciones y las de su entorno.

Por tanto, tal y como hemos venido demostrando a lo largo de los años, los profesionales del sector somos la mejor garantía y el medio más eficaz del que disponen las administraciones para trasladar seguridad y certeza a los ciudadanos, y los Colegios Profesionales, los mejores aliados para llevar a cabo el necesario control y garantía, acelerando las tramitaciones y mejorando la seguridad, que no solo es el fin último, sino también, un derecho fundamental.

José Antonio Galdón Ruiz

Presidente del Consejo General de la Ingeniería Técnica Industrial de España y de la Fundación Técnica Industrial

María Muñoz Martínez

Directora General de Industria y de la Pyme del Ministerio de Industria y Turismo

“La contribución de las pymes al crecimiento de la economía española es esencial, dado que son casi la totalidad del tejido empresarial”

Mónica Ramírez

María Muñoz es Ingeniera Industrial por la Universidad Pontificia de Comillas, diplomada en Ciencias Empresariales, y posee, además, un MBA del Instituto de Empresa de Madrid. Entre 1997 y 2005 ha ocupado diversos puestos en empresas del sector privado, en particular del Grupo Dragados.

En 2006, realizó la oposición al Cuerpo de Ingenieros Industriales del Estado, y desde ese mismo año, ha desarrollado puestos de responsabilidad en los Ministerios de Hacienda y de Industria, Comercio y Turismo, en este último como subdirectora general de Apoyo a la Pyme. Desde febrero de 2023 es la directora general de Industria y de la Pequeña y Mediana Empresa en dicho Ministerio.

¿Qué papel desempeñan y qué aportación realizan las pymes industriales al crecimiento de la economía española?

El sector industrial es una pieza clave en la economía de los países. Es esencial para el desarrollo de la tecnología; impulsa masivamente la formación, aporta calidad de vida y estabilidad a sus trabajadores, crea riqueza en las áreas donde se instala, impulsa los “hubs” de conocimiento y la I+D asociada, y crea “clusters” innovadores que se retroalimentan mejorando de forma continua.

En España, según el último informe “Cifras PYME” del Ministerio de Industria y Turismo, existen 2.926.955 de pymes (de 0 a 249 asalariados), un 99,8% del total del tejido empresarial. Solo el 0,2% son grandes empresas, en total 5.528 (250 o más asalariados).

Del total de pymes, 169.341 son pymes industriales y solo 1.141 son grandes empresas, con un mayor peso de las empresas pequeñas y medianas, y menos de las microempresas que en el resto de sectores (agricultura, construcción o servicios).

Esto significa que las pymes industriales presentan un mayor tamaño relativo, respecto a las de otros sectores y, además, son más innovadoras, se encuentran más digitalizadas, cuentan con personal más cualificado e incorporan más tecnología, lo cual las hace más competitivas.



María Muñoz Martínez.

Su contribución al crecimiento de la economía española es esencial, dado que son casi la totalidad del tejido empresarial (99,8% del total como antes señalé), y representan alrededor de las 2/3 partes del valor añadido y del empleo empresarial.

La digitalización de las empresas es fundamental para lograr la competitividad y la sostenibilidad de las pymes, ¿cuáles son los principales retos a los que se enfrentan y en qué punto se encuentran en la actualidad en esta materia?

España presenta, según el Plan de Digitalización de PYMES 2021-2025 del Gobierno de España, una evolución positiva de los principales indicadores internacionales de digitalización en los últimos años, con valores muy positivos en conectividad y servicios públicos digitales. No obstante, no ha avanzado de la misma manera en la dimensión de integración de tecnología digital por parte de las empresas. En este sentido, las pymes españolas aún tienen pendiente explorar todo el potencial del comercio electrónico, de los servicios en la nube o del *big data*.

La digitalización de las pymes adquirió una especial urgencia y prioridad tras la pandemia, experimentándose una aceleración del cambio tecnológico motivado por las

restricciones a la movilidad, con una rapidísima implantación del teletrabajo. También observamos la aparición de nuevos modelos de negocio “low contact” basados en las tecnologías digitales.

Así, uno de los efectos positivos de la pandemia fue la aceleración de la adaptación de las empresas a los nuevos modelos de negocio, a las nuevas demandas de los consumidores, a los canales de distribución y formas de trabajo mediante herramientas digitales, al trabajo a distancia, al comercio electrónico y al marketing digital.

En su proceso de transformación digital, las pymes se enfrentan a una serie de retos que deberán abordar. Entre ellos, podemos citar los siguientes: las necesidades de equipamiento técnico, Infraestructuras y tecnología. Debe analizar y planificar la inversión e integración de hardware y software, tecnología, infraestructuras y los aspectos de ciberseguridad; especialmente la adopción del cloud, el *big data* y la IA. También el cambio cultural, que afecta a todos los niveles de la organización; la capacitación del personal, tanto del equipo directivo, como del resto de los trabajadores, para desarrollar nuevas competencias digitales; los productos y servicios, que deben adaptarse y desarrollar nuevas líneas de negocio, nuevos productos y servicios; el rediseño de procesos internos de la empresa para automatizarlos y aumentar la eficiencia y la productividad, permitiendo así una mayor escala de operaciones, y la experiencia de cliente. La pyme debe redefinir la relación con sus clientes, así como los nuevos canales que va a utilizar.

Cada pyme debe realizar un análisis interno sobre su situación de partida. Para ello, el Ministerio de Industria y Turismo cuenta con la herramienta HADA (Herramienta de Autodiagnóstico Digital Avanzada), que tiene como objetivo dotar a la industria española de un instrumento gratuito, moderno y de calidad, que permita a las empresas evaluar su nivel de madurez en relación con el paradigma de la Industria 4.0. Del mismo modo, HADA está pensada para conocer la situación comparativa respecto a otras organizaciones con diferentes niveles de madurez, recursos y actividad.

HADA ha definido 6 niveles de madurez

que establecen el grado de implantación de la Industria 4.0 en las organizaciones, y el punto en el que se encuentran en el proceso de transformación digital: Estático, Consciente, Competente, Dinámico, Referente y Líder.

HADA analiza 16 áreas distintas que se corresponden con 5 dimensiones organizacionales de las empresas: Estrategia de mercado, Procesos, Organización y personas, Infraestructuras, y Productos y servicios. En definitiva, HADA es una aplicación online que, a través de un cuestionario, permite a las empresas obtener una valoración del estado de madurez digital de una empresa industrial.

¿Qué actuaciones se están llevando a cabo o está previsto realizar, en este sentido, desde la Dirección General de Industria y de la pyme?

Con carácter general, el apoyo público a la digitalización de las Pymes puede realizarse a través de diferentes instrumentos: I. Servicios de asesoramiento y consultoría, II. Programas de formación, III. Instrumentos de financiación de inversiones (por ejemplo, adquisición de infraestructuras, bonos de conectividad, servicios a empresas, o fondos de inversión en startups o "scaleups", etc.), y IV. Desarrollo de herramientas digitales que puedan servir directamente a las empresas (por ejemplo, en su relación con las Administraciones Públicas).

En todos estos ámbitos estamos iniciando desde el Ministerio de Industria y Turismo, a través de diferentes programas e iniciativas enfocados a la digitalización de las pymes. Podemos citar los siguientes, desarrollados desde la propia Dirección General de Industria y de la pyme (DGIPYME) o de organismos como CERSA, ENISA y la Fundación EOI: ayudas a la iniciativa Industria Conectada 4.0 / Activa Financiación (DGIPYME). Esta actuación persigue el apoyo a proyectos que promuevan la transformación digital de las empresas industriales y a la mejora de su sostenibilidad ambiental, como consecuencia de su digitalización. Programa de ayudas a Agrupaciones Empresariales Innovadoras (DGIPYME). Cito la Línea 3 de apoyo a Proyectos de Tecnologías Digitales, los cuales deberán incorporar conocimientos y/o tecnologías que promuevan la transformación digital de las empresas que los llevan a cabo. Línea Emprendedoras Digitales (ENISA), que apoya, a través de la figura del préstamo participativo, proyectos de emprendimiento digital femenino. Programa

de Capacidades para el Crecimiento PYME (EOI), que incluye varias líneas en materia de transformación digital, crecimiento pyme, ciberseguridad y apoyo a la innovación abierta. Programa de Apoyo a los Digital Innovation Hubs (EOI), que impulsa la innovación y la adopción de tecnologías digitales disruptivas por parte de pymes, a través del apoyo prestado por los Centros de Innovación Digital (DIH). Y, por último, el Programa Generación Digital Agentes del Cambio (EOI), para personas en situación de desempleo, personas que trabajan en pymes, y directivos de pymes.

Hablemos ahora de la industria española. El sector industrial, en general, representa el 15,3 % del PIB nacional, lejos todavía del 20% que preveía la Unión Europea para el año 2020, y aglutina el 11,2 % del empleo (un 9,8 % en el caso de la industria manufacturera), con unos 2 millones de personas empleadas, ¿qué medidas se podrían implantar para mejorar esta situación?

En 2020, tras la irrupción de la pandemia, iniciamos el diseño del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR) en estrecha coordinación con la Comisión Europea. El Plan, que se aprobó en julio de 2021 y recientemente su Adenda, para todo el período 2021 a 2026, cuenta con una dotación, en el caso de la Dirección General de Industria y Pyme, de unos 9.500 millones de euros procedentes del Mecanismo de Recuperación y Resiliencia de la Unión Europea, para abordar inversiones industriales, apoyar a las pymes y al emprendimiento innovador.

Los Fondos de Recuperación son, por tanto, una oportunidad única para España y, en particular, para la industria y las pequeñas y medianas empresas españolas. Los fondos tienen un fin determinado para todos los Estados miembros de la UE: han de impulsar inversiones y reformas previamente acordadas con la Comisión Europea, y contribuir de manera relevante a la transición verde y digital.

Suponen un volumen de financiación para proyectos estratégicos industriales y de pymes que no habrían visto la luz de otro modo, al menos con tal dimensión. Me refiero a los proyectos que estamos gestionando para desarrollar la cadena de valor del vehículo

eléctrico y conectado, la del sector agroalimentario, el naval, el farmacéutico, la fabricación de baterías y sus componentes o todo el apoyo prestado a pymes y emprendedores (con el refuerzo del sistema CIRCE de creación de empresas y la Red PAE de Puntos de Atención al Emprendimiento) y, también, a través de ENISA, CERSA y la Fundación EOI.

Más recientemente, tras la invasión rusa de Ucrania y la consiguiente crisis energética, afloraron nuevas dependencias de la Unión Europea de productos esenciales, como ciertos alimentos, el gas y otras materias primas críticas para la fabricación de las tecnologías limpias, necesarias en la descarbonización de la economía.

Asimismo, la publicación en 2022 de la Ley de Reducción de la Inflación (IRA), la normativa climática más importante de la historia de Estados Unidos, ha hecho reaccionar a la Unión Europea, quien, en marzo de 2023, ha propuesto la Ley de Industrias Net Zero (NZIA) y la Ley de Materias Primas Críticas (CRMA), cuya negociación se está realizando durante la Presidencia española del Consejo de la UE. También, la Comisión Europea ha flexibilizado el marco de ayudas de Estado, con una modificación del Reglamento General de Exención por Categorías, y con la publicación de un nuevo Marco Temporal de Crisis y Transición (que se extiende hasta 31 de diciembre de 2025).

Todo ello para facilitar el apoyo a sectores clave para la transición ecológica, incluyendo el despliegue de energías renovables, el almacenamiento energético, la captura y almacenamiento de carbono o la descarbonización de los sistemas de producción. Nuestra labor desde la Dirección General de Industria y Pyme es contribuir a desplegar este potencial en los próximos años en España y en la UE. En definitiva, trabajamos para desarrollar este concepto de autonomía estratégica abierta, concepto que nació en el ámbito de la industria de la defensa, pero que, tras la pandemia y la guerra en Ucrania, se aplica a la recuperación de capacidad, industrial en nuestro caso, para reducir dependencias de terceros en actividades y productos esenciales para la sociedad.

Se habla en efecto de una auténtica revolución industrial, que veremos a lo largo de los próximos años. En cualquier caso, una gran oportunidad para desarrollar de una vez por todas una sólida base industrial en nuestro país.

Gemelos digitales: el camino hacia la transformación del sector industrial

Hasta hace poco, los gemelos digitales estaban fuera del alcance de muchas empresas, ya que carecían de capacidades tecnológicas avanzadas. Sin embargo, en la actualidad, los líderes de Tecnologías de la Información, que adquieren los conocimientos y se asocian con las áreas de operaciones, tienen la oportunidad de llevar el enorme potencial de los gemelos digitales a sus organizaciones.

Mónica Ramirez

La tecnología de los gemelos digitales permite a las empresas tecnológicas y del sector industrial simular procesos y optimizar recursos para tomar decisiones más acertadas, de tal modo que están cambiando la manera de entender los procesos productivos y los sistemas, y resultan esenciales en la Industria 4.0.

¿Cómo funcionan los gemelos digitales?

Los gemelos digitales (digital twin, en inglés) son prototipos virtuales de un proceso, producto o servicio físico. De esta manera, gracias a ellos, las empresas pueden controlar y potenciar el rendimiento, por ejemplo, de sus fábricas, edificios, hospitales, aviones, data centers, parques eólicos e incluso de ciudades enteras, realizando simulaciones en un modelo virtual sustentado por datos. Con el fin de lograr un correcto funcionamiento, los gemelos digitales necesitan apoyarse en una plataforma de interconexión global que sea capaz de soportar las interacciones en tiempo real entre personas, lugares, nubes, cosas y datos.

Esta tecnología se fundamenta en programas informáticos que emplean datos del mundo físico para crear simulaciones, y de este modo poder

Esta tecnología permite simular procesos y optimizar recursos

predecir cómo van a funcionar en un futuro. Por ello, este tipo de programas suele incorporar inteligencia arti-



Foto: Shutterstock.

ficial e IoT (Internet de las Cosas), entre otras innovaciones. Todo ello con el objetivo de predecir tendencias, implementar mejoras tecnológicas y, en definitiva, evitar los problemas y defectos que se pueden producir en el mundo real o físico, al mismo tiempo que ayuda a analizar y monitorizar los procesos.

En líneas generales, y en función de la fase de producción en la que se encuentren, los gemelos digitales se crean por tres motivos:

Prototipo de gemelo digital (DTP)

Se crea cuando el producto no existe todavía. Supone la creación de un prototipo virtual, de forma previa a la creación de un producto físico, proceso o sistema final, con el objetivo de visualizar cómo sería en realidad y cómo se comportaría de forma funcional.

Instancia gemela digital (DTI)

En este caso, una vez fabricado el producto, y después de haber comprobado la funcionalidad del gemelo digital, se pueden realizar pruebas de los diferentes escenarios en los que llevar a cabo su aplicación.

Agregado de gemelos digitales (DTA)

Por último, gracias a la información y los datos recopilados hasta el momento, del producto real, también se puede emplear para predecir e identificar sus capacidades.

Principales ventajas

Entre las principales ventajas de los "digital twin" se encuentran el mantenimiento predictivo de las empresas, la monitorización del sistema, o la optimización de recursos, entre otros.

Mantenimiento predictivo

Gracias a los gemelos digitales, las empresas pueden adelantarse a los posibles problemas e implementar mejoras en los procesos, productos y sistemas, de manera que se consigue reducir costes de mantenimiento y optimizar la cadena de producción.

Detección de riesgos y errores

Uno de los principales beneficios de los gemelos digitales es la detección de riesgos y defectos, lo que permite a las empresas adelantarse a los problemas que pueden surgir en los diferentes sistemas

o procesos productivos. La detección, en el prototipo, de un error en la cadena de producción, permite ahorrar tanto costes económicos como tiempo, además de evitar la obstaculización del sistema.

Monitorización

Otra de las ventajas de los “digital twin” es que permiten monitorizar de forma remota y en tiempo real, ya que se puede visualizar todo lo que está sucediendo en el sistema de forma inmediata, sin necesidad de tener que trasladarse al espacio de trabajo, como se haría en condiciones normales.

Optimización de recursos

Esta tecnología permite optimizar diferentes tipos de recursos: humanos, pues los trabajadores no tendrán que invertir tiempo en solucionar problemas que se podrían haber evitado; financieros, ya que permite optimizar las inversiones de las empresas y predecir tendencias, y de procesos, puesto que al poder adelantarse y mejorar la cadena de producción, se logra ser más eficiente. De esta manera, se ahorran costes y se reduce la inversión en los procesos productivos.

Apuesta por la innovación

Al permitir la automatización de procesos y la solución de muchos problemas comunes en las diferentes industrias y empresas, sin tener que estar tan pendientes de tareas más sistemáticas, los equipos de trabajo pueden centrarse en otros aspectos que generan valor en la organización, como es la innovación.

La toma de decisiones efectivas es uno de los aspectos más destacados de este uso

Tipos de gemelos digitales

Dentro de estas réplicas digitales, y en función de lo que simulan, se pueden distinguir 3 tipos.

Gemelos digitales de procesos

Son aquellos que se encargan de simu-

lar procesos, como puede ser un proceso de fabricación real. Este tipo de gemelos digitales puede crear un proceso de producción de principio a fin, y predecir cómo será su funcionamiento, así como los fallos que pueda tener. Con esta tecnología, las industrias se ahorrarían los elevados costes generados a consecuencia de errores que al fin y al cabo se podrían evitar, y estarían en disposición a desarrollar una metodología de producción más eficiente.

Gemelos digitales de productos

Este tipo de gemelos digitales permite a los fabricantes de un determinado producto desarrollar una representación digital del mismo, antes de crear la línea de producción completa. De este modo, las empresas pueden optimizar el rendimiento de sus artículos, y al mismo tiempo predecir el ciclo de vida del producto o su vida útil, con el fin de poder saber con certeza cuándo es el momento más idóneo para realizar el mantenimiento preventivo del mismo. Todo ello, permitirá ahorrar costes de fabricación innecesarios, al detectar los problemas que pueden surgir, y llevar a cabo el diseño del producto de una manera más eficiente.

Gemelos digitales de sistemas

El funcionamiento de este tipo de gemelos digitales es similar a los dos anteriores. En concreto, los gemelos digitales de sistemas se encargan de recopilar cantidades masivas de datos operativos, producidos por dispositivos y productos en el sistema, para obtener información y crear nuevos horizontes comerciales, con el objetivo de optimizar todos los procesos y respaldar la integridad del sistema.

Principales escenarios de uso

Los escenarios donde se pueden aplicar los gemelos digitales son variados y abren un gran abanico de posibilidades. Uno de ellos es la gestión de catástrofes naturales, ya que esta tecnología puede facilitar la predicción de los efectos adversos del cambio climático, lo que permitiría crear planes de respuesta ante efectos naturales negativos.

Otro escenario es el de la industria automovilística, dado que, en este caso, los gemelos digitales pueden analizar e implementar mejoras del producto. También se aplican en el ámbito de la fabricación, donde son útiles para optimizar los procesos de producción, y reducir

los tiempos empleados en los mismos.

El sector de la salud constituye, de igual manera, un buen campo para la aplicación de los gemelos digitales, ya que pueden contribuir a eliminar riesgos en procedimientos médicos y sanitarios, y también se pueden emplear en ámbitos como la donación de órganos o la cirugía.

Estos programas incorporan inteligencia artificial e IoT, entre otras

Aplicación en la industria

En el caso de la industria, esta tecnología permite, sobre todo, optimizar procesos. Las simulaciones se pueden utilizar, por ejemplo, para gestionar el stock, generar en tiempo real alarmas para los distintos proveedores, con el fin de que puedan servir el material necesario, y alinearlos con los tiempos de producción correspondientes.

En todo este proceso, la toma de decisiones efectivas es uno de los aspectos más destacados del uso de los gemelos digitales, pues permiten reducir los costes operativos por inactividad de los procesos productivos en un 40%, y las incidencias hasta en un 75%.

El impacto que están teniendo los gemelos digitales se ve reflejada en iniciativas como RETECH (Redes Territoriales de Especialización Tecnológica) que, en el marco de España Digital 2026, pretende poner en marcha proyectos estratégicos regionales orientados a la transformación y la especialización digital. En este sentido, uno de los proyectos seleccionados en esta iniciativa RETECH es el de “Aceleración de ecosistemas de emprendimiento e innovación basados en Gemelos Digitales”.

El impacto de esta tecnología se ve reflejada en iniciativas como RETECH

Innovación en el ferrocarril: desde la locomotora de vapor hasta el hyperloop

El ferrocarril es uno de los inventos más revolucionarios de la historia, que ha transformado la forma de viajar, transportar mercancías y comunicarse entre distintas regiones y países.



Tren Maglev en la estación Longyang Road de Shanghái. Autor: Hermann Luyken, Wikimedia Commons.

Marita Morcillo

Desde que el ingeniero británico Richard Trevithick inventara la primera locomotora de vapor en 1801, el ferrocarril ha evolucionado de manera espectacular, pasando por diferentes etapas y adaptándose a los avances tecnológicos y a las necesidades sociales.

La tecnología de Trevithick marcó un hito importante en el camino hacia la creación de trenes impulsados por vapor. Años más tarde fue empleada por George Stephenson para construir una locomotora de vapor, bautizada como Rocket, capaz de arrastrar ocho vagones cargados con 30 toneladas de carbón a 7 km/h.

La locomotora de Stephenson fue la base para crear la primera línea ferroviaria interurbana de pasajeros, construida entre

las ciudades industrializadas de Manchester y Liverpool en 1825. La velocidad media de este tren era de entre 24 y 32 km/h y tardaba una hora y media en recorrer los 50 km que había entre ambas urbes. Aunque podía alcanzar una velocidad máxima de 48 km/h, algo nunca visto hasta el momento.

La idea del tren pronto se expandió por todo el mundo, convirtiéndose en símbolo de la era moderna. A medida que crecía la red ferroviaria, se desarrollaban nuevos avances tecnológicos y los trenes mejoraban sus prestaciones, por no hablar de los grandes proyectos de ingeniería de puentes, túneles y viaductos.

A lo largo del siglo XIX y XX, el ferrocarril experimentó numerosas mejoras, como el uso de hierro y acero para las vías y los vagones, la introducción de los

frenos neumáticos, la electrificación de las líneas, la creación de redes ferroviarias nacionales e internacionales y la aparición de nuevos tipos de trenes, como los de alta velocidad, los subterráneos o los maglev.

En la actualidad, el ferrocarril sigue siendo un medio de transporte esencial, que ofrece ventajas como la rapidez, la seguridad, la comodidad, la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental. El ferrocarril también es un elemento clave para el turismo, la cultura y la educación, ya que permite conocer lugares increíbles y aprender sobre la historia y la diversidad del mundo. El ferrocarril es, sin duda, un testimonio de la gran capacidad humana para innovar y superar los desafíos. Veamos algunos ejemplos de los trenes más innovadores.



Los Siemens Velaro son conocidos en España porque forman parte de la red de Alta Velocidad.

Los trenes más modernos

Siemens Velaro

El Siemens Velaro es una familia de trenes de alta velocidad que destaca por su diseño aerodinámico y su avanzado sistema de propulsión eléctrica. Ha sido desarrollado por Siemens Mobility, una división de Siemens AG, junto a otras empresas como ABB, Bombardier Transportation y Alstom.

Los trenes Velaro utilizan motores eléctricos de alta eficiencia que son alimentados por sistemas de catenaria o tercer riel electrificado. Incorporan innovaciones como el sistema de frenado regenerativo, el cual permite recuperar la energía cinética, convirtiéndola en energía eléctrica que puede ser reutilizada o disipada en resistencias. Esto aumenta la eficiencia global del sistema de propulsión eléctrica.

Estos trenes son conocidos por su elevada potencia. Por ejemplo, el Velaro E de Renfe que circula por España tiene una potencia de 8.800 kW, lo que le permite alcanzar altas velocidades y realizar recorridos de larga distancia en un tiempo relativamente corto. Es el modelo más veloz de la familia Velaro.

Una tecnología esencial en los Velaro es el Control Automático de Tren (CBTC). Se trata de un sistema avanzado de control y señalización ferroviaria, que utiliza comunicaciones inalámbricas y tecnología informática para supervisar y controlar la operación del tren de manera automática y segura.

La ingeniería ferroviaria en los trenes Siemens Velaro es un aspecto funda-

mental para garantizar su operación segura y eficiente a altas velocidades. Estos trenes disponen también de sensores y sistemas de diagnóstico que monitorean constantemente el estado de los componentes del tren, permitiendo un mantenimiento predictivo eficiente.

Maglev

Maglev, abreviatura de magnetic levitation, es conocido como el tren eléctrico comercial más rápido del mundo. Se trata de un sistema de transporte que utiliza levitación magnética para mover los trenes sin fricción. La tecnología consiste en utilizar imanes superconductores para

hacer levitar los vagones. Los imanes superconductores son electroimanes que se enfrían a temperaturas extremas durante su uso, generando campos magnéticos hasta 10 veces más fuertes que los electroimanes comunes, suficientes para suspender e impulsar un tren.

Al no haber fricción, estos trenes pueden alcanzar velocidades de vértigo. El récord está en 581 km/h en una prueba realizada en Japón en 2003. Actualmente circula una línea comercial en Shanghái que supera los 400 km/h. Y para 2027 está proyectada otra línea comercial que unirá las ciudades japonesas de Tokio y Nagoya, que se espera que circule a 500 kilómetros por hora.

El tren Maglev Shanghái, que hasta el momento es el tren de levitación magnética más rápido del mundo, conecta el aeropuerto de Pudong de Shanghái con la estación de Longyang Road y recorre 30 kilómetros en tan sólo siete minutos y medio. Esta línea es operada por el Shanghai Maglev Transportation Development Co., Ltd., una empresa conjunta entre el Gobierno de Shanghái y la empresa alemana Transrapid International. En su diseño y construcción ha intervenido la empresa estatal China Railway Rolling Stock Corporation (CRRC).

Fuxing Hao CR400 AF/BF

Y sin salir de China, llega el Fuxing Hao CR400 AF/BF, uno de los trenes comerciales más veloces, van-



TVG Duplex V150, del operador francés SNCF, tiene capacidad para acoger a más de 1.200 pasajeros.

guardistas y eficientes del mundo. Como el Maglev, también es fruto de combinar la ingeniería alemana con la china. Este tren incorpora tecnología punta en áreas como aerodinámica, sistemas de control, seguridad ferroviaria y eficiencia energética. Cuentan, además, con avanzados sistemas de frenado, control de velocidad y monitoreo de seguridad.

La familia de trenes Fuxing destaca por su suspensión neumática de alta velocidad, lo que le permite adaptarse a las distintas condiciones de la pista. Este sistema es fundamental para garantizar un viaje suave incluso cuando alcanza su velocidad máxima, 350 km/h.

Tren de alta velocidad TGV Duplex V 150

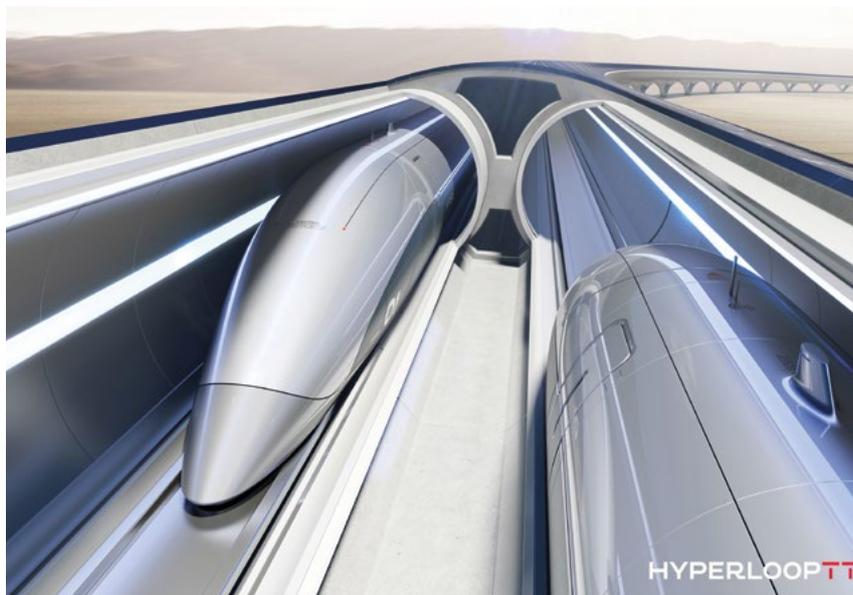
El TGV Duplex V150, del operador francés SNCF, es conocido por haber batido un record de velocidad en 2007, cuando alcanzó una velocidad de 574 km/h entre París y Estrasburgo. Su diseño de doble piso permite una mayor capacidad de pasajeros. Los trenes TGV, incluido el Duplex V150, incorporan tecnología avanzada para garantizar un rendimiento confiable y seguro a altas velocidades. Esto incluye sistemas de control y seguridad ferroviaria de última generación.

Talgo 350 SRO

El tren de alta velocidad Talgo 350 SRO es operado en España por la compañía Talgo y, con sus 330 km/h, es uno de los trenes más rápidos de España y de Europa. Utiliza tecnología de rodadura desplazable, es decir, sus ruedas pueden ajustarse para adaptarse a diferentes anchos de vía, permitiendo una mayor flexibilidad en las rutas ferroviarias. Incorpora sistemas de propulsión eléctrica, lo que le permite alcanzar altas velocidades de manera eficiente y sostenible.

HarmonyCRH380

Regresamos a China con el HarmonyCRH380, que puede alcanzar velocidades máximas de 380 km/h. Su avanzado diseño aerodinámico reduce la resistencia al aire y mejora su eficiencia energética. También utiliza tecnología de propulsión eléctrica, lo que le permite mantener veloci-



El sistema hyperloop consiste en una red de tubos, que conectan centros de movilidad en todo el mundo, con cápsulas que viajan a velocidades ultra altas en el vacío. Crédito: Hyperloop Transportation Technologies (HTT).

dades elevadas de manera eficiente. Utilizan energía eléctrica para operar, lo que contribuye a la reducción de emisiones y al uso de energía más limpia. Opera en varias líneas de alta velocidad, conectando ciudades como Pekín, Shanghái y Guangzhou.

EI N700S

Conocido como tren bala, el N700S es el modelo de la sexta generación de la serie N700 y el más avanzado. No en vano lleva en su nombre la 'S' de supremo. Este tren está operado por la empresa JR Central (Central Japan Railway Company) y cubre la línea Tokaido Shinkansen entre Tokio y Shin-Osaka. Además de por su forma aerodinámica y su alta tecnología, el N700S destaca por su longitud y su alta capacidad. En sus 16 coches pueden viajar 1.323 pasajeros que disfrutan de una placentera experiencia de viaje, gracias a los asientos ergonómicos y una mayor amplitud en la distribución de los asientos.

Los N700 tienen una potencia total de 17.080 kW y está diseñado para alcanzar una velocidad máxima de 360 kmh, aunque su velocidad operativa está en 300 kmh.

En su diseño y construcción, además de JR Central, participaron otras empresas como Kawasaki Heavy Industries, Hitachi y Nippon Sharyo, entre otras. Fruto de esta colaboración surgieron las innovaciones que

incorpora el N700S, como el sistema de frenado regenerativo o una avanzada tecnología de seguridad y control que garantiza un viaje seguro y eficiente.

Eurostar

Los trenes Eurostar conectan la ciudad de Londres con París, Bruselas y Ámsterdam, haciendo parte de su recorrido por el canal de La Mancha. El operador ferroviario es Eurostar International Limited, que en 2022 se fusionó con la compañía Thalys, unión que ha fortalecido la red europea de líneas de alta velocidad y ha mejorado la conectividad entre ciudades importantes. Eurostar circula a 300 km/h salvo en el Canal, donde su velocidad se reduce a 140 km/h. Para una mayor seguridad, estos trenes utilizan un avanzado sistema de diagnóstico.

InterCityExpress

Sin salir de Europa nos encontramos con el InterCityExpress (ICE), una serie de trenes eléctricos de alta velocidad que circulan por Alemania, Austria, Suiza, Francia, Bélgica, Países Bajos y Dinamarca. Los modelos más avanzados como el ICE3 y el ICE4 pueden alcanzar una velocidad de 330 km/h. Para el desarrollo de los ICE, el operador ferroviario Deutsche Bahn AG ha colaborado con los fabricantes Siemens y Bombardier.

Los trenes del futuro

Alfa-X

El Alfa-X es un prototipo de tren de alta velocidad desarrollado por la empresa japonesa Japan Railway Group, que podría superar los 400 km/h. Su diseño aerodinámico reduce la resistencia al viento y aumenta la eficiencia energética. Incorpora tecnologías avanzadas en términos de sistemas de control, seguridad y eficiencia energética.

Hyperloop

Hyperloop es un transporte terrestre de alta velocidad que utiliza cápsulas que viajan a través de tubos de vacío. El entorno de baja presión de los tubos de vacío reduce notablemente la resistencia aerodinámica de las cápsulas, lo que garantiza un funcionamiento energéticamente eficiente. Los pasajeros pueden disfrutar de un viaje cómodo y silencioso gracias a los sistemas de levitación y propulsión magnética. Con todos estos avances, el Hyperloop podría alcanzar la vertiginosa velocidad de 1.200 km/h, lo que supondría viajar de Madrid a Barcelona en tan solo 35 minutos.

Este sistema ha sido ideado por Elon Musk, CEO de Tesla y Space X, bajo el concepto de hardware libre, lo que ha abierto la puerta para que numerosas empresas en todo el mundo hayan podido aportar sus ideas y tecnologías a través de proyectos interdisciplinarios. Entre las empresas participantes figuran las españolas Zeleros y Artificial, antigua Carbures.

Zeleros, compañía tecnológica fundada en 2016 por un equipo de ingenieros de la Universidad Politécnica de Valencia, lidera el desarrollo del Hyperloop en Europa y cuenta con el apoyo de socios como Altran, Red Eléctrica, Angels Capital o Adif. Su propuesta se basa en integrar la propulsión y la levitación en el propio vehículo, reduciendo los costes y el consumo energético de la infraestructura.

Española es también Carbures, empresa especializada en la fabricación de estructuras de fibra de carbono para los sectores aeroespacial, automotriz e industrial. Carbures, ahora Airtificial, se encarga de construir las cápsulas del Hyperloop en sus instalaciones de El Puerto de

Santa María (Cádiz), utilizando materiales compuestos ligeros y resistentes. En 2018, Airtificial alcanzó un nuevo contrato con la estadounidense Hyperloop TT, para construir cinco kilómetros de tubo dotado con sensores capaces de detectar cualquier anomalía en el conducto.

Trenes autónomos

Los trenes autónomos son ya una realidad. Se trata de vehículos que pueden operar sin intervención humana gracias a tecnologías como la inteligencia artificial, el CBTC (control de trenes basado en comunicaciones), el 5G, sensores o sistemas de posicionamiento global (GPS). La combinación de estos avances permite que los trenes puedan tomar decisiones de forma autónoma como frenar ante una situación de emergencia o mantener distancias de seguridad respecto a otros vehículos que circulan por la misma vía. Pueden también detectar obstáculos o bien adaptar la velocidad al entorno.

Los trenes autónomos se comunican entre sí y con los centros de control a través de la comunicación inalámbrica. Esta tecnología permite que el tren genere e intercambie datos sobre su funcionamiento, el consumo de energía, su ubicación o el estado técnico. De esta manera se mejora la eficiencia del vehículo y se obtiene una mayor fluidez en la operación de la red ferroviaria.

Los beneficios de los trenes autónomos son múltiples. Por un lado, consumen menos energía y son más sostenibles, por otro, aumentan la capacidad y la frecuencia de los convoyes, lo que mejora el servicio prestado a los pasajeros y el transporte de mercancías. Además, incrementan la seguridad y la fiabilidad del tránsito ferroviario.

Ya hay algunos trenes autónomos que circulan en el mundo, aunque la mayoría son de prueba o de uso limitado. El primero de ellos comenzó a funcionar en Australia en 2017 y se dedica al transporte de mineral de hierro desde las minas hasta los puertos. Y en enero de 2020, China puso en marcha el primer tren bala autónomo, capaz de alcanzar una velocidad máxima de 350 km/h.

En Europa, el primer tren autónomo se estrenó en 2021. Se trata del

S-Bahn, que circula automáticamente a lo largo de 23 kilómetros entre las estaciones Berliner Tor y Bergedorf/Aumühle.

Trenes de hidrógeno

Los trenes propulsados por hidrógeno prometen revolucionar el transporte ferroviario y contribuir a la transición ecológica, ya que permitirán descarbonizar aquellas líneas ferroviarias que aún no están electrificadas. De hecho, la Unión Europea quiere que el 20% de los trenes que hoy circulan con diésel lo hagan con hidrógeno en 2030.

El hidrógeno es un vector energético que se puede obtener a partir de fuentes renovables mediante un proceso llamado electrólisis. Al almacenarse en depósitos y pasar por una pila de combustible, el hidrógeno se combina con el oxígeno del aire y genera electricidad y agua, sin emitir ningún otro residuo. De esta forma, se puede alimentar un motor eléctrico que mueve el tren, sin necesidad de catenarias ni cables.

Uno de los países que más está apostando por el hidrógeno es España. Uno de los proyectos más avanzados es el Vittal One, fruto de la colaboración entre Renfe y Repsol. Se trata de un tren híbrido que utiliza electricidad e hidrógeno renovable. Este tren, diseñado para las líneas de Cercanías y Media Distancia, podrá circular a una velocidad máxima de 220 km/h en modo eléctrico y de 160 km/h en modo hidrógeno. La pila de hidrógeno consumirá tan solo 0,25 kg/km y dará al tren una autonomía de 800 km sin electrificación. Está previsto que su puesta en marcha comience a finales de este mismo año 2023.

Desafíos del ferrocarril

Como hemos visto, desde sus orígenes hasta nuestros días, el ferrocarril ha demostrado su capacidad para adaptarse a los cambios y a los retos del progreso y la ingeniería tiene un papel clave en este proceso de adaptación. Esta disciplina podrá aportar soluciones a los grandes retos que el ferrocarril tiene por delante, como la interoperabilidad entre redes ferroviarias y operadores, la innovación en infraestructuras, la digitalización o la sostenibilidad. Para superarlos, el ferrocarril deberá seguir apostando por la investigación, el desarrollo y la innovación.

Mayte Castillo

Directora de Rodalies de Catalunya en Renfe, y miembro del Consejo Asesor del Máster en Sistemas Ferroviarios y Tracción Eléctrica de la UPC

“La alianza entre la universidad y la empresa es fundamental e imprescindible”

Mónica Ramírez

Formar a profesionales que se integren en diferentes segmentos del negocio del sector ferroviario, estudiar aspectos referentes a electrificación, señalización, comunicaciones, material rodante, y gestión y explotación de empresas ferroviarias, o colaborar con empresas punteras en este sector, con el fin de formar profesionales que se adapten a las necesidades del mercado actual, son algunos de los principales objetivos del Máster en Sistemas Ferroviarios y Tracción Eléctrica, puesto en marcha por la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

El máster cuenta con las aportaciones de especialistas en sistemas ferroviarios, algunos de ellos directivos de importantes empresas del sector, que cuentan sus experiencias a los participantes del máster, ya que uno de los objetivos es compartir el conocimiento de las compañías punteras en el sector ferroviario. Se trata de ofrecer una formación en consonancia con las necesidades de las organizaciones.

El máster cuenta con un Consejo Asesor, formado por destacadas empresas y entidades, como Adif, Alstom, Bombardier, CAF, COMSA, Electranos, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Fundación Talgo, Ferrocarriles de la Generalitat de Catalunya (FGC), IDOM, IKOS Consulting, Indra, Ingerop, Irvia, Nertus, IN-MOVE by Railgrup, Renfe, Sener, SIGULA, SERVITEC Radyal, Siemens, Transportes Metropolitanos de Barcelona (TMB) y TRAM. Además de colegios profesionales, como el Consell de Col·legis d'Enginyers Tècnics Industrials de Catalunya (Consejo de Colegios de Ingenieros Técnicos Industriales de Cataluña).

Con el fin de conocer las necesidades de las organizaciones, en lo que respecta a los profesionales del sector ferroviario, y las principales innovaciones en este ámbito, Técnica Industrial ha entrevistado a Mayte Castillo, directora de Rodalies de Catalunya en Renfe.



Mayte Castillo

“En Renfe apostamos por la formación de futuros profesionales”

Renfe forma parte del Consejo Asesor del Máster en Sistemas Ferroviarios y Tracción Eléctrica, impartido por la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), que contribuye a la formación especializada de los profesionales que integran uno de los más importantes sectores del país. Como miembro de dicho Consejo Asesor, ¿en qué consiste el asesoramiento y la participación de Renfe en este máster?

En primer lugar, en Renfe apostamos por la formación especializada de todos los futuros profesionales del sector ferroviario, pensando que algún día pueden formar parte del equipo de personas que trabajan en la compañía.

Nuestra participación en el Máster se desarrolla en diferentes momentos y espacios: organizamos visitas prácticas con los alumnos a nuestras instalaciones de la Base de Mantenimiento de Vilanova i la Geltrú, donde los profesio-

sionales realizan una explicación conjunta con el profesor del máster, sobre el mantenimiento de primer y segundo nivel de los vehículos de Rodalies. Por otro lado, visitamos el Centro de Gestión de Rodalies de Catalunya, donde los alumnos pueden conocer en tiempo real cómo se organiza y gestiona la explotación del servicio de Rodalies en todos sus aspectos: trenes, recursos humanos, información al viajero, equipamiento de las estaciones, etc.

Además, colaboramos en el Máster facilitando los desplazamientos en Rodalies de los alumnos, desde Barcelona, para realizar las clases presenciales. Adicionalmente, en algunas ediciones, hemos propuesto a algún trabajador como alumno, gracias al convenio existente entre Renfe y la UPC.

El programa de este máster es un referente en la formación superior de los aspectos técnicos del ferrocarril, como la operación y explotación de servicios ferroviarios, el material rodante y el mantenimiento de vehículos, la electrificación y la energía, la señalización o la comunicación y gestión del tráfico ferroviario. ¿Cuáles son las principales necesidades, presentes y futuras, de las empresas líderes del sector ferroviario? ¿Y concretamente de Renfe?

Hasta la creación de este máster, entre otros, no existía una especialización tan concreta en el sector ferroviario, tanto en lo que se refiere a la infraestructura como en la operación ferroviaria. Al mismo tiempo, en estos últimos años estamos viviendo un proceso de relevo generacional de los profesionales del sector, que da lugar a una necesidad relevante de profesionales en el sector ferroviario. Por ello, la formación de estos profesionales en el Máster de sistemas ferroviarios y tracción eléctrica nos ofrece una excelente oportunidad para dar respuesta a la demanda creciente de trabajadores, derivada de esos nuevos empleados necesarios.

Para nosotros, Renfe, estos profesionales nos pueden dar respuesta a las

convocatorias públicas que se van generando, disponiendo ya de una formación que minimiza el tiempo de aprendizaje en gran medida.

El máster va dirigido a ingenieros de diversas ramas (Industrial; Caminos, Canales y Puertos; Telecomunicaciones; e Informática), además de a profesionales del sector ferroviario. ¿Qué pueden aportar los ingenieros a las necesidades técnicas actuales del sector ferroviario?

Los ingenieros cuentan con una formación y están preparados para aplicar los conocimientos científicos a la invención, diseño, perfeccionamiento y manejo de nuevos procedimientos a la industria, todo ello con una visión global enfocada a la innovación. Estas características hacen que posean una base de conocimiento perfecta para mejorar el ferrocarril, entendiendo su funcionamiento y diseñando nuevas técnicas que permitan definir, optimizar y mejorar el mantenimiento de las instalaciones y los trenes. Todo ello se traduce, al final, en una explotación que minimiza tanto los costes de explotación como posibles incidencias.

¿Considera que la vinculación entre universidad y empresa supone que haya un mayor nivel de inserción laboral?

La alianza entre la universidad y la empresa es fundamental e imprescindible y, como consecuencia, permite una mayor inserción laboral. Las empresas evolucionan muy rápidamente y deben dar respuesta a las necesidades cambiantes del mercado. En la universidad, en cambio, los planes de estudio suelen cambiar más lentamente. Por ello, esa vinculación de los dos entornos es fundamental para que la orientación de los estudios de investigación, nuevos programas universitarios, vayan alineados con lo que está sucediendo en la empresa. Un ejemplo, la movilidad de las personas. En estos momentos, necesitamos respuestas ágiles para hacer frente a los cambios en la movilidad en cuanto a combinación de medios de transporte, información, sistemas de ticketing, etc., y cómo integrar todos estos aspectos aprovechando la digitalización.

¿Qué profesionales específicos necesita en estos momentos Renfe, para llevar a cabo el desarrollo tecnológico que requiere la compañía?

Necesitamos profesionales especializados pero capaces de trabajar y desarrollar los pro-

yectos de una manera transversal. Cada vez más contamos con profesionales con formación en nuevas tecnologías, especializados en entender a nuestros clientes, capaces de organizar e interpretar datos y dispuestos a trabajar en equipo, sin que les importe la movilidad por motivos profesionales.

¿El programa de prácticas profesionales es una vía de acceso directo al mundo laboral?

El programa de prácticas profesionales es una vía muy interesante para tener contacto con el mundo laboral, principalmente para todas aquellos estudiantes que no han tenido la oportunidad de ser empleado en una empresa y que han dedicado toda su etapa de formación a estudiar. Considero que es una oportunidad, en una primera fase, que abre las puertas a ese futuro profesional ansiado y que preocupa a nuestros jóvenes.

Por otro lado, las prácticas permiten al alumno confirmar o descartar un determinado sector como salida profesional. Es una primera toma de contacto donde entusiasmarse o no con una profesión, en nuestro caso con el apasionante mundo ferroviario. Además, en un programa de prácticas los alumnos empiezan a crear los primeros contactos con el sector, haciendo networking.

En la actualidad, Renfe está desarrollando su Plan Estratégico 2019-2023-2028, y uno de los pilares para lograr sus objetivos es la Transformación Digital. ¿Qué actuaciones e iniciativas se están llevando a cabo o está previsto realizar, en este sentido?

Efectivamente, la Transformación Digital es una de las palancas del Plan Estratégico actual de Renfe. El objetivo es transformar a Renfe en un operador integral de movilidad y operador logístico integrado, y digitalizar los procesos de negocio. En ambos aspectos estamos trabajando. En el primer caso, con el desarrollo del proyecto d.c. (Renfe as a Service), Renfe se convierte en la primera empresa pública gestora de servicios de movilidad puerta a puerta. Esto es gracias a que la plataforma cuenta con la tecnología necesaria para ofrecer la solución de movilidad que más se ajuste a los requerimientos y circunstancias de cada persona. En resumen, aplicamos la tecnología para dar respuesta a las nuevas necesidades de movilidad.

¿Y sobre el uso de tecnologías de Inteligencia Artificial que permitan digitalizar y optimizar las actividades de mantenimiento de trenes y material rodante?

Las nuevas tecnologías deben ayudarnos a tener una visión on-line de nuestros trenes,

con multitud de aplicaciones, tanto a nivel de experiencia de cliente como de diagnóstico del propio vehículo. En el primer caso, se trata de poder disponer de información en tiempo real sobre las ocupaciones, franjas horarias de mayor demanda, así como de transmitir a los viajeros toda la información que pueda resultar de interés.

En el segundo, la monitorización de los vehículos nos permite que podamos detectar cualquier pequeña alteración en su funcionamiento, por mínima que sea, y aunque no provoque ninguna incidencia. Ello implica visualizar cada uno de nuestros trenes, desde el puesto de mantenimiento y control, cosa que ya podemos hacer con los trenes más modernos que tenemos, los tipos CIVIA, y adelantarnos para corregir cualquier desviación.

Los nuevos trenes, por las nuevas tecnologías, permitirán intensificar estas funciones, circunstancia que nos ayudará a actuar con una precisión exquisita en aquellos componentes que necesiten una intervención, adelantándonos a posibles fallos en un futuro, así como de atender las necesidades de nuestros clientes, de forma rápida y eficaz.

Pero no solo aplicamos la Inteligencia Artificial en el mantenimiento de trenes, sino que lo hacemos en la mejora de la seguridad y comodidad de nuestros viajeros en las estaciones. En este sentido, Renfe ya ha instalado los primeros equipos de videovigilancia inteligente en casi un centenar de estaciones de Cercanías de toda España. Es el primer paso para la completa digitalización de los sistemas de seguridad de 483 estaciones de Cercanías, un proyecto denominado "Renfe Smart Security Station". Este nuevo sistema recopila y procesa de forma anónima y automatizada miles de datos a través del sistema CCTV de cada estación y los integra en un cuadro de mando único.

Por último, ¿cuáles son sus próximos proyectos?

Desde Renfe apostamos por la transformación digital que nos permita posicionarnos en el mercado como una empresa puntera en movilidad. Una prueba de ello es la inversión de cerca de 4.000 millones de euros que Renfe está destinando a la compra de nuevos trenes para la renovación integral de la flota que la compañía destina a la prestación de servicios públicos. Es una compra histórica, que nos permitirá tener trenes de mayor capacidad, inteligentes, confortables y adaptados a las necesidades de los viajeros.

Sonia Segade

Gerente de Transformación Tecnológica de Renfe

“La ingeniería está presente en nuestras operaciones y en nuestros trenes, forma parte del ADN de la compañía”

Mónica Ramírez

Desde marzo de 2020, Sonia Segade es responsable de Transformación Tecnológica de Renfe Operadora, y su responsabilidad es impulsar proyectos de transformación que aporten valor al negocio de Renfe. Además, ha sido profesora del programa de postgrado “Smart Mobility: Intelligent Systems of Transport”, en la Universidad Politécnica de Catalunya.

Sonia comenzó su carrera profesional en 2006, y cuenta con una amplia experiencia en proyectos e iniciativas de transformación digital para grandes empresas y organizaciones, como Everis, Telefónica o Iberdrola, entre otras.

En cuanto a su formación académica, estudió Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, en la especialidad de Sistemas de Telecomunicación y, posteriormente, cursó estudios de Ingeniería de la rama industrial, concretamente la especialidad de Organización y Logística. Años después completó estas carreras con dos Másteres, uno en Medioambiente y Energías Renovables, y un MBA for Digital Talent.

¿Cómo fue su incorporación al ámbito laboral?

Tanto ahora como cuando me incorporé al mercado laboral, la demanda de profesionales de carreras relacionadas con la Ingeniería era muy alta. Me incorporé a Iberdrola antes de finalizar mis estudios de Telecomunicaciones, y desde entonces he ido complementando mi formación en base a cómo ha evolucionado mi carrera profesional; cursé mis estudios superiores mientras trabajaba. La realidad es que para mí, y en general, para los profesionales relacionados con las ingenierías, la incorporación al mercado laboral, por la demanda existente, es relativamente sencilla en comparación a otras profesiones, lo que permite tener un abanico de posibilidades más amplio sobre el que decidir.

¿Y en Renfe, concretamente?

La incorporación a Renfe fue a través de una



Sonia Segade

“La temática por excelencia es la Inteligencia Artificial Generativa”

convocatoria pública de empleo; al ser una empresa pública, cualquier profesional que esté interesado puede presentarse a las convocatorias que periódicamente se publican.

Desde la empresa en la que trabaja previamente a mi incorporación en Renfe, había realizado varios proyectos para Renfe, y era conocedora de los retos, desafíos y oportunidades de transformar la organización con la tecnología como protagonista; como paréntesis, indicar que la transformación digital es una de las palancas del plan estratégico. Antes de mi incorporación, ya tenía una amplia experiencia en el sector, y conocía la compañía también desde dentro, así que decidí iniciar esta nueva aventura con esa visión: ayudar a Renfe a poner la

transformación digital como palanca de la transformación del negocio, del foco en nuestros clientes, en la mejora de la eficiencia y productividad y, en definitiva, a ayudar a la organización en todo lo que mi ámbito de responsabilidad puede aportar para conseguir que el ferrocarril y, en concreto, los servicios de Renfe sean los elegidos por los ciudadanos en sus desplazamientos.

Desde marzo de 2020, es responsable de Transformación Tecnológica de Renfe Operadora. ¿Qué funciones desempeña principalmente? ¿Cómo se estructura este departamento?

Como responsable de Transformación Tecnológica, mis responsabilidades están vinculadas a la implantación de grandes proyectos de transformación dentro de la organización, en ámbitos relacionados con IM (gestión de infraestructuras informáticas). Disponemos de 2 centros de procesamiento de datos, y gestionamos también las cargas de trabajo, tanto en Amazon Web Services como en Azure (Microsoft). El equipo de arquitectura también está bajo mi responsabilidad, siendo su función la definición, supervisión y validación de la arquitectura y ciclo de vida de todas las aplicaciones de la compañía, tanto informacionales como operacionales, la gestión del puesto de trabajo, tanto el equipamiento como las soluciones de productividad gestión de conocimiento y colaboración, como la parte hardware y la atención a nuestros empleados, y uno de los proyectos más estratégicos de nuestra compañía, “doco”, la plataforma de movilidad como servicio de Renfe. Cada una de estas líneas de trabajo corresponde con un departamento, pero la realidad es que los proyectos de transformación son en ocasiones tan complejos e interdepartamentales, que las líneas de separación entre unos equipos y otros son cada vez más finas.

¿Qué proyectos destacaría entre los más importantes que se han impulsado durante su etapa en Renfe?

Han sido muchos y de gran calado los pro-

yectos que hemos abordado en este periodo, en torno a 60 proyectos divididos en 20 líneas estratégicas, y estos proyectos se han abordado mientras se realiza el mantenimiento, evolución y gestión de todos nuestros sistemas de información, que para que se entiendan los órdenes de magnitud, Renfe tiene en torno a 1.800 servidores virtuales, dos centros de proceso de datos, 600 aplicaciones, más de 1,5 Pentabytes de almacenamiento, y en 10 minutos se venden unos 2.500 billetes, se atienden 90.000 peticiones de información, y hemos atendido 3.500 transacciones SAP y 9.000 transacciones de otras aplicaciones. En resumen, un ecosistema complejo que no puede parar mientras abordamos otras iniciativas.

Por resumir los principales proyectos en grandes bloques, destacaría los siguientes: desarrollo de soluciones basadas en la analítica de datos para la mejora de las decisiones en la compañía; implementación de la Plataforma de movilidad como servicio de Renfe, "doco", un nuevo paradigma en nuestro negocio, en el que ofrecemos servicios de transporte puerta a puerta; mejora del puesto de trabajo de nuestros empleados (Smart Digital Workplace); mejora de los servicios críticos de la compañía; implantación de un nuevo centro de respaldo; creación de un segundo centro de proceso de datos, para poder garantizar que tras una contingencia, los sistemas de información sigan funcionando, cumpliendo con el marco regulatorio de las infraestructuras críticas, y la implantación de los centros de competencias digitales. Estos centros tienen como objetivo generar equipos de trabajo especializados en tecnologías innovadoras, buscando la captación, retención de talento y el incremento la eficiencia operativa en la implantación de proyectos y servicios.

También destacaría la mejora de la Ciberseguridad TI, OT, y la mejora del cumplimiento normativo; la digitalización de procesos y reingeniería de aplicaciones a través de tecnología Low Code, en este caso Power APPs, que nos permite realizar aplicaciones operativas de forma sencilla y digital de forma más rápida en procesos departamentales, que actualmente no están digitalizados. Estos proyectos nos ayudan, por ejemplo, en la digitalización de actividades relacionadas con el mantenimiento de los trenes. Como resumen, hemos lanzado iniciativas vinculadas a los pilares estratégicos de la compañía, con el foco en el cliente, como son la mejora de la productividad, y la mejora de la seguridad e innovación.

“Una de las palancas de nuestro plan estratégico es la transformación digital”

¿Cuáles son los retos y dificultades con los que se ha encontrado en el desarrollo de su trabajo?

Como he comentado antes, la transformación digital es una de las palancas de nuestro plan estratégico, y esta palanca es clave para mejorar los servicios que ofrecemos a nuestros clientes; mejorar en la toma de decisiones, ser más competitivos en un mercado en competencia, incrementar la productividad de nuestros empleados, ofreciéndoles soluciones que faciliten su trabajo diario y, al mismo tiempo, nos permitan gestionar el conocimiento dentro de la organización. Nos está permitiendo innovar e incluso impulsar nuevos modelos de negocio, como es el caso de nuestra plataforma de movilidad como servicio.

El mayor reto que tenemos por delante es conseguir que la experiencia de nuestros usuarios sea excelente. No podemos pensar únicamente en ofrecer una experiencia web o app mejor, que también, tenemos que digitalizar toda la cadena de valor para mejorar nuestros servicios en cualquiera de sus ámbitos, desde cómo mantenemos nuestro material rodante para sacar el mayor aprovechamiento a nuestros activos, a cómo calculamos la demanda para ser más eficientes en el uso de la capacidad de la vía o cómo ofrecemos servicios diferenciales a nuestros clientes, innovando y complementando nuestros servicios más tradicionales. La tecnología tiene que estar presente en la estrategia de cada una de nuestras actividades y ser un facilitador para adaptarnos a un mercado en competencia, y a una demanda de nuestros clientes que cada vez es más elástica.

Actualmente Renfe está desarrollando su Plan Estratégico 2019-2023-2028, y uno de sus principales objetivos es la Transformación Digital. ¿Cómo puede contribuir un ingeniero/a en este reto tan importante?

Un ingeniero tiene cabida en todos y cada uno de los proyectos que he mencionado anteriormente, y de forma adicional, en los

ámbitos de transformación digital. La ingeniería está presente en nuestras operaciones, en nuestros trenes, digamos que forma parte del ADN de la compañía con lo que las posibilidades de un ingeniero en una compañía como Renfe son muy numerosas.

¿Cuáles son las últimas tendencias tecnológicas en este ámbito?

Este año la temática por excelencia en cuanto a futuro es la Inteligencia Artificial Generativa. Nos ayudará a realizar simulaciones y anticiparnos a los escenarios futuros. No es una tecnología madura, aunque evolucionará muy rápidamente y es fundamental empezar a trabajar con ella.

¿Cómo se imagina que evolucionarán en el futuro?

Me imagino unos sistemas de información que nos permitan anticiparnos, tomar decisiones acordes con la realidad de cada momento, y que ayuden a transformar y evolucionar nuestros procesos productivos desde el mantenimiento de nuestros trenes, al cálculo de la demanda, por poner un ejemplo, y de este modo hacer frente a las necesidades de nuestros clientes con la calidad que siempre ha caracterizado a la compañía.

También ha sido profesora del programa de postgrado “Smart Mobility: Intelligent Systems of Transport”, en la Universidad Politécnica de Catalunya. ¿Qué conocimientos y experiencias se han aportado en este postgrado?

En este postgrado se estudia el transporte desde todos los ámbitos, y con una perspectiva tanto teórica como práctica, es uno de los postgrados más reconocidos en el sector. Mi contribución está centrada principalmente en el ámbito de las plataformas digitales, fundamentales en el nuevo paradigma de la movilidad como servicio.

¿Cuáles son sus próximos proyectos?

Estamos a punto de lanzar nuestro nuevo plan estratégico; ya tenemos muchos proyectos en cartera relacionados con nuestros sistemas económico-financieros, transformación de aplicaciones, migración al cloud de aplicaciones para clientes, etc. Pero para mí, la clave será definir una estrategia de transformación vinculada a las nuevas prioridades del plan estratégico, con el objetivo de impulsar los cambios necesarios para nuestros negocios y, en definitiva, para poner el foco en nuestros clientes.

Aníbal Luis Piqueras Casado

Jefe de Ingeniería e Investigación de Proyectos de Alta Velocidad en Renfe

“España es el segundo país del mundo, después de China, en número de kilómetros en servicio de líneas de alta velocidad”

Mónica Ramírez

La trayectoria profesional de Aníbal Luis Piqueras, de 35 años, ha estado ligada, desde el principio, al sector ferroviario. Ingeniero de material rodante y Máster en Sistemas Ferroviarios, es en la actualidad jefe de Ingeniería e Investigación de Proyectos de Alta Velocidad, en la Dirección General de Desarrollo y Estrategia de Renfe Operadora, vinculado principalmente a los proyectos de nuevas series de alta velocidad S106 y S107.

¿Qué le llevó a especializarse en ingeniería ferroviaria, y especialmente a realizar el Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios?

Aunque el ferrocarril y las materias relacionadas con éste siempre habían llamado mi atención durante mi etapa universitaria, fue mi primer trabajo relacionado con el sector ferroviario lo que finalmente me llevó a especializarme en ingeniería ferroviaria y a realizar el Máster Universitario en Sistemas Ferroviarios. Aunque el año en el que cursé el máster requirió un esfuerzo personal importante, ya que durante el curso tuve que simultanear las clases presenciales y el estudio con el trabajo diario, en una época que todavía no estaba extendida la formación o el trabajo semipresencial. Analizando con perspectiva el resultado final, puedo asegurar que el esfuerzo se ha visto recompensado.

¿Cómo fueron sus inicios en este ámbito profesional? ¿Y concretamente en el Grupo Renfe?

En mis inicios en el ámbito profesional ferroviario tuve la oportunidad de participar en varios proyectos de diseño y construcción de cambiadores de ancho de vía, así como de otras instalaciones ferroviarias. Posteriormente, tuve mi primera experiencia con un proyecto de material rodante, en concreto, a través de un proyecto de investigación de homologación de un sistema de



Aníbal Luis Piqueras Casado

“El área de ingeniería de material de Renfe la conformamos 17 ingenieros”

rodadura desplazable apto para vagones de mercancías.

La experiencia adquirida en los proyectos de material rodante ferroviario fue lo que me permitió, posteriormente, entrar a formar parte del Grupo Renfe, en el año 2018. En concreto, dentro del área de Ingeniería de Material. Desde entonces me encuentro participando principalmente en los proyectos de las nuevas series de Alta Velocidad S106 y S107 de Renfe. Estos proyectos tienen como objetivo principal la homologación de 30 unidades de la serie S106, y de 13 unidades de la serie S107, para prestar servicio en líneas de Alta Velocidad.

Actualmente es jefe de Ingeniería e Investigación de Proyectos de Alta Velocidad en Renfe, ¿qué funciones desempeña principalmente?

La principal función que ejerce un jefe de Ingeniería e Investigación de Proyectos en Renfe es la coordinación de los proyectos de ingeniería durante el ciclo de vida del material del diseño, la fabricación, la homologación y la garantía. Nuestro trabajo comienza en la etapa inicial de concepto, en la que elaboramos las especificaciones técnicas de suministro. A esta etapa le sigue la valoración técnica de las ofertas técnicas de los licitadores. Una vez adjudicado el contrato, nuestra función se centra en la coordinación de las etapas de diseño y fabricación, lo que incluye la revisión y el análisis de la documentación de proyecto, el control de la fabricación y el seguimiento y asistencia a las pruebas estáticas y dinámicas del material. Una vez finalizadas las fases de diseño y fabricación, y encontrándose el material homologado para poder prestar servicio comercial, nuestra función se centra en el control y el seguimiento de la garantía. En mi caso en particular, todas estas funciones las desempeño en los proyectos de nuevas series de Alta Velocidad de Renfe.

¿Cuántos profesionales forman parte de su equipo de trabajo? ¿Y en lo que respecta a los ingenieros, más concretamente, qué perfiles tienen?

El área de ingeniería de material de Renfe actualmente la conformamos 17 ingenieros, que coordinamos los nuevos proyectos de trenes de Renfe de Alta Velocidad, Media Distancia, Cercanías, Ancho Métrico y también Locomotoras. Estos proyectos forman parte del mayor proceso de modernización de la flota de Renfe de toda su historia.

En cuanto a los perfiles, el equipo está formado principalmente por inge-

nieros industriales de diferentes especialidades, aunque también lo formamos ingenieros de otros ámbitos, como las telecomunicaciones, la informática o la ingeniería civil, teniendo en cuenta el carácter transversal del sector ferroviario.

¿Qué cualidades y capacidades considera que es necesario tener para desarrollar su trabajo, como jefe de Ingeniería e Investigación?

Para poder desarrollar el trabajo de jefe de Ingeniería e Investigación en Renfe es necesario tener conocimiento de la normativa ferroviaria, y de los procesos normativos de homologación y autorización de material rodante ferroviario. Una parte muy importante de nuestras funciones se centra en el análisis de las especificaciones técnicas de los diferentes sistemas del tren, que elaboran los constructores en la fase de diseño inicial. Disponer del conocimiento normativo es necesario, con la finalidad de poder verificar la conformidad de los proyectos con la normativa vigente y con las especificaciones de interoperabilidad.

Asimismo, es imprescindible tener conocimiento de los procesos de homologación y autorización de material, así como el rol que desempeñan los diferentes actores en todo el proceso, entre los que se encuentran las empresas ferroviarias, los fabricantes de material, el administrador de infraestructuras, los organismos de certificación y las agencias de seguridad responsables de conceder en última instancia la autorización de los nuevos vehículos. Por último, tener conocimientos técnicos específicos de cada uno de los sistemas también resulta fundamental para desarrollar nuestro trabajo.

¿Es fundamental estar en constante formación para adaptarse y conocer las nuevas tecnologías e innovaciones en este ámbito de la ingeniería?

La tecnología avanza a un ritmo muy rápido, y esos avances tecnológicos también afectan a la ingeniería de material rodante, como no podía ser de otro modo. Un vehículo ferroviario está integrado por diferentes sistemas, y resulta fundamental estar actualizándose constantemente para conocer las últimas innovaciones de todos ellos.

En el caso en particular del área de material de Renfe, conocer el estado del arte de cada uno de los sistemas resultó imprescindible para la elaboración de las especificaciones técnicas de suministro

del nuevo material. Los vehículos ferroviarios se caracterizan por tener una vida útil prolongada (hasta 40 años), y es imprescindible que desde un primer momento se tengan en cuenta las últimas innovaciones, con objeto de que el producto final sea lo más eficiente posible y duradero. La reducción del consumo de energía de los nuevos vehículos ha sido uno de los requisitos más importantes que se ha tenido en cuenta en los nuevos proyectos de Alta Velocidad, por ejemplo.

¿Qué retos tecnológicos destacaría para la innovación en el sector ferroviario, en general?

El sector del transporte es uno de los principales causantes de emisiones de CO₂, por lo que el reto para la innovación que yo destaco es conseguir un ferrocarril todavía más eficiente en términos de consumo de energía y de reducción de emisiones.

En la lucha contra el cambio climático, el ferrocarril se ha demostrado que juega un papel fundamental, al ser capaz de transportar viajeros o mercancías con un nivel de emisiones significativamente más bajo que el transporte por carretera o en avión. Aun así, y aunque pueda resultar muy ambicioso, considero que el reto tecnológico es llegar a conseguir un nivel de emisiones cero.

¿Qué innovaciones se están implantando actualmente en su área de trabajo y cuáles son los principales proyectos que se han llevado a cabo?

Dentro de la Alta Velocidad, una de las principales innovaciones que se ha desarrollado, y que se está implantando en los nuevos vehículos de la serie S106, ha sido la de ampliar el ancho de las cajas de los coches, permitiendo así incrementar la capacidad de los vehículos. Los de la serie S106 serán los primeros trenes de Alta Velocidad de la flota de Renfe que, gracias a esta innovación, permitirán transportar a más de 500 personas en una única unidad.

La búsqueda de energías alternativas, la instalación de iluminación inteligente tipo LED en los vehículos, el empleo de materiales más ligeros, la mejora de los aislamientos o la incorporación de sistemas de conducción eficiente son otras líneas de trabajo que se están desarrollando actualmente para aplicar en los nuevos proyectos de trenes en curso. El objetivo final trata de buscar que los trenes sean más eficientes para conseguir

una movilidad más sostenible.

¿Cómo cree que evolucionará la Alta Velocidad en España?

Tras la reciente liberalización del sector ferroviario español y la entrada de nuevos operadores en Alta Velocidad, todo parece indicar que el número de viajeros continuará incrementándose en los próximos años. Si se tiene en cuenta el material rodante disponible, la flota de Renfe se verá incrementada significativamente en los próximos años, una vez entren en servicio las 30 unidades de la serie S106 y las 13 unidades de la serie S107.

Partiendo de esta base, así como del hecho de que España es el segundo país del mundo, después de China, en número de kilómetros en servicio de líneas de alta velocidad, este modo de transporte debería tender a ser -en un futuro no muy lejano- la primera elección para los viajeros en aquellas rutas donde compita con otros modos, como el vehículo privado, el avión o el autobús.

El ferrocarril en general, y la Alta Velocidad en particular, están llamados a ser el modo de transporte de referencia de los próximos años en España, al tratarse del modo más eficiente y sostenible.

En alguna ocasión ha realizado publicaciones técnicas y ha participado en Congresos como ponente, ¿cómo fue la experiencia?

Tuve la oportunidad de participar en un congreso organizado por la Universidad de Castilla-La Mancha relacionado con el ferrocarril de alta velocidad. La experiencia fue muy enriquecedora, ya que estos congresos te permiten conocer de primera mano los proyectos de investigación que se encuentran en desarrollo dentro de tu área de conocimiento. Adicionalmente, este tipo de experiencias te permiten ampliar tu red de contactos, y te dan la oportunidad de conocer a otros ponentes dentro del sector en el que trabajas.

Por último, ¿cuáles son sus próximos proyectos?

Mis próximos proyectos son continuación de los que actualmente me encuentro desarrollando. Uno de ellos consiste en la homologación de la serie S106 en Francia, lo que permitirá a Renfe ofrecer servicios con esta serie hasta París. Otro de los proyectos consiste en la homologación de la serie S107 en España, cuyo próximo hito es el comienzo de las pruebas dinámicas en vía de este material.

Adrián Fernández Carrasco

Director gerente de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles

“La puesta en valor del patrimonio histórico ferroviario se complementa con una intensa labor para promover el ferrocarril como modo clave en la movilidad sostenible”

Marita Morcillo

Este año se celebra el 175 aniversario del primer ferrocarril español, la línea entre Mataró y Barcelona. Por ese motivo nos hemos dirigido a Adrián Fernández Carrasco, actual director gerente de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, una institución pública que se dedica a promover el conocimiento y la utilización del ferrocarril en España. En esta entrevista, Fernández Carrasco nos habla de la misión y los objetivos de la Fundación, de las actividades que realiza para conservar y difundir el patrimonio histórico y cultural del ferrocarril, y de los retos que afronta el tren como modo de transporte sostenible en el presente y el futuro.

¿Cuáles son los objetivos de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles?

Nuestra Fundación es una institución del sector público, adscrita al Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA), que promueve el conocimiento y la utilización del ferrocarril a través de actividades orientadas al servicio de la ciudadanía.

Por una parte, la Fundación organiza gran cantidad de actividades culturales, tecnológicas, de investigación y formación, publicaciones periódicas y libros especializados. También somos la entidad estatal responsable de la conservación y recuperación del patrimonio cultural ferroviario, cuya cara más visible se encuentra en los museos del Ferrocarril de Madrid y de Cataluña, y de su patrimonio documental, a través de la Biblioteca Ferroviaria y el Archivo Histórico Ferroviario.

¿Qué actividades lleva a cabo la FFE para el cumplimiento de sus objetivos?

Para poder cumplir sus objetivos, desde su creación en 1985, la Fundación lleva a cabo un gran número de actividades dirigidas a dar a conocer el pasado, pre-



Adrián Fernández.

“Las actividades de la FFE suponen una puerta de entrada al mundo del tren”

sente y futuro de nuestro ferrocarril.

En primer lugar, la FFE es responsable de identificar, preservar, investigar y divulgar el Patrimonio Histórico y Cultural Ferroviario, ya sea material o inmaterial, y tanto en bienes muebles (con más de 400 vehículos inventariados y miles de piezas históricas) como en edificios y líneas ferroviarias en desuso, velando por su recuperación para la implantación de Vías Verdes o actividades económicas y culturales diversas. En esta labor también resulta fundamental la conservación del patrimonio documental; pues la Fundación custodia los fondos que constituyen el Archivo Histórico Ferro-

viario y la Biblioteca Ferroviaria, punto de encuentro fundamental para investigadores, académicos y público general.

La puesta en valor del patrimonio histórico ferroviario se complementa con una intensa labor para promover el ferrocarril como modo clave en la movilidad sostenible de nuestro presente. Con esa idea, desde la Fundación se promueve la investigación, formación y estudio de la economía del transporte en general, y en particular la investigación, la formación, el estudio, el desarrollo, la innovación y los estudios sobre el ferrocarril en su entorno político, económico y social, como transporte competitivo a nivel nacional e internacional. Para ello ponemos a disposición de empresas, instituciones y público general un completo programa de formación, un área de estudios e I+D sobre transporte ferroviario, así como publicaciones y estudios referentes en el sector como la Revista “Via Libre” (publicación decana del tren que en 2024 cumplirá su 60º aniversario), el Anuario del Ferrocarril, o el Observatorio del Ferrocarril en España (OFE), entre otros.

Y además de esta labor sectorial, las actividades de la Fundación suponen la puerta de entrada hacia el mundo del tren para la ciudadanía en general. La FFE organiza actividades culturales relacionadas con el ferrocarril, tales como premios culturales, exposiciones, congresos y presentaciones. A través de nuestros museos, más de 150.000 personas acceden cada año a conocer los detalles del ferrocarril, con especial interés en el público infantil, a quienes dirigimos proyectos didácticos orientados al fomento de las disciplinas STEAM entre los más jóvenes.

¿Cuál es la situación actual del ferrocarril en España y cuáles son sus retos?

España ha tenido uno de los procesos de



Material rodante de la colección del Museo del Ferrocarril de Madrid – Delicias.

construcción y modernización más notables de Europa en las últimas décadas. En poco tiempo hemos pasado de una obsoleta red del siglo XIX a conectar los grandes nodos del país gracias a los 4.000 kilómetros de líneas de alta velocidad, hasta llegar a ser la red más extensa de Europa.

Desde el punto de vista de la industria y el material móvil, la renovación del material rodante es igualmente importante en los últimos años. En breve tendremos en nuestras vías los Avril de Talgo o los nuevos Cercanías construidos por Alstom y Stadler, así como materiales destinados a la cornisa Cantábrica fabricados por CAF. Además de modernizar el parque, dichos encargos robustecen una industria ferroviaria española cada vez más exitosa también en el ámbito internacional.

Otro aspecto clave es la reciente liberalización del mercado ferroviario de viajeros, lo que ha permitido a empresas como Ouigo e Iryo comenzar a operar en diversos corredores complementando la oferta anterior de Renfe. España se convierte así en el primer país con tres empresas funcionando en libre competencia, y los resultados inmediatos no pueden ser más positivos en términos de demanda y aprovechamiento de la red, motivo por el que desde Adif se está proponiendo extender

“Toda la energía empleada por Renfe en sus tráficos está certificada como cero emisiones”

las ventajas de este modelo a otros puntos del territorio.

Este aumento de la cuota de mercado a favor del tren es fundamental, dado el papel que el ferrocarril ejerce en los planes de sostenibilidad y reducción de emisiones comprometidos por el Estado. Toda la energía empleada por Renfe en sus tráficos electrificados está certificada como “cero emisiones” y se trabaja por incrementar las fuentes renovables en todo el ciclo de uso del tren, incluyendo estaciones y talleres.

En cuanto a los retos de futuro, sin duda son finalizar las ampliaciones de red de alta velocidad previstas, llevando en paralelo los procesos de mejoras y mantenimiento de la red convencional y, en especial, las Cercanías ferroviarias: unas infraestructuras urbanas y metropolitanas que mueven

anualmente más de 374 millones de viajeros al año, y cuya fiabilidad es imprescindible para reducir la dependencia del automóvil en las grandes áreas urbanas.

En diciembre de 2021, el Consejo de Ministros aprobó la Estrategia de Movilidad Segura, Sostenible y Conectada 2030, es.movilidad. ¿Cuál ha sido el papel de la Fundación en esta estrategia?

La Estrategia de Movilidad Sostenible, Segura y Conectada se está desarrollando a través de 9 ejes estratégicos, que se componen de más de 40 líneas de actuación con más de 150 medidas concretas. Todos ellos comparten un fondo común: apostar por la optimización de la gestión (a través de la electrificación, digitalización y modernización de procesos) en lugar de ser meros contenedores de obras de infraestructura, principal defecto de los documentos de planificación de ministerios anteriores.

La consecución de este nuevo modelo de movilidad que se persigue en la Estrategia pasa por un incremento de los modos sostenibles, aportando un esquema intermodal donde cada transporte ofrezca lo mejor de sí y donde las ventajas del ferrocarril en eficiencia, sostenibilidad y confort lo sitúan como punta de lanza en

esta Estrategia.

La Fundación ha participado de manera tangencial en algunos aspectos, apoyando y reforzando distintas acciones de difusión, especialmente en el marco de la celebración, en 2021, del Año Europeo del Ferrocarril. Sin embargo, la labor de la Fundación está siendo más activa en entornos como la Estrategia Estatal de la Bicicleta, donde, gracias a la experiencia obtenida en los 30 años del Programa de Vías Verdes, el MITMA ha designado a la FFE para gestionar subvenciones para invertir en infraestructura ciclista en municipios de menos de 50.000 habitantes.

“El futuro del ferrocarril, desde el punto de vista tecnológico, es imparable y colaborativo”

¿Qué importancia tiene el ferrocarril en las políticas de movilidad sostenible tanto españolas como europeas? ¿Están apostando estas políticas por el ferrocarril?

El Plan de reactivación económica europea supone la gran apuesta por la movilidad sostenible y digital. En 2020 el Consejo de Europa de la Unión aprobó el programa Next Generation EU, dotado de 750.000 millones para el periodo 2021-2026. Anteriormente la Unión Europea ya disponía de una hoja de ruta para alcanzar la transición ecológica, digital y sostenible con horizonte 2050, pero la pandemia puso de manifiesto que había que impulsar el proceso.

En estas ayudas el transporte va a ser protagonista, marcado por los pilares de sostenibilidad, digitalización y conectividad. La necesaria transformación verde conlleva la gran inversión en transporte.

En el caso de España, el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR) supone importantes inversiones y reformas estructurales en las que el ferrocarril tiene un papel determinante. Al transporte ferroviario se le asigna el 85% de las inversiones destinadas a este modelo de transporte que apuesta por la descarbonización y la digitalización.

En 2021 la Fundación puso en marcha el Plan Estratégico 2021-2025. ¿Cuáles son sus objetivos y qué iniciativas recoge?

El Plan Estratégico de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles 2021-2025 constituye la herramienta esencial para que determinemos cómo vamos a desarrollar nuestra misión, cuáles son los objetivos estratégicos que nos proponemos alcanzar en los próximos años y cómo vamos a intentar cumplirlos. El Plan no solo define la hoja de ruta para llegar hasta el año 2025, sino que es el comienzo de una nueva cultura de la organización.

En los últimos años la FFE ha pasado por una situación cambiante, debido al aumento de la complejidad social y a la reducción de los recursos para abordarla. Ello conlleva la necesidad de emprender un nuevo proceso de planificación.

El plan incluye 35 iniciativas, que se agrupan en tres pilares de desarrollo. Un pilar de patrimonio cultural ferroviario con proyectos trascendentales para la organización, como el Plan Nacional de Patrimonio Cultural Ferroviario. Un pilar técnico y cultural con acciones destinadas tanto a patronos y grupos de interés de la Fundación como hacia la ciudadanía. Y un pilar de eficiencia y eficacia destinado a cimentar la sostenibilidad de la organización y con iniciativas como el Plan de Futura Gobernanza, determinante para el devenir de nuestra entidad.

La FFE se encarga de la Secretaría Técnica de la Plataforma Tecnológica Ferroviaria Española (PTFE). ¿Cuál es la misión de esta agrupación y qué actividades lleva a cabo?

La PTFE tiene como misión el impulso y la promoción del potencial tecnológico de la industria ferroviaria española para posicionarla en situaciones favorables de mercado, utilizando la innovación como ventaja competitiva. En este sentido, dinamizar, promover, fomentar e impulsar las actividades de I+D+i son los objetivos prioritarios de la estrategia de la PTFE, con el fin de potenciar el liderazgo mundial del sector ferroviario español.

La PTFE alinea las estrategias de los diferentes agentes del sistema de innovación mediante el fomento del diálogo y la colaboración público privada, concentrando los esfuerzos de I+D+i y reduciendo la fragmentación en el espacio de la investigación. Actualmente componen la PTFE 510 entidades; con un 70% de representación de la industria, 5% de la Administración, 20% de la Academia y

5% de entidades facilitadoras y agrupaciones, como asociaciones y fundaciones. La Fundación desarrolla su secretaría técnica, así como su gerencia.

¿Qué es lo que más le gusta de su trabajo?

El entorno y el equipo de trabajo. Desarrollar el trabajo con un equipo en el que confías y generas confianza es la mejor manera de trabajar, además de enfrentarme a nuevos retos, cada cliente y proyecto es diferente.

¿En qué situación se encuentra la I+D+i del ferrocarril en España? ¿Cuáles son sus principales actores?

La I+D+i ferroviaria goza de muy buena salud. Actualmente se ha consolidado como un ecosistema ferroviario muy competitivo, unido, con objetivos comunes y visión a largo plazo. El ecosistema (empresas –constructoras de material móvil–, centros tecnológicos, operadores y administradores ferroviarios y universidades) forman parte de proyectos nacionales e internacionales.

A nivel internacional la participación de entidades españolas en la Europe's Rail JU (y anteriormente Shift2Rail) puede considerarse como un gran éxito de todo el sector ferroviario, con alta presencia en número de entidades e importante retorno económico en los diferentes niveles y estructuras creadas durante su desarrollo y en las convocatorias de propuestas lanzadas anualmente.

En cuanto a los principales actores, a nivel público se encuentran los operadores y administradores ferroviarios (Adif, Renfe, FGC, FGV y Metro de Madrid, entre otros), que actúan como agentes tractores de la I+D+i.

El otro gran pilar de la I+D+i lo compone la industria, quien aporta, de acuerdo a las cifras de Mafex, el 8% del PIB industrial, con una facturación ferroviaria superior a los 4.500 millones de euros y con una inversión del 4% de la factura-

“La industria cifra sus efectivos en 30.000 trabajadores, agrupados en 200 empresas”

ción destinado al desarrollo de la I+D+i. La industria cifra sus efectivos en 30.000 trabajadores, agrupándose principalmente en 200 empresas que abarcan material móvil, infraestructura, comunicaciones y componentes.

Por último, en cuanto a los agentes facilitadores y entidades encargadas de promover la actividad investigadora y la competitividad en el sector, junto a la PTFE destacan tres asociaciones: Mafex, In Moove-Railgrup y Railway Innovation Hub.

¿Cuáles son las necesidades tecnológicas a corto y medio plazo del ferrocarril español?

Las necesidades tecnológicas tienen que incluir tanto el transporte de personas como el de mercancías. Entre otras, cabe citar la digitalización en la industria ferroviaria para un transporte más eficiente y rentable (en este sentido los gemelos digitales y la creación de modelos a gran escala); los usos futuros del SIG; desarrollos de capacidades para el mantenimiento predictivo; el aprovechamiento al máximo del Big Data; la tecnología de drones, encaminada a favorecer en gran parte la seguridad; y el Internet de las cosas (IoT) que favorezca el desarrollo de una poderosa infraestructura tecnológica que interactúe en la red, siendo capaz de detectar, recibir, transmitir y analizar información de forma segura y fiable.

En señalización, el despliegue de tecnologías FRMCS y 5G, que revolucionarán la operación ferroviaria. El FRMCS (Future Railway Mobile Communication System), tecnología disruptiva que dé respuesta a los nuevos requisitos del sector. Hace falta una banda ancha suficiente para mayor capacidad en las transmisiones.

Tecnologías de los materiales, pues cada vez hay materiales más avanzados y, sobre todo, tecnologías de superficie y multifuncionalidad que amplíen las funcionalidades de los materiales empleados en la construcción del material móvil. El objetivo es hacer posible la integración de soluciones en el producto final, sin perder eficiencia; y poner en marcha la fabricación industrial a un coste razonable.

Tecnologías de fabricación aditiva que cumplan con todas las normativas y con costes bajos; desarrollo de nuevas tecnologías de tracción basadas en hidrógeno y biocombustibles, y avances en la implementación y desarrollos de robotización, tanto en la fabricación como en procesos de operación, construcción,

seguridad o mantenimiento.

El ferrocarril ha avanzado vertiginosamente en los últimos tiempos con trenes más veloces, seguros y eficientes. ¿Cómo ve el futuro? ¿Cree que estos avances tecnológicos han mejorado la percepción que la sociedad tiene del tren?

El futuro del ferrocarril tecnológicamente es imparable, pero no puede desligarse del contexto económico y social. Hay que tener en cuenta conceptos como la economía colaborativa, el ferrocarril no es competidor de otros modos de transporte. La pandemia ha producido un fenómeno que no se puede parar ni ignorar, y es el incremento de los vehículos de movilidad personal (patinetes, bicicletas, etc.). La realización de la última milla del viaje en este tipo de vehículos está cambiando los paradigmas. El tren como pieza esencial de una ciudad inteligente es un firme candidato a abanderar un cambio modal hacia sistemas de movilidad más vertebrados y sostenibles, concepto que demanda de la ciudadanía. En este sentido se avanza hacia una nueva concepción de la movilidad: Mobility as a Service (MaaS).

“En los 175 años de historia del ferrocarril, los ingenieros han tenido un rol esencial”

A día de hoy, ¿se puede decir que el tren es un competidor del avión?

En cada corredor donde el tren ha logrado un tiempo de viaje competitivo frente al avión se ha atestiguado un cambio modal significativo en favor del primero. Esta es la experiencia de 30 años de alta velocidad, acentuada durante el periodo de liberalización del ferrocarril en el que nos encontramos. En los trayectos más demandados, hoy la cuota es abrumadoramente favorable al uso del tren, situándose en el 78,3% en el corredor Madrid-Barcelona, y en el 89,9% en el corredor Madrid-Valencia. Estas cifras auguran un corto recorrido para la competencia entre diferentes modos. Más bien veremos una competencia entre diferentes empresas ferroviarias, del mismo

modo que en su momento la liberalización del transporte aéreo supuso un repunte de la competencia entre aerolíneas.

Si, como estamos comentando, apostamos por el ferrocarril, con gobiernos que se comprometen a reducir las emisiones del transporte, hay que evitar impulsar modos de transporte que conlleven más contaminación.

¿Cuál que es el papel de los ingenieros en los avances que se están produciendo en el ferrocarril?

Desde el momento en que se trazaron los planos del primer ferrocarril, la ingeniería ha sido fundamental para su avance, ya que su experiencia ha contribuido al desarrollo, diseño y construcción, y mejora de todas las redes ferroviarias en todo el mundo.

En los 175 años de historia del ferrocarril en nuestro país los ingenieros han desempeñado un rol esencial en el avance de esta forma de transporte, enfrentándose a numerosos desafíos e introduciendo tecnologías clave que han revolucionado la industria ferroviaria. Si en los primeros años, tanto en lo referido a expertos como el material rodante, se generó una enorme dependencia exterior, con la evolución en el tiempo –y muy especialmente en los últimos 35 años– el ‘know how’ y buen hacer en las infraestructuras y material móvil tienen el marchamo español.

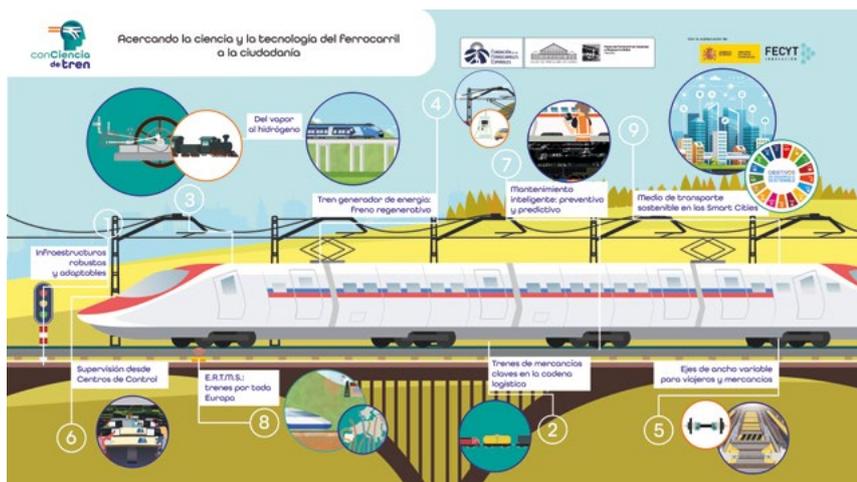
La sostenibilidad y la eficiencia energética también son áreas donde los ingenieros del ferrocarril han marcado la diferencia, desarrollando tecnologías que reducen emisiones de carbono y mejoran el rendimiento y eficiencia de los trenes, lo que en suma contribuye a la lucha contra el cambio climático y promueve un transporte más limpio y sostenible.

En suma, en estos 175 años los ingenieros han sido –y seguirán siendo– agentes clave del progreso tecnológico en el ferrocarril. Su capacidad de acometer desafíos técnicos y desarrollar sistemas avanzados, su compromiso con la sostenibilidad están contribuyendo a transformar el ferrocarril en el eje de vertebración de la movilidad respetuosa con el medio ambiente.

La creciente demanda de profesionales de la ingeniería por parte del sector ferroviario es en estos momentos un reto a abordar, en el que la Fundación de los Ferrocarriles Españoles se encuentra comprometida.

El proyecto “conCiencia de Tren”: acercando la ciencia y la tecnología del ferrocarril a la ciudadanía

El ferrocarril es un elemento que genera una enorme atracción entre el público general. La mezcla de cercanía y cotidianeidad, historia y logro industrial, es una combinación que hace del ferrocarril un elemento atractivo para el público.



Infografía del proyecto Con Ciencia de Tren, desarrollado por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE).

Fundación de los Ferrocarriles Españoles ¿Qué es Conciencia de Tren?

El proyecto “conCiencia de Tren” ha aprovechado esa atracción que produce el ferrocarril para tratar de conectar con un público, que desconoce en ocasiones los desarrollos científicos, la importancia que los avances tecnológicos han tenido en el desarrollo presente del ferrocarril, y para lograr que el tren del futuro sea clave en la movilidad sostenible.

El objetivo de este proyecto es fomentar la cultura científica, tecnológica y de innovación de la sociedad, despertando la curiosidad de la ciudadanía a través de la ciencia, tecnología e innovación que han sido necesarias para el desarrollo del ferrocarril. También se dan a conocer los actuales avances científicos y tecnológicos desarrollados por parte de entidades españolas que impactarán la movilidad del futuro.

El papel de las mujeres en la historia de la ciencia y la tecnología ferroviaria ha sido menor (al igual que otros ámbitos científicos) debido a desigualdades en el acceso a la educación, el mercado laboral, las esferas de poder o la toma de decisiones, entre otras. “conCiencia de Tren” pretende contribuir a un cambio de actitudes con respecto a esta cuestión, destacando las aportaciones científico-tecnológicas de las mujeres al ferrocarril, así como la importancia de la mujer en el presente y futuro de este medio de transporte.

Para ello, se han ido incluyendo referentes femeninos en las jornadas, contenidos, materiales audiovisuales, selección de imágenes, etc.

El proyecto “conCiencia de Tren”, desarrollado por la Subdirección de Estrategia, Innovación y Formación de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE), tiene como base el desarrollo de materiales y contenidos audiovisuales y físicos que transmitan en un lenguaje claro, sencillo y visual los desarrollos científico-tecnológicos que han sido necesarios para configurar el sistema ferroviario tal y como lo conocemos.

Estos materiales han sido utilizados de diversas formas, en diversos canales y formatos con el objetivo de llegar a un público lo más amplio posible, estando dirigidos a público general no especializado. Se han apoyado en acciones en redes sociales y páginas web, con artículos y notas de prensa en boletines, actividades presenciales con jóvenes y escolares en los museos del ferrocarril de la FFE, y una jornada con expertos y expertas del sector. Así mismo, se ha realizado una encuesta de participación ciudadana, que ha permitido evaluar los conocimientos que, sobre las innovaciones científico y tecnológicas del ferrocarril, tiene el público general.

El proyecto se basa en unos elementos de innovación que le aportan un valor añadido al proyecto:

- Fomenta vocaciones científicas y tecnológicas en niños y niñas.
- Tiene un formato original en diseño y alcance.
- Despierta la curiosidad científica.
- Está destinado a público no especializado.
- Contribuye a dar resonancia social a la ciencia e innovación que se desarrolla en España.
- Trata de sumar a algunos colectivos sociales normalmente alejados de las acciones de divulgación científica, como son las personas con discapacidad auditiva, personas de todas las edades y de todos los niveles educativos.
- Los contenidos están disponibles en español, catalán e inglés.
- El impacto se extiende a medio y largo plazo porque todos los materiales se podrán seguir utilizando.

Desarrollo del proyecto

El proyecto “conCiencia de Tren” pretende dar a conocer a la ciudadanía los trabajos sobre innovación y tecnología en el ferrocarril desarrollados por entidades fundamentalmente españolas. El proyecto intenta también fomentar las vocaciones científicas y el espíritu innovador entre los estudiantes, fundamentalmente entre las jóvenes y las niñas, animándolas a decantarse por disciplinas relacionadas con la investigación e innovación en el ferrocarril (STEAM). Para lograr estos objetivos, el proyecto se ha estructurado en torno a cuatro acciones:

- ACCIÓN 1. Desarrollo de contenidos y materiales (videos, podcast, encuesta, etc.)
- ACCIÓN 2. Campaña de divulgación online y colaboración con entidades.
- ACCIÓN 3. Campaña de difusión en los Museos del Ferrocarril de Madrid y Cataluña (acciones y exposición de materiales).
- ACCIÓN 4. Encuentros con estudiantes, docentes, profesionales e investigadores e investigadoras para la divulgación científico-tecnológica del ferrocarril.

Principales resultados de Conciencia de Tren

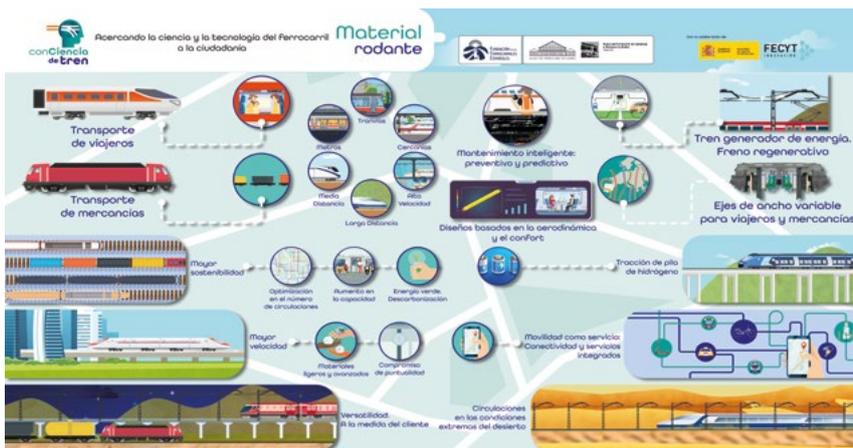
La utilización del sistema ferroviario como medio para incrementar el conocimiento científico y tecnológico de la ciudadanía es una oportu-



Imágenes de los Encuentros realizados.



Algunos hitos del proyecto.



Infografía del proyecto "conCiencia de Tren", sobre material rodante.

nidad con mucho potencial, y el proyecto conCiencia de Tren es ejemplo de ello.

Pero, además, dado que el ferrocarril es una de las formas más sostenibles de transporte de pasajeros y mercancías, y los jóvenes tienen un alto grado de compromiso con el medio ambiente, se convierte en un tema con un

significativo impacto social y conexión con la juventud. Ya sea a través de la educación, la tecnología o la ciencia, jóvenes y escolares de todas partes están aprovechando sus habilidades para defender la acción por el clima, y pueden elegir el tren como opción a su movilidad, pero también como su futuro profesional. Este

proyecto pretende sumar estas habilidades, también las de las chicas.

Los materiales realizados, así como los encuentros con estudiantes, docentes, familias y expertos y expertas, son valiosos para generar conocimientos y acercar la actividad investigadora y científico-técnica del sector ferroviario a la sociedad, creando nuevos soportes de difusión, como vídeos, infografías, podcast, folletos, etc. Todo ello se puede encontrar en el portal web www.ffe.es/concienciadetren.

La experiencia del proyecto ha permitido corroborar algunas de las premisas con las que se partía. Por ejemplo, en las acciones se ha comprobado que existe un gran desconocimiento de las innovaciones científicas y tecnológicas que existen en el ferrocarril y en el sistema en el que se integra. No obstante, el éxito de las actuaciones demuestra la necesidad de acciones como ésta que se ha desarrollado.

Otro resultado del proyecto es que, en general, las niñas y los jóvenes manifiestan inicialmente un menor interés por la temática. Sin embargo, la participación de un elevado número de referentes femeninos, tanto en los vídeos, podcast y otros materiales, como en los encuentros que se han realizado con la ciudadanía, hace que revelen más interés por los contenidos presentados.

Las entidades que han colaborado en el proyecto, como empresas, centros de investigación, universidades, etc., así como otras que han conocido los materiales (también a nivel internacional), han manifestado un gran interés por la iniciativa. El proyecto les ha permitido hacer una reflexión sobre la divulgación que hacen de sus innovaciones, y del interés que despierta el sector ferroviario entre los y las jóvenes, y la ciudadanía, en general. Por ello, se prevé realizar una segunda fase del proyecto.

Los resultados positivos derivados de la evaluación validan el modelo de trabajo y el tipo de acciones desarrolladas en el marco del proyecto, como herramientas adecuadas para hacer entender a la ciudadanía el esfuerzo llevado a cabo en materia de innovación en el ferrocarril en España. Pero, además, se consolida como un proyecto óptimo para fomentar la posibilidad de que los y las jóvenes vean el ferrocarril como un sector dónde poder desarrollar su vida laboral.



Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE), <https://ffe.es/>

Juan Carlos López

General Manager en CAF Digital & Design Solutions y responsable de ingeniería para el desarrollo de proyectos ferroviarios

“Participamos en todas las fases del proyecto, desde la oferta e ingeniería básica hasta la ingeniería de detalle y resolución de incidencias”

Mónica Ramírez

Tras haber tenido otros trabajos, Juan Carlos López Rodríguez, ingeniero electrónico y doctor en Ingeniería y Arquitectura, comenzó su trayectoria profesional en CAF Digital & Design Solutions en el año 2007, como engineering manager, en Linares, gestionando un equipo formado por 180 ingenieros y técnicos para el desarrollo de proyectos ferroviarios. Desde el pasado mes de enero, es general manager en dicha compañía, en cuyas factorías se diseñan y construyen toda clase de vagones de carga admitidos en tráfico nacional e internacional, y se ofrece a los clientes una serie de servicios para renovar y modernizar diferentes flotas de trenes. Además, tiene una patente de “Vagón ferroviario para transporte de semirremolques y contenedores”.

El grupo CAF lo componen un conjunto de más de 100 empresas y más de 13.000 personas en todo el mundo, dedicadas al sector del transporte. En España, cuenta con varias sedes: Beasain (Gipuzkoa), Zaragoza, Irún, Madrid... En su caso, la filial CAF Digital & Design Solutions cuenta con 3 sedes, situadas en Linares, Jaén y Granada, y con un total de 165 empleados, a los que hay que sumar 35 colaboradores. ¿Cómo se estructura la empresa?, ¿cuáles son los departamentos más destacados?

CAF Digital & Design Solutions cuenta con dos grandes áreas, la de Ingeniería y la de Fabricación Digital. El área de Ingeniería cuenta con 6 departamentos: Modernizaciones, desde donde se gestionan los proyectos de rehabilitación de vehículos que, una vez han prestado servicio



Juan Carlos López

“Los principales retos están en la creciente complejidad de los proyectos”

durante varios años, el cliente solicita una actualización en eficiencia energética, o en confort; Technical Project Managers, desde donde se gestionan los proyectos de nuevos vehículos, y se realizan cálculos y anteproyectos; Sistemas, que engloba las especialidades más tecnológicas, como el diseño de la funcionalidad del tren, la integración de los distintos equipamientos, como los aires acondicionados, los equipos electrónicos o las puertas, la programación de las unidades de control, etc.; gestionando a su vez servicios

“Solemos trabajar para proyectos nacionales e internacionales con un nivel de requisitos cada vez más exigente”

transversales, como la gestión de requisitos o de la configuración. Interiores, que agrupa especialidades como el diseño del interiorismo y de la cabina del tren, la estructura y los sistemas de acoplamiento; Transversal, que comprende el diseño de las instalaciones de los equipos, de los “bogies” y de la iluminación del tren, así como de su cableado. Y Tecnología, departamento que da soporte a garantía de postventa y resuelve incidencias de garantía, además de desarrollar plusvalías o gestionar obsolescencias.

El área de Fabricación Digital realiza la optimización del diseño de piezas y conjuntos para su implementación mediante fabricación aditiva, digitaliza piezas y componentes, procesando nubes de puntos para la ingeniería inversa, y fabrica y postprocesa elementos.

En líneas generales, ¿cómo son los principales proyectos que se llevan a cabo?

Solemos trabajar para proyectos nacionales e internacionales con un nivel de requisitos cada vez más exigente en las líneas de producto de tranvías, metros, trenes de piso alto y trenes de piso bajo. Participamos



Actividad de diseño y fabricación de maquetas a escala real de trenes en el área de Digital Manufacturing.

en todas las fases del ciclo de vida del proyecto, desde la oferta e ingeniería básica hasta la ingeniería de detalle y resolución de incidencias.

“Entre personal CAF DDS y colaboradores, contamos con un equipo de más de 200 ingenieros”

La ingeniería es, sin duda, una parte fundamental de CAF DDS, y para ello es necesario contar con una plantilla muy cualificada y especializada, ¿cuántos ingenieros trabajan en la empresa? ¿Resulta complicado encontrar estos perfiles profesionales?

Entre personal CAF DDS y colaboradores, contamos con un equipo de más de 200 ingenieros. En nuestros 18 años de historia, hemos tenido la suerte de contar con dos escuelas de ingeniería muy próximas, la de Linares y la de Jaén, ambas de la Universidad de Jaén. Con la apertura de la tercera sede en Granada nos hemos aproximado a otra escuela importante, la de la Universidad de Granada.

Es cierto que en los últimos tiempos hemos tenido algo más de dificultad a la hora de encontrar estos perfiles tan cualificados, pero nos hemos ido dando a conocer, y creo que tenemos una buena reputación en nuestro entorno geográfico, aunque cabe resaltar que contamos con ingenieros de distintos orígenes de la geografía nacional.

En el ámbito ferroviario, ¿cuáles son las principales innovaciones y tecnologías que se aplican en la actualidad en los proyectos que desarrollan? ¿Cómo han ido evolucionando estas técnicas en los últimos años?

Las tendencias en cuanto a innovaciones tecnológicas en el ámbito del ferrocarril van por la integración de modernos sistemas de señalización y de conducción automática, la mejora de la eficiencia energética de los trenes, la ciberseguridad, la acumulación energética para sustituir a los trenes diésel por trenes de baterías o trenes alimentados por hidrógeno, la mejora del confort hacia los usuarios finales, mediante la puesta a su disposición de conexiones de internet más rápidas y otros sistemas de entretenimiento, la monitorización en la nube de todas las señales de tren para realizar mantenimientos preventivos más precisos... Todo un enorme elenco de tecnologías que

se van integrando en los trenes para hacerlos más cómodos, seguros y eficientes.

¿Cuáles son los principales retos y dificultades a los que se enfrentan en el desempeño de su trabajo?

Los principales retos los encontramos en la creciente complejidad de los proyectos a todos los niveles, por la propia dificultad técnica y de gestión. Por otro lado, en los proyectos de modernización de vehículos ya en servicio, nos encontramos con faltantes de información que dificultan el desarrollo de la ingeniería de modernización de estos vehículos.

¿Cómo se imagina los trenes del futuro?

Trenes cómodos, seguros y eficientes que den respuesta a la necesidad de contar con sistemas de movilidad limpios y totalmente integrados.

¿Es importante estar en continua formación?

Tenemos que estar en continuo aprendizaje y tener una cultura de mente abierta, para conocer las nuevas tecnologías y materiales que ofrece el mercado, para después aplicarlos de manera óptima en nuestro sector.

¿Qué es lo que más le gusta de su trabajo?

El entorno y el equipo de trabajo. Desarrollar el trabajo con un equipo en el que confías y generas confianza es la mejor manera de trabajar, además de enfrentarme a nuevos retos, cada cliente y proyecto es diferente.

Por último, ¿cuáles son sus próximos proyectos?

En este momento, están arrancando proyectos muy interesantes, que en nuestra empresa combinan las actividades de desarrollo de parte de la ingeniería de los vehículos ferroviarios con la detección de componentes que, de partida, ya sean de fabricación aditiva. De esta forma, los operadores reducen sus stocks de piezas de repuesto, pues las pueden “imprimir” a demanda de una forma rápida y eficiente.

Por otro lado, estamos consolidando la actividad de diseño y fabricación de maquetas a escala real de trenes en nuestra área de Digital Manufacturing.

Lucas Esteban González

Ingeniero mecánico y Chief Operating Officer en CAF Digital Manufacturing

“En el sector del ferrocarril se busca, cada vez más, la eficiencia energética y la mejora en la seguridad”

Mónica Ramírez

Dar a conocer e implantar la tecnología aditiva para fabricar prototipos y piezas finales, además de la fabricación de maquetas de tren a escala real 1:1 para validar los diseños que requieren los clientes, es uno de los principales objetivos de CAF Digital Manufacturing, la unidad de negocio de CAF DDS dedicada a la fabricación aditiva y la digitalización. Su principal línea de negocio se ha desarrollado en el campo del transporte ferroviario.

Lucas Esteban González, ingeniero mecánico por la Universidad Politécnica de Madrid, es el Chief Operating Officer en CAF Digital Manufacturing, y desgrana, a lo largo de esta entrevista, el trabajo y los interesantes proyectos que están desarrollando en la actualidad.

¿A qué se dedica CAF Digital Manufacturing?

Somos la fábrica digital de CAF. Nuestro equipo se dedica a la industria 4.0, fabricación aditiva, digitalización y desarrollo de producto, realizando desde la fase inicial de ingeniería, como el análisis de la solución, y la fase final de fabricación.

Como ingeniero que trabaja en este departamento, ¿cómo es su día a día?

Mi día a día es muy entretenido, ya que aportamos soluciones a distintos sectores, como el de la automoción, aeronáutico, médico... Estamos continuamente aprendiendo y enfrentándonos a los retos que nos ofrecen nuestros clientes, ofreciendo nuestro mejor valor en la búsqueda de la solución más idónea.

¿Qué funciones realiza más concretamente?

Mi función principal es la gestión del departamento de CAF Digital Manufacturing, cuidar al equipo, ampliar la



Lucas Esteban Gonzalez

“Tenemos que estar en continuo aprendizaje y tener una mente abierta”

diversificación con la búsqueda de nuevos clientes, conocer y estar al día de las nuevas tecnologías y movimientos de fabricación aditiva y, en general, para aplicarlas después en las soluciones que ofrecemos.

¿Cuáles son los principales proyectos que se han llevado a cabo?

Dar a conocer e implantar la tecnología aditiva dentro del grupo CAF, siendo capaces de fabricar prototipos y piezas finales embarcadas en trenes actualmente en servicio comercial, además estamos inmersos en la fabricación de maquetas de tren a escala real 1:1 para validar los diseños que requiere el cliente. Cabe destacar, además, un proyecto llave

en mano entregado en el año 2022 para Acciona, para el cual se diseñaron, fabricaron y se participó en la instalación en la ubicación final, de tres sistemas ventiladores decorativos de 4 metros de diámetro.

¿Cómo se está realizando la implantación de la industria 4.0 en el sector ferroviario?

Se están adaptando y creando nuevos perfiles de puesto relacionados con la protección de las infraestructuras y la información, como puede ser el rol de responsable de ciberseguridad ferroviaria. Además, a día de hoy, es indispensable contar con un gestor de análisis de datos para comprender y mejorar los resultados en los procesos de fabricación, o por ejemplo, la entrada de nuevos softwares de gestión de inventarios digitales.

¿Qué innovaciones y tecnologías se aplican principalmente?

Principalmente estamos utilizando tecnologías de última generación, como nuevos sensores para conseguir trenes autónomos, nuevos sistemas de análisis de datos del estado del tren de manera continua, nuevas tecnologías de fabricación, como la aditiva, en la que podemos unificar conjuntos, ahorrar peso y eliminar stock.

¿Qué formación específica se necesita tener para desarrollar este trabajo?

Aparte de tener muchas ganas de aprender y estar en continua formación, es necesario

“A día de hoy, es indispensable contar con un gestor de análisis de datos”



Imagen de una maqueta de vagón de tren a escala 1:1, realizada por la empresa CAF Digital & Design Solutions, para una línea ferroviaria de Bonn, en Alemania.

ser ingeniero, conocer los métodos de fabricación tradicional y avanzada, software de diseño y gestión de proyectos.

¿Es importante estar en continua formación?

Tenemos que estar en continuo aprendizaje y tener una cultura de mente abierta, para conocer las nuevas tecnologías y materiales que ofrece el mercado, para después aplicarlos de manera óptima en nuestro sector.

¿Qué es lo que más le gusta de su trabajo?

El entorno y el equipo de trabajo. Desarrollar el trabajo con un equipo en el que confías y generas confianza es la mejor manera de trabajar, además de enfrentarme a nuevos retos, cada cliente y proyecto es diferente.

¿Y lo más complicado?

Problemas del día a día, imprevistos y percances difíciles de identificar; esto lo intentamos solventar con la experiencia.

¿Seguirá evolucionando el sector ferroviario?

En el sector del ferrocarril, cada vez

más, se busca la eficiencia energética y la mejora en la seguridad, ofrecer vehículos ferroviarios más limpios, ligeros y seguros. Para con-

seguir esto, tenemos que seguir trabajando y adaptarnos a la evolución que nos ofrezca la tecnología del futuro.



La rodadura de ruedas independientes guiadas de Talgo. Oportunidades para optimizar el contacto rueda-carril

Desde sus inicios en los años 40, el tren Talgo ha utilizado diversas tecnologías no convencionales, que han configurado una marca claramente diferenciada.

Miguel Sánchez, David Abellán,
Manuel García, José Carlos Miguel y
José Luis López

1. Introducción: Una pequeña revisión histórica

Este artículo comienza con una breve descripción de dichas tecnologías incorporadas por los trenes Talgo, a través de un repaso histórico de su desarrollo a lo largo del siglo XX. Este breve repaso servirá de introducción para profundizar en el estudio de las ventajas y posibilidades de optimización que ofrece el sistema de rodadura de Talgo.

1.1 El tren articulado: el “guiado triangular”

A finales de los años 30, el aligeramiento y el aumento de velocidad de los trenes de pasajeros empeza-

ron a incrementar la inestabilidad y el peligro de descarrilamiento. Para evitar estos riesgos, el ingeniero español Alejandro Goicoechea ideó un concepto de composición articulada continua, como alternativa a los tradicionales coches con cajas independientes montadas sobre bogies. La supresión de los bogies permitiría, por un lado, bajar considerablemente el centro de gravedad, aumentando la estabilidad en las curvas. Por otro lado, la conexión continua entre coches mejoraría el comportamiento en caso de descarrilamiento, evitando el vuelco entre coches, o la posibilidad de descarrilamiento y vuelco de cada coche individual.

En la estructura articulada propuesta, cada eslabón de la composición está formado por una es-

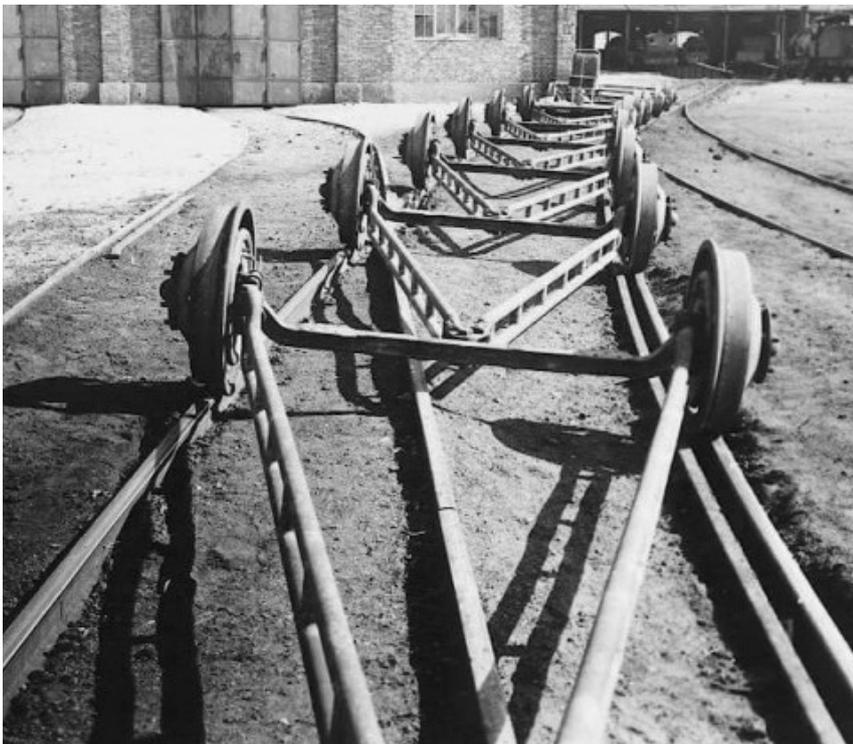


Figura 1. Primer prototipo de guía triangular fabricado en 1940.

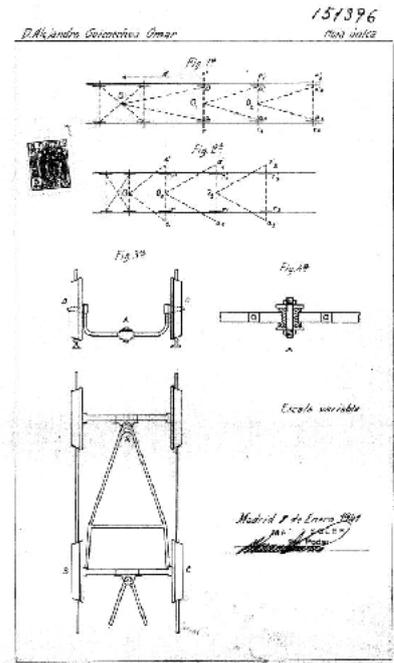


Figura 2. Sistema de “guiado triangular” propuesto en la patente ES151396A1.

tructura triangular ligera y sencilla, con un solo eje en la parte trasera, y cuyo vértice delantero descansa a modo de remolque sobre un punto de articulación situado en el centro del eje del triángulo inmediatamente anterior. De este modo, la dirección marcada por el primer triángulo es seguida por los demás, que siguen la misma trayectoria sin necesidad de ninguna guía adicional. La figura 1 muestra un primer prototipo realizado en 1940 para probar la viabilidad de la configuración propuesta. La invención está amparada por la patente “Sistema combinado de articulación ligera para la organización de trenes en itinerarios guiados”, mostrada en la figura 2, que fue presentada en 1941 tras el paréntesis obligado por la Guerra Civil española.

Aplicando esta sencilla configu-

ración, el guiado ya no se produce por el contacto con los carriles de las ruedas de perfil cónico montadas sobre ejes rígidos, por lo que se elimina el conocido movimiento de guiñada. La propuesta de Goicoechea evita los movimientos transversales de los ejes, que a altas velocidades pueden provocar vibraciones, molestias y, en última instancia, descarrilamientos. Además, se reduce el peso del conjunto de ruedas y se obtiene un aumento de la velocidad crítica del vehículo.

1.2 La rueda libre independiente

Con el concepto desarrollado, las ruedas interior y exterior tienen que girar a velocidades diferentes en curva, lo que impide el montaje sobre un eje rígido y obliga a adoptar la rodadura libre e independiente de cada rueda. Este hecho, lejos de ser un inconveniente, debe considerarse una ventaja. La supresión del eje físico, junto con la eliminación de los bogies o trenes de rodaje, permite situar el piso de los autocares a un nivel muy bajo y, por tanto, un descenso significativo del centro de gravedad, lo que aumenta la estabilidad e incrementará la velocidad en curva. Además, este piso bajo puede mantenerse en el espacio entre las ruedas, lo que permite tanto el acceso de los pasajeros al tren como el paso entre coches a este nivel.

Los detalles asociados a la adopción de la rueda libre se recogen en la siguiente patente presentada por Goicoechea en 1942, que incluía también la posibilidad de desplazamiento transversal de las ruedas, para adaptarse a diferentes anchos de vía (ver figura 3).

A partir de octubre de 1942, la empresa Patentes Talgo comenzó a desarrollar estas ideas, y el primer resultado fue la realización del prototipo denominado Talgo I (figura 4).

1.3 El sistema de guiado reversible

El sistema de guiado triangular simple propuesto por Goicoechea presentaba dos problemas principales. Por un lado, la conexión rígida de las ruedas en la parte trasera de cada coche hace que el eje virtual

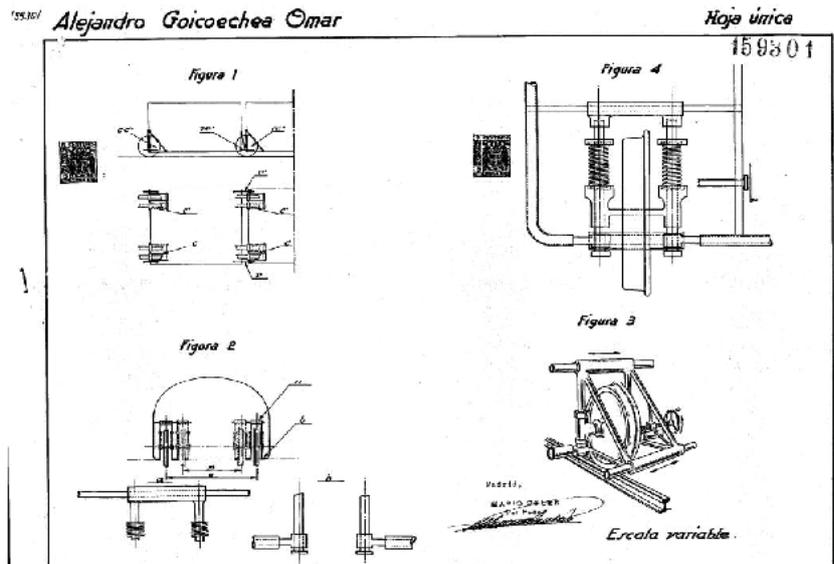


Figura 3. Rueda libre móvil, tal como se describe en la patente ES159301A1.



Figura 4. Sistema de rodadura implementado en el prototipo Talgo I.

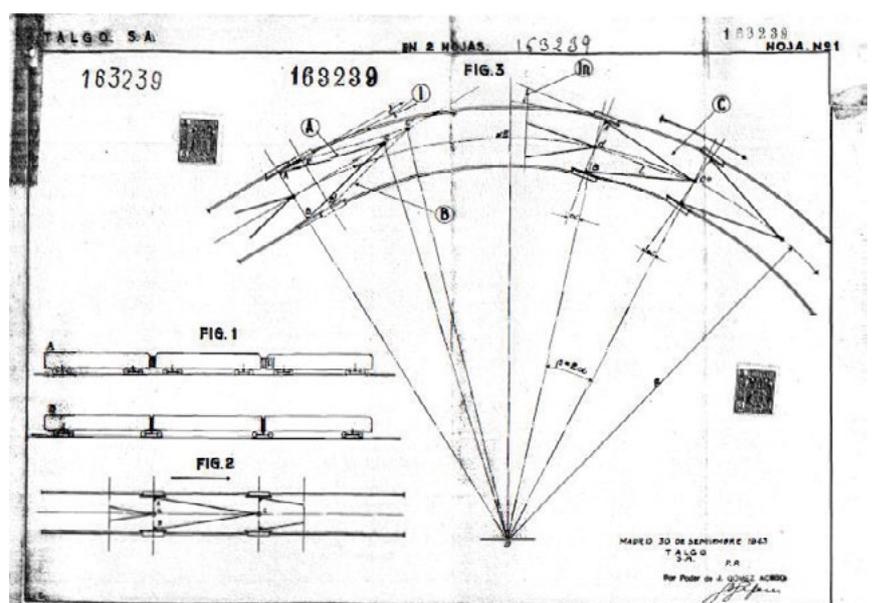


Figura 5. Ángulo de ataque negativo obtenido con el sistema de guiado triangular (croquis incluido en la patente ES163239A1).

que las une esté orientado en una dirección que no pasa exactamente por el centro de la trayectoria. Por tanto, las ruedas no permanecen tangentes a los raíles, sino que tienen un ángulo de ataque negativo hacia el interior de la curva. Este efecto puede apreciarse en el croquis incluido en la primera patente solicitada por Talgo para el sistema de guiado en 1943, que se muestra en la figura 5. Para evitar alcanzar ángulos de ataque excesivamente elevados, era necesario limitar la longitud de los elementos triangulares, y por tanto de los entrenadores, lo que a priori no parecía representar un problema excesivamente grave al tratarse de una composición continua.

Este ángulo de ataque negativo en las curvas suele provocar que la pestaña de la rueda exterior se apoye en la parte trasera del contacto rueda-carril, lo que provoca un desgaste adicional del material. Sin embargo, este contacto en la parte trasera hace que aparezca una fuerza de fricción vertical descendente en la pestaña, que empuja la rueda contra el carril, oponiéndose al descarrilamiento.

Pero el gran problema del sistema de guiado triangular era su irreversibilidad. De hecho, el auto-guiado estable de la composición articulada, y el efecto antidescarrilamiento descrito anteriormente, sólo se producen cuando se tira hacia delante. El sentido de marcha inverso hace que el ángulo de ataque de las ruedas curvas sea positivo, hacia el exterior de la curva. De este modo, la pestaña de la rueda exterior entra en contacto con el carril por la parte delantera, y la fuerza de rozamiento generada empuja la rueda hacia arriba, de modo que tiende a subir por el carril, pudiendo producirse el descarrilamiento a velocidades moderadas. La marcha atrás sólo es admisible para maniobrar a baja velocidad. Por lo tanto, invertir la marcha del tren exige dar la vuelta a toda la composición, lo que puede suponer un grave inconveniente desde el punto de vista de la futura explotación.

Desde las primeras pruebas con el Talgo I, se empezó a plantear la

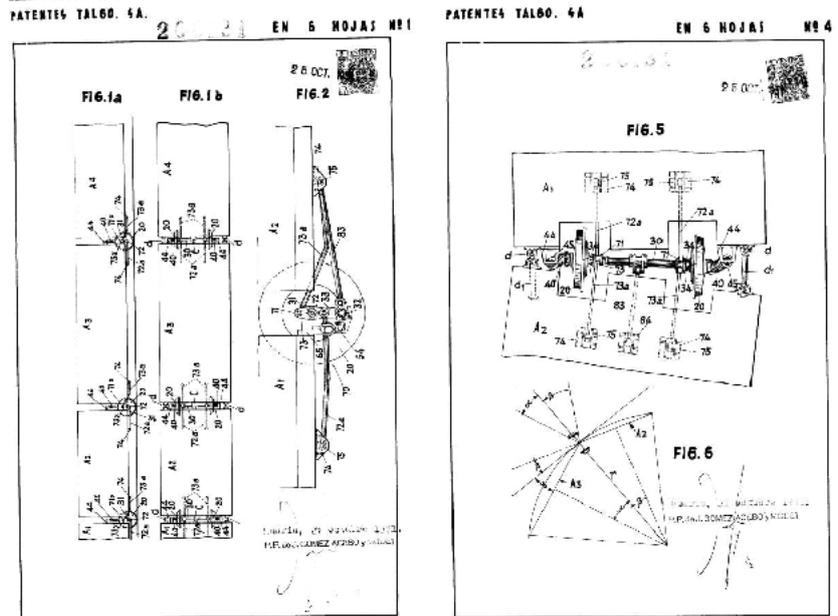


Figura 6. Mecanismo de guiado reversible propuesto en la patente ES200131A1.

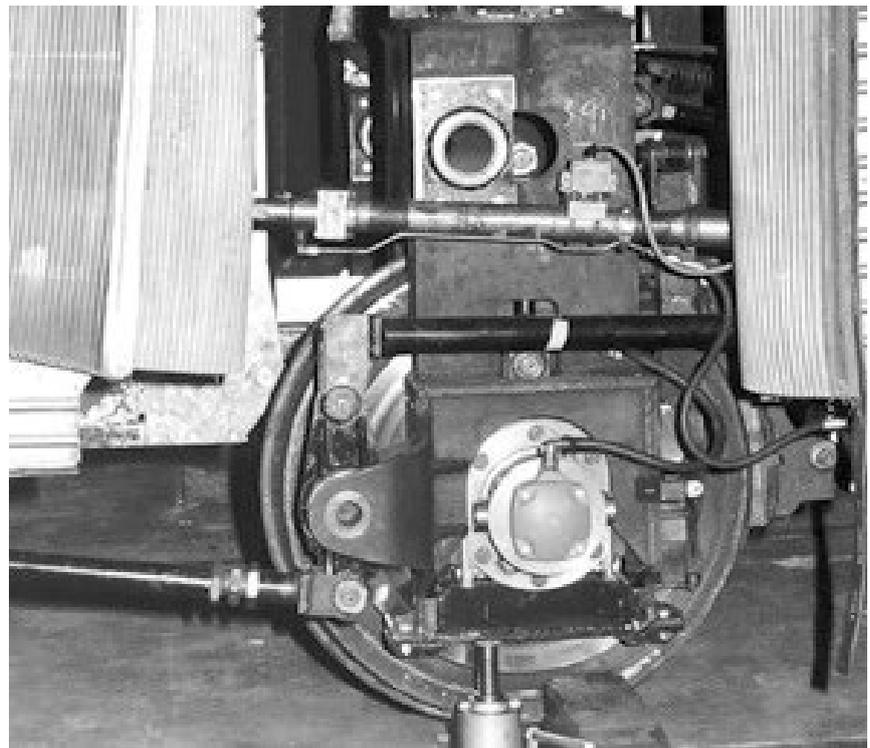


Figura 7. Primera aplicación del guiado reversible en el Talgo III.

necesidad de mejorar el sistema de guiado. La inminente desaparición de las locomotoras de vapor, también irreversible, llevaría a suprimir los “triángulos” (vías de maniobra diseñadas para poder dar la vuelta a los trenes) de las estaciones. Tras las dificultades encontradas para vender el Talgo II (primer modelo comercial) debido a este hecho, la dirección de la empresa, vio la ne-

cesidad de hacer el tren reversible.

En consecuencia, a principios de los años 50, se publicaron varias patentes que proponían mecanismos destinados a permitir el guiado reversible. La primera de ellas, “sistema de guiado por pares de ruedas”, describe un sistema sencillo para el guiado por ejes. Como puede verse en la figura 6, presenta similitudes con el mecanismo

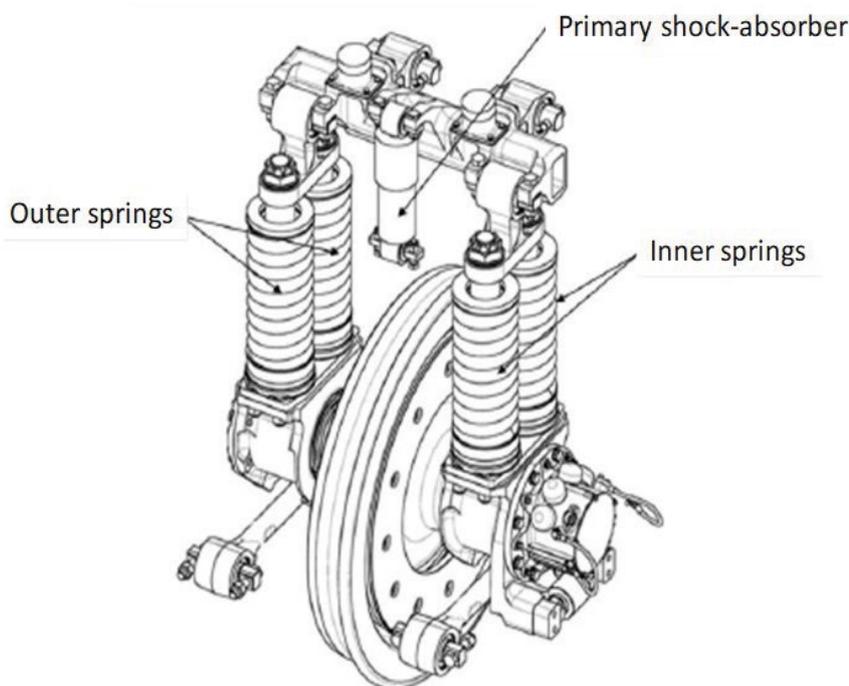


Figura 8. Esquema de la suspensión primaria incorporada en los trenes de alta velocidad.



Figura 9. Rodadura y suspensiones en el nuevo Talgo AVRIL.

Watt, utilizado en las suspensiones de los automóviles, y consigue un ángulo de ataque casi nulo de las ruedas, de forma que éstas se orientan tangencialmente al carril.

Este tipo de mecanismo, que por fin permitía un guiado reversible, se aplicó por primera vez en el Talgo III (figura 7), que empezó a funcionar comercialmente en 1964. El sistema desarrollado entonces, con las lógicas optimizaciones de diseño, es en el que se sigue basando hoy en día el mecanismo de guiado de los trenes Talgo actuales.

2. El mecanismo de rodadura de los trenes Talgo actuales

Todas las tecnologías disruptivas desarrolladas por Talgo a lo largo del siglo XX, se combinaron con éxito para desarrollar el primer tren de alta velocidad de la compañía, el Talgo 350, en servicio desde el año 2000. El buen comportamiento dinámico de estos trenes ha sido estudiado y optimizado, y los resultados pueden encontrarse en diferentes publicaciones. Y la evolución de la tecnología sigue implementándose en el AVRIL, el último modelo que saldrá al mercado de forma inminente.

El sistema de guiado es esencialmente el mismo que el incor-

porado en los trenes anteriores. Sin embargo, la puesta a punto se abordó mediante un sistema de control activo que actúa sobre el mecanismo de guiado de cada eje. Basándose en la comparación de las velocidades de giro medidas en cada rueda, el sistema es capaz de detectar pequeñas desviaciones en la trayectoria, que son corregidas en tiempo real, actuando sobre la longitud de determinadas barras del mecanismo. De esta forma, se asegura en todo momento el ángulo de ataque cero de las ruedas, minimizando pérdidas, rozamientos y vibraciones no deseadas.

También se mantiene en esencia el sistema de basculación natural incorporado desde finales de los años 70 en el Talgo pendular, aunque el plano de la suspensión secundaria se sitúa a un nivel inferior en los trenes de alta velocidad. Pero la principal diferencia con respecto a las generaciones anteriores de trenes Talgo es el uso de una suspensión primaria (figura 8). De hecho, la optimización del sistema de suspensión en el tren de alta velocidad comenzó con la incorporación de una suspensión primaria en los ejes de las ruedas, además de la suspensión neumática en la parte superior de las columnas. La posible incorporación de un sistema de suspensión activa, capaz de optimizar la seguridad dinámica y el confort de marcha a partir de la información proporcionada por sensores situados a lo largo de todo el tren, se dejó para una fase posterior.

Por último, la figura 9 muestra una vista lateral del tren rodante del nuevo AVRIL, en la que se aprecian las suspensiones primaria y secundaria, así como el mecanismo de guiado.

3. Posibilidades de optimización del contacto rueda-carril

La incorporación del mecanismo de suspensión primaria permite variar la inclinación y el ángulo de ataque de cada rueda de forma independiente:

- El ángulo de caída puede variarse modificando la altura y la rigidez de los apoyos de cada uno de los cuatro muelles. De este modo, se puede diseñar el ángulo de caída más adecua-

do, basándose en un estudio detallado de la distribución de fuerzas y deslizamientos en la superficie de contacto. Esta modificación no es factible en la rodadura tradicional, en la que, obviamente, las ruedas deben montarse perpendiculares al eje común al que están rígidamente unidas.

Una evolución del sistema podría incorporar suspensiones con rigidez y posición ajustables en función, por ejemplo, de las condiciones de carga o de las características del trazado y la vía. Pero también podría plantearse el diseño de un sistema pasivo, donde la estructura sobre la que descansan los muelles de la suspensión primaria ofreciera una rigidez variable y no lineal, y permitiera obtener ángulos de caída óptimos en función de las fuerzas transmitidas a la rueda en cada condición de conducción.

- Del mismo modo, el ángulo de ataque de cada rueda sobre el carril también puede variarse de forma independiente, modificando la posición de los apoyos de los dos tirantes longitudinales situados a ambos lados de la rueda. De este modo, se puede conseguir un pequeño ángulo de convergencia o divergencia entre las ruedas, lo que sería impensable en el caso de los ejes tradicionales.

De nuevo, este ángulo de ataque podría ajustarse en función de las condiciones. Esta posición podría controlarse activamente mediante un sistema de control adecuado. Pero, también en este caso, podría diseñarse un sistema pasivo de geometría variable, basado, como antes, en el diseño detallado de la estructura sobre la que descansan los tirantes, su rigidez y su modo de deformación bajo carga. Se trataría en este caso de utilizar las fuerzas transmitidas en el contacto para variar ligeramente el ángulo de ataque de la rueda en tiempo real en función de las condiciones de trabajo.

Teniendo en cuenta estas posibilidades de variación angular que se abren con la rodadura de ruedas libres guiadas, se ha abierto una línea de investigación para estudiar la influencia de estos parámetros en la distribución de fuerzas y deslizamientos en el contacto. El estudio también debe tener en cuenta la variación debida a las características del trazado (rectas, curvas, transiciones), condiciones de carga y

geometrías de rueda y carril, en sus estados progresivos de desgaste y deformación.

Por un lado, se está trabajando en la aplicación de las teorías clásicas de contacto rueda-carril y su particularización para el caso descrito. Por otro lado, se aborda la modelización detallada del contacto introduciendo otras técnicas numéricas, como el método de elementos finitos, para complementar, comparar y validar resultados.

Los resultados obtenidos se combinarán con modelos de desgaste presentes en la literatura, para finalmente obtener algoritmos que permitan abordar la optimización del desgaste mediante la variación de los parámetros considerados. Y por supuesto, también habrá que analizar las posibles implicaciones de los cambios propuestos sobre el comportamiento dinámico del tren.

El trabajo es objeto de una tesis doctoral, gracias a la colaboración de Patentes Talgo y a la Universidad Miguel Hernández de Elche. Los primeros resultados publicables se esperan para los próximos meses.

4. Conclusiones

Gracias a la incorporación de las tecnologías aquí descritas, y en particular, gracias a su sistema de guiado, los trenes Talgo han demostrado a lo largo de décadas de funcionamiento ser capaces de ofrecer excelentes resultados en términos de desgaste. Pero hay margen de mejora. Y la vía de rueda libre guiada ofrece una libertad de diseño y unas posibilidades de optimización que no serían posibles con los trenes de rodadura convencional.

Como resultado de los trabajos de investigación que se han iniciado, se espera estar en condiciones de abordar una optimización del contacto rueda-carril en estos trenes, que redunde en una mejora aún mayor del desgaste. Y las mejoras que puedan proponerse, basadas en la optimización de la distribución de la presión y la minimización del deslizamiento de los contactos, deberían, a priori, tener también un efecto beneficioso en la reducción del ruido de rodadura, lo que podrá ser también objeto de un análisis detallado en futuros trabajos.

Bibliografía

A. Rovira, A. Roda, M.B. Marshall, H. Brunskill, R. Lewis. Experimental and

numerical modelling of wheel-rail contact and wear. *Wear* 271 (2011) 911-924

Goicoechea Omar, A.: Sistema de articulación ligera combinada para organización de trenes en rutas guiadas. Patente nº ES151396A1. Oficina Española de Patentes y Marcas. (1941).

Goicoechea Omar, A.: Mejoras en los sistemas ferroviarios de articulación ligera combinada. Patente nº ES159301A1. Oficina Española de Patentes y Marcas. (1942).

Investigación y Aseguramiento Técnica S.A., Nardiz Landa, J.I. et al.: Suspensión de tipo primario para vehículos ferroviarios. Patente nº ES2061354A2. Oficina Española de Patentes y Marcas. (1994).

J. Carballeira, L. Baeza, A. Rovira, E. García. Technical characteristics and dynamic modelling of Talgo trains. *Vehicle System Dynamics* 46-Supplement (2008) 301-316

J.J. Kalker. Wheel-rail rolling contact theory. *Wear*, 144 (1991), 243-261

Patentes Talgo S.A.: Sistema guiado de pares de ruedas. Patente nº ES200131A1. Oficina Española de Patentes y Marcas. (1951).

Patentes Talgo S.A.: Rodadura guiada para vehículos ferroviarios. Patente nº ES206t362A1. Oficina Española de Patentes y Marcas. (1952).

Patentes Talgo S.A., López Gómez, J.L. et al.: Sistema para optimizar el guiado de ejes ferroviarios. Patente nº ES2195756A1. Oficina Española de Patentes y Marcas. (2001).

Patentes Talgo S.A., López Gómez, J.L.: Método para optimizar el guiado de vehículos ferroviarios. Patente nº ES2316220A1. Oficina Española de Patentes y Marcas. (2006).

Talgo S.A.: Vehículos ferroviarios articulados formados de elementos ligeros, cortos, bajos, sobre ruedas independientes, con rodadura guiada por tracción triangular. Patente nº ES163239A1. Oficina Española de Patentes y Marcas. (1943).

Miguel Sánchez Lozano. Universidad Miguel Hernández de Elche.

David Abellán López. Universidad Miguel Hernández de Elche.

Manuel García Troya. Universidad Miguel Hernández de Elche.

José Carlos Miguel de Priego. Patentes Talgo SLU.

José Luis López Gómez. Patentes Talgo SLU. Profesor del Máster en Sistemas Ferroviarios y Tracción Eléctrica de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).



INDUSTRIAL
POWERISE®

POWER MEETS CONTROL

INDUSTRIAL POWERISE® : LA NUEVA CLASE DE ACCIONAMIENTOS ELECTROMECAÑICOS

- Diseño estilizado, funcionamiento silencioso y sin necesidad de mantenimiento
- Posibilidad de combinación única con muelles de gas
- Ingeniería de aplicaciones para una adaptación personalizada
- Millones de piezas de experiencia en la industria del automóvil



ESCANEE EL
CÓDIGO PARA
MÁS
INFORMACIÓN:



STABILUS

YOUR MOTION. OUR SOLUTION.

Stabilus GmbH · industrial.powerise@stabilus.com · www.stabilus.com

Francisco José González Roberto

Ingeniero eléctrico y mecánico, jefe de Sostenibilidad y responsable del Proceso de Gestión de la Energía del Grupo Renfe, y presidente de la Asociación de los Amigos del Ferrocarril de Collado Villalba

“Nuestra asociación quiere poner en marcha un proyecto de Museo de Tecnología Ferroviaria, con un concepto museístico abierto y participativo”

Mónica Ramírez

Corría el año 2009 cuando un grupo de amigos, con una afición común, el ferrocarril, decidieron asociarse, con el fin de “dar rienda” a este hobby, y constituyeron la Asociación de Amigos del Ferrocarril de Collado Villalba, en Madrid. Desde entonces, ese grupo de amigos ha ido creciendo, y cada vez somos más los interesados en el tema ferroviario. Francisco José González, ingeniero eléctrico y mecánico, es el presidente de la Asociación, que en la actualidad está inmersa en un proyecto realmente ilusionante, a la par que interesante, como es la puesta en marcha de un Museo de Tecnología Ferroviaria.

Como presidente de la Asociación de Amigos del Ferrocarril de Collado Villalba, ¿qué podría contarnos sobre sus principales fines y objetivos?

La Asociación de Amigos del Ferrocarril de Collado Villalba es una entidad sin ánimo de lucro, que tiene como fines la promoción, la divulgación y la preservación de todo lo relacionado con el ferrocarril, y que se encuentra inscrita en el registro de asociaciones de la Comunidad de Madrid.

Nuestra asociación está adherida, mediante acuerdo de formalización de intenciones, al Sistema de Centros Asociados al Programa de Puesta en Valor del Patrimonio Histórico Cultural Ferroviario, que gestiona la Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE), y dentro del cual se quiere poner en marcha un proyecto de Museo de Tecnología Ferroviaria.

¿Qué valor diferencial puede aportar dicha asociación?

Somos una asociación que ha parti-



Francisco José González.

“Para ello, contamos con el asesoramiento de expertos en museística”

cipado activamente en la regulación del proceso de liberalización del sector ferroviario, en lo que respecta a la circulación de los trenes históricos y turísticos, presentando alegaciones, entre otros, al borrador del nuevo proyecto de Ley del Sector Ferroviario, y poniendo en circulación el tren histórico del 130 aniversario entre Villalba y Segovia.

Incluso, algunos de nosotros, propusimos a Renfe la creación de “RENFE Histórica”, como herramienta de puesta en valor de la aportación de nuestra empresa pública

ferroviaria al desarrollo e integración territorial y económica de nuestro país, puesto que es el único operador que en la actualidad puede tener esta consideración.

Como nos comentaba, uno de los proyectos que tienen actualmente en mente es poner en marcha el futuro Museo de Tecnología Ferroviaria de Collado Villalba, ¿en qué consiste este proyecto?

Se trata de un museo de tecnología ferroviaria integrador, tanto en lo temporal, abarcando desde el pasado histórico del ferrocarril hasta el presente, las nuevas tendencias y la innovación futura, como en lo personal, donde además pretende ser un lugar de encuentro de las distintas capacidades existentes.

Para ello, contamos con la participación tanto de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles como de la Fundación ONCE, y estamos buscando, a través de IN-MOVE Railgrup, la participación de las principales empresas ferroviarias y tecnológicas que puedan aportar valor al proyecto.

Se trata de un concepto museístico abierto y participativo, que busca nuevas formas de interacción que permitan el disfrute del patrimonio, la experiencia del usuario y recordar las vivencias del ferrocarril. Para esto contamos con el asesoramiento de expertos en museística, que han desarrollado numerosos proyectos.

¿En qué punto se encuentra en estos momentos?

En la actualidad, estamos renovando los convenios de colaboración, que firmamos hace unos años, con la Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE) y la Fundación ONCE, y

abriendo un proceso de diálogo con el Ayuntamiento de Collado Villalba para concretar la cesión.

“La Fundación de Ferrocarriles Españoles y la Fundación ONCE también participan”

¿Con qué apoyos y ayudas cuentan para llevarlo a cabo?

Además de estos convenios, en la actualidad estamos trabajando conjuntamente, con IN-MOVE by Railgrup, en la formalización de un “acuerdo de intenciones”, para la creación de este Museo de Tecnología Ferroviaria, y la búsqueda de socios que aporten valor al mismo, así como de posibles fuentes de financiación que permitan realizarlo.

Su trayectoria profesional se ha desarrollado fundamentalmente en el Grupo Renfe, ¿cómo fueron sus comienzos en la compañía?

Mi ingreso en la antigua Renfe fue como Factor Autorizado para Circulación, a través de una convocatoria de empleo público, y durante los primeros años, mi desempeño profesional me permitió conocer la operación, explotación y gestión ferroviaria en toda su amplitud.

En una segunda etapa pasé, como profesor, a la Dirección de Formación y Selección, dedicándome al diseño e impartición de cursos en las áreas de Gestión de Calidad y de Recursos Humanos.

A continuación, me incorporé al Servicio de Prevención de Riesgos Laborales y, como responsable de la Secretaría Técnica del Comité General, coordiné la implantación de los Procedimientos de Gestión de la Prevención de nuestra empresa, así como las primeras auditorías.

Seguidamente, como responsable de Eficiencia Energética, en la Dirección General de Fabricación y Mantenimiento, coordiné, dentro del Plan de Activación de la Eficiencia Energética en los edificios de la Ad-

ministración General del Estado, las auditorías energéticas desarrolladas en las 18 Bases de Mantenimiento incluidas en el mismo, así como los primeros proyectos de ahorro y eficiencia energética con ayudas del IDAE.

Posteriormente, ya en la Entidad Pública Empresarial Renfe, participé en diversos proyectos destinados a la mejora de la eficiencia y gestión energética en los trenes, tanto de tracción eléctrica como diésel, conducción eficiente, freno regenerativo, etc., y coordiné, con el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), la participación de Renfe en el proyecto de actualización del mapa de ruidos ferroviarios, en aplicación de la nueva metodología CNOS-SOS-EU, y la modelización acústica de las infraestructuras y material móvil ferroviario.

Desde febrero de 2020 es responsable del Proceso de Gestión de la Energía, ¿qué proyectos destacaría de los que se han llevado a cabo y los que se están realizando en la actualidad en esta materia?

Como responsable de este proceso, he participado en el Plan de Mejora de la Gestión y Eficiencia Energética, y del Sistema de Conducción Eficien-

“He coordinado la auditoría de la energía de tracción, eléctrica y diésel, del material del Grupo Renfe”

te Automática, desarrollado en 90 de nuestros trenes de Alta Velocidad.

También participo, como vocal en representación del Grupo Renfe, en las actividades de la Asociación de Grandes Consumidores de Energía Eléctrica del Sector Servicios (GRANCEESS).

Recientemente, he coordinado la auditoría de la energía de tracción, tanto eléctrica como diésel, del material del Grupo Renfe, y estoy finali-

zando la de la energía de uso distinto de tracción de nuestras bases de mantenimiento, estaciones de Cercanías, y de Ancho Métrico, así como las oficinas que gestionamos en todo el territorio peninsular.

¿Y sobre los próximos proyectos?

Actualmente estamos valorando el desarrollo de proyectos piloto para el uso de combustibles renovables, en el material de tracción diésel, que nos permitiría prácticamente eliminar las emisiones de este tipo de trenes, o la implantación de un sistema de ayuda al maquinista, para mejorar la eficiencia energética y la puntualidad del transporte ferroviario, en el material que no disponga de sistemas de conducción eficiente automática.

Aparte de los conocimientos adquiridos, ¿qué valor añadido considera que aportan los ingenieros de la rama industrial en este tipo de proyectos?

En mi opinión, los ingenieros de la rama industrial tienen una formación muy adecuada a este tipo de proyectos, lo que, unido a su profesionalidad y compromiso, hace que puedan desarrollar una gran labor en el sector ferroviario.

Como colegiado en el COGITIM, ¿participa en las actividades que desarrolla el Colegio?

Con independencia de la asistencia a determinados eventos o jornadas organizadas por el Colegio, intento colaborar cuando me es posible en temas concretos, como es el caso de mi participación, estos últimos años, en el jurado que otorga los premios a los mejores Trabajos de Fin de Grado (TFG) de las universidades de la Comunidad de Madrid.

“Los ingenieros de la rama industrial tienen una formación muy adecuada a este tipo de proyectos”

Neoballast: nuevo árido sostenible de altas prestaciones y durabilidad extendida para balasto

Neoballast es un nuevo balasto duradero y de alto rendimiento para infraestructuras ferroviarias sostenibles, creado a partir de un proyecto europeo cofinanciado por la Comisión Europea bajo el programa H2020 Fast Track to Innovation.

Miquel Morata Royes y
Valentí Fontserè Pujol

Introducción

Neoballast es una solución innovadora y sostenible para balasto ferroviario de altas prestaciones y durabilidad extendida. Consiste en áridos de balasto recubiertos por un ligante avanzado y por polvo de caucho procedente de neumáticos de vehículos fuera de uso (ver figura 1).

Neoballast ofrece unas importantes mejoras mecánicas respecto al balasto convencional, que consisten en una mayor resistencia a la abrasión, una menor necesidad de mantenimiento y una mayor vida útil, manteniendo la misma puesta en obra y permeabilidad que el balasto convencional.

Por otro lado, Neoballast ofrece una serie de ventajas medioambientales, consistentes en el reciclaje de neumáticos fuera de uso, una menor necesidad de extracción de áridos de cantera y una reducción del ruido y las vibraciones.

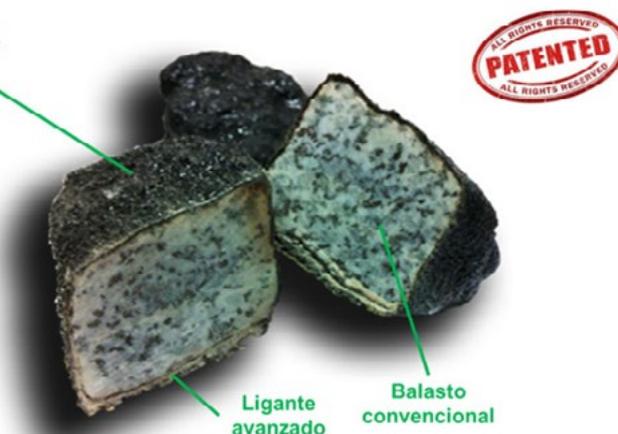
Pruebas de laboratorio realizadas

Se han llevado a cabo distintas pruebas de laboratorio para caracterizar el material, entre las cuales destacan los ensayos dinámicos realizados en el laboratorio de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada (ver figura 2).

Las conclusiones de los ensayos fueron las siguientes:

- 20% de reducción de la rigidez en comparación con el balasto natural.
- 70% más de resistencia a la abrasión (menos fragmentación) que el balasto natural.
- 54% más de energía disipada que el balasto natural.
- 25% menos de tensión bajo la capa de balasto, debido a una mayor superficie de contacto, que el balasto natural.
- Posibilidad de reducir el espesor de la capa de balasto entre 5 y 8 cm, especialmente útil en tramos de gálibo limi-

Recubrimiento
de polvo de
Neumático
Fuera de Uso
(NFU)



Ligante
avanzado

Balasto
convencional

Figura 1. Composición del Neoballast.

tado (por ejemplo, túneles antiguos de poca altura).

- Mismo rendimiento que el balasto natural con manta bajo balasto.

Pruebas de campo realizadas

Tramo de pruebas en ADIF

Se ha realizado un tramo de pruebas en una línea de tráfico mixto convencional de ADIF entre Caldes de Malavella y Maçanet-Massanes, cerca de Barcelona, con el objetivo de demostrar el comportamiento del Neoballast en condiciones reales, y comparar sus prestaciones con las del balasto convencional.

La línea tiene un tráfico medio de 468 trenes a la semana, de los cuales el 80% son trenes de pasajeros, el 19% trenes de mercancías y el 1% vehículos de mantenimiento ferroviario. El tramo está situado junto a un paso a nivel con una limitación de velocidad de 120 km/h.

Se llevó a cabo una monitorización en tiempo real de ruido, vibraciones y tensiones bajo balasto como medida indirecta de la degradación del balasto. Asimismo, se realizaron levantamientos topográficos periódicos para medir la evolución del asiento de la vía a lo largo del tiempo. Se obtuvieron datos tanto en el tramo de

control (balasto convencional) como en el tramo de Neoballast.

Los principales resultados obtenidos son los siguientes:

- Neoballast reduce las vibraciones globalmente en 6 dB. Es decir, presenta mayor atenuación a mayor velocidad.
- El balasto convencional presenta una mayor degradación frente a un comportamiento constante de Neoballast.
- El asiento del Neoballast es mayor al principio, pero converge más rápidamente.

Prueba de campo en el metro de Barcelona

Se ha realizado una segunda prueba a escala real durante el primer semestre de 2020 en el metro de Barcelona, España. Se instaló un tramo de Neoballast de 40 metros de longitud en la vía 2 de la línea L5 del metro de Barcelona, entre Diagonal y Hospital Clinic.

El objetivo de la prueba fue determinar experimentalmente el comportamiento vibratorio a largo plazo del tramo de Neoballast (vía 2, lado izquierdo en figura 4), comparativamente con el tramo de balasto convencional (vía 1, lado derecho en figura 4) en condiciones de explotación comer-



Figura 2. Ensayos realizados en el Laboratorio de la Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Granada.



Figura 3. Tramo de pruebas de Neoballast en línea de ADIF entre Caldes y Maçanet Massanes.



Figura 4. Tramo de pruebas de Neoballast en la L5 del metro de Barcelona.

cial de la infraestructura ferroviaria, esto es 45 Km/h para la vía 2 (Neoballast) y 40 Km/h para la vía 1 (balasto convencional).

Se registraron mediante acelerómetros los niveles de vibraciones en la traviesa, el carril y el hastial del túnel de las dos vías. Además, en la calle sobre el túnel del metro, se colocaron dos sensores en ambas aceras cerca de la fachada del edificio.

Para obtener resultados representati-

vos, se analizaron más de cincuenta circunvalaciones en el interior del túnel, mientras que en la calle se analizaron más de veinticinco medidas por cada punto de medición. De este modo, se determinó el nivel de paso individual de los trenes, así como la media de todos los datos. A partir de los datos obtenidos, se pudo calcular la reducción de los niveles de vibración comparando las lecturas del Neoballast con

las del balasto convencional.

Los principales resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Neoballast reduce el nivel de vibraciones en el hastial del túnel en 5 dB con respecto al balasto convencional.
- Los niveles de vibración en la calle encima del tramo de Neoballast aumentan más lentamente que sobre el tramo de balasto convencional, indicando una menor degradación de Neoballast.
- El asiento es muy limitado, tanto en la sección de Neoballast como en la de balasto convencional.

Conclusiones

Neoballast es una nueva solución sostenible para el balasto compuesto por áridos de balasto convencionales recubiertos con un ligante avanzado y polvo de caucho, procedente de neumáticos de vehículos al final de su vida útil. Este nuevo material presenta varias ventajas técnicas, medioambientales y económicas, como una menor degradación, una mejor disipación de la energía y distribución de la carga, un mejor comportamiento en términos de ruido y vibraciones, una menor necesidad de extracción de áridos de las canteras, el reciclado de neumáticos de vehículos al final de su vida útil y una menor necesidad de mantenimiento, lo que conlleva a una reducción global de los costes del ciclo de vida.

Neoballast permite la posibilidad de utilizar áridos reciclados y de baja calidad, ya que mejora las prestaciones de dicho árido gracias a su recubrimiento. Es una solución ideal para túneles ferroviarios con gálibo limitado, zonas urbanas con problemas de ruido y vibraciones, zonas de gran rigidez de vía o zonas de transición, así como zonas geográficas con escasez de balasto de alta calidad, entre otras aplicaciones.

Referencias

- M. Letcher, T et al. (2021). 16. Construction: acoustic insulation in buildings and railway applications. Tire waste and recycling. Academic Press, Elsevier Inc.
- Proyecto Neoballast (2021): Balasto de alto rendimiento y larga duración para infraestructuras ferroviarias sostenibles.

Miquel Morata Royes y Valentí Fontserè Pujol. Área Técnica y de Innovación de COMSA. Profesores del Máster en Sistemas Ferroviarios y Tracción Eléctrica de la UPC.

Application of automatic classifiers for condition monitoring of railway rolling stock

Aplicación de clasificadores automáticos a la monitorización de la condición de funcionamiento de material rodante ferroviario

E. Ruiz Torres¹, A. Bustos Caballero², H. Rubio Alonso³, C. Castejón Sisamón⁴

Abstract

The evolution of technology towards the automation of industrial processes and the advances in interconnectivity have given way to what is known today as industry 4.0. These advances are of particular interest in the area of predictive maintenance of machines, where machine learning techniques have considerably improved condition diagnosis of machinery. This is of special importance in the railway industry, where maintenance constitutes an important part of its operating costs. This paper studies the application of machine learning techniques to vibration signals originating from a railway axle, tested on a railway test bench, through support vector machine algorithms for fault detection. A feature selection scheme composed of a series of sensitivity analyses is proposed in order to determine the best signal features for classification. The subsequent hyperparameter optimization proposed consists of a series of sensitivity analyses in order to determine the values of each parameter that result in a classifier with the most accuracy. Lastly, the effect of the location of the sensors in the axle from which the vibration signals are obtained is studied in order to determine their most apt configuration.

Keywords

Support vector machine, condition monitoring, vibrations, railway systems.

Resumen

La evolución tecnológica hacia la automatización de procesos industriales y los avances en la interconectividad han dado lugar a lo que conocemos como Industria 4.0. Un área particularmente beneficiada por estos avances tecnológicos es el mantenimiento predictivo de máquinas, donde la implementación de técnicas de aprendizaje automático ha mejorado considerablemente el diagnóstico de la condición de las mismas. Esto es especialmente sensible en el sector ferroviario, donde el mantenimiento constituye una parte importante de los costes de operación. En el presente trabajo se estudiará la aplicación de técnicas de aprendizaje automático a señales vibratorias procedentes de un eje ferroviario testeado en un banco de ensayos mediante algoritmos de máquinas de soporte vectorial para la detección de fallos. Con el propósito de obtener un clasificador preciso, se propone una selección de cualidades que consiste en una serie de análisis de sensibilidad con el propósito de determinar las mejores cualidades para la clasificación. La posterior optimización de hiperparámetros propuesta se constituye por una serie de análisis de sensibilidad, para determinar los valores de cada parámetro del clasificador que generan clasificadores con mayor precisión. Por último, se estudiará el efecto de la localización de los sensores de los que provienen las señales vibratorias para determinar su configuración más adecuada.

Palabras clave

Máquina de soporte vectorial, monitorización de la condición, vibraciones, sistemas ferroviarios.

Recibido/received: 01/06/2023 Aceptado/accepted: 10/10/2023

1Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid.

2Dpto. de Mecánica. Universidad Nacional de Educación a Distancia.

3Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid.

4Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid.

Corresponding author: Enrique Ruiz Torres; e-mail: enruizt@ing.uc3m.es



Foto: Shutterstock.

1. Introduction

The connectivity of today's world penetrates all aspects of society where efficiency and the handling of data are of importance. This trend has manifested itself on an industrial level as the well-known industry 4.0, which is characterized by the automation of not only physical processes, but of intellectual processes as well, through the processing of large quantities of data (big data). Machine learning presents itself as a useful tool in the processing of this data. In line with this trend, predictive maintenance measures have been implemented through automatic classifiers capable of establishing condition monitoring systems of machinery in an efficient manner (Lee et al., 2014).

The railway sector stands out as an area of industry with potential to greatly benefit from these advances. Maintenance of railway infrastructure and rolling stock accounts for a

significant part of its operating costs. Predictive maintenance using machine learning methods arises as a natural solution for the reduction of costs when the tendency of technological evolution of the sector and the recent advances in machine learning are considered (Bustos et al., 2021).

In consequence, the main objective of this work is the application of machine learning techniques for fault detection in railway rolling stock. In particular, Support Vector Machine (SVM) (Cortes & Vapnik, 1995) algorithms are used for the classification of vibration signals coming from a bogie test bench (Bustos et al., 2019) with defects of varying severity. These machine learning algorithms are based on the separation of observations in a space of high dimension using a hyperplane, with reasonable computational cost thanks to functions commonly referred to as kernels. SVMs are, fundamentally,

binary classifiers, although multi-class classification can be achieved through codification techniques (Cristianini, 2000). SVMs have been shown to give good results in bearing fault detection through the classification of vibration signals (Rubio Alonso, s. f.; Sun & Liu, 2023).

In order to apply these techniques to vibration signals a previous signal feature selection must be performed in order to select the features that properly describe the condition of rolling stock. With this purpose in mind, a series of 21 signal features are proposed in time and frequency domain, and various classifiers are compared in order to determine the most apt features for classification. Then, the hyperparameters of the SVM are tuned in order to determine their values that are better suited for the classification of the selected features. A classification model and a set of signal features capable of fault

detection in railway axles is meant to be obtained as a result of the previous procedures. Finally, the effect of the position of the sensors on the axle on classification is studied in order to determine its effect in the validity of the results.

2. Methodology

2.1. Experimental setup

The vibration signals utilized come from a mechanical system which consists of a bogie test bench where a Y-21 Cse model bogie is mounted on two pairs of rollers. Hydraulic cylinders are used to activate the loading mechanism by means of a chain. The measurement system consists of three accelerometers mounted on each side of the axle box: One for the vertical direction, one for the axial direction and one for the direction of movement as can be seen in figure 1.

The axle defects are induced through radial machining at the centre of the axle. Four defect levels are defined ranging from no defect to a depth of 15 mm as can be seen in table 1.

The experimental tests consisted of rolling the front bogie wheels on the two rollers of the test bench, which dragged the wheels forward through friction (figure 1). The tests were carried out on the same bogie under similar operating conditions: at a speed of 50 km/h and an external load of 10 metric tons. The tests began with a healthy axle and the rest of the defect levels proposed in table 1 were progressively induced. The vibration signals were obtained sequentially during the course of each test.

2.2. Signal acquisition

The vibration signals used correspond to the acceleration signals obtained by the vertical accelerometers located on the axle boxes of the left and right-hand

Class	Depth (mm)
Healthy axle	0
Defect 1	5.7
Defect 2	10.9
Defect 3	15

Table 1. Depth of defects

side of the front axle (fig. 1). Signals were recorded at a sampling rate of 12,800 Hz, up to a total of 16,384 samples (2^{14}), resulting in an acquisition time of 1.28 seconds. In this study, a total of 592 vibration records (9.7 million samples) were used, which include the four defect levels and the two sides of the axle:

- 136 signals from the healthy axle (half on the right-hand side and the other half on the left-hand side).
- 104 signals with defect 1 (half on the right-hand side and the other half on the left-hand side).
- 144 signals with defect 2 (half on the right-hand side and the other half on the left-hand side).
- 208 signals with defect 3 (half on the right-hand side and the other half on the left-hand side).

2.3. Classifier tests

The accuracy of a classifier fundamentally depends on the ability of the input data to differentiate between the different classes. When considering fault detection through stationary vibration signals, statistical measures are commonly used as signal features, treating the signals as random variables (Randall, 2011). In this study, these measures are made up of a series of 13 statistical parameters, obtained from the vibration signals and the frequency spectrum, whose detailed descriptions are laid out in table 2.

For the frequency domain features, the power spectral density (PSD) spectrum is used. In addition, features of the spectral kurtosis spectrum are evaluated; a tool that allows for the filtering of regions with Gaussian noise, facilitating the

detection of parts of the signal with relevant information (Antoni, 2006). The spectral kurtosis spectrum has been shown to give good results in fault detection using vibration signals due to its ability to separate noise from characteristic impulses of faults in rotary machines (Antoni & Randall, 2006). In total, 21 features are considered (12 in time domain, 5 from the PSD spectrum and 3 from the spectral kurtosis spectrum).

Once the features are defined, a sensitivity analysis is carried out to evaluate their aptitude in classification. This analysis consists of training several classifiers with each feature individually and varying their hyperparameters to take their effect into account. The purpose is to obtain a measure of the aptitude of each individual feature independent of the parameters of the final classifier. The sensitivity analyses are carried out with four hyperparameters and four kernels, whose range of values studied can be seen in table 3.

In order to identify the hyperparameters that generate classifiers with high accuracy, a subsequent hyperparameter study is carried out. This study consists of a series of sensitivity analyses, similar to those carried out for the feature selection, according to table 3, with the distinction of using a classifier trained with all the previously selected features.

2.4. Study of sensor position

The location of the measurement sensor on the axle affects the vibration signals obtained and, therefore, it also affects the values of

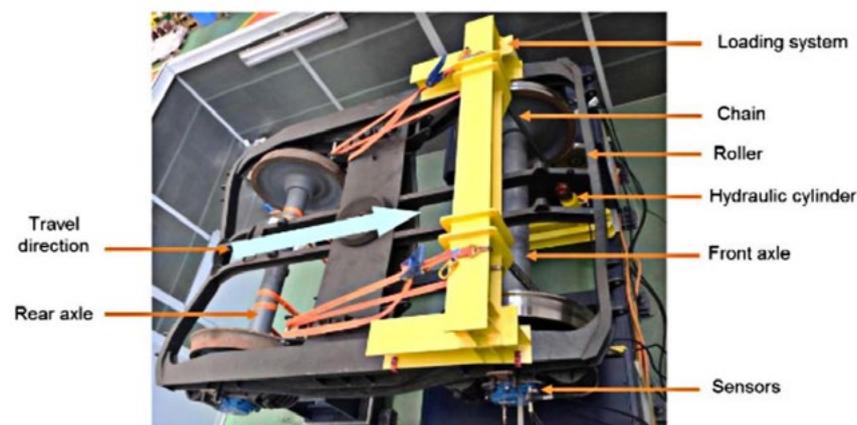


Figure 1: Bogie test bench configuration and measurement system.

its features. In order to identify the significance of this effect, a study of sensor location is carried out. To perform this study, the analyses described in the previous section are carried out concurrently both for signals taken from the left side of the axis (LHS signal set) and from the right side (RHS signal set).

In addition, the possibility of combining the signals in two different configurations is considered:

1. Mixed sides (MS signal set): a combination of signals from the left and right-hand side of the axle is used, without any feature that directly identifies them as such.
2. Identified mixed sides (IMS signal set): a combination of signals from the left and right-hand side of the axle is used, incorporating the sensor from which each signal comes from (LHS or RHS) as an additional feature.

This last study is carried out during the tuning of hyperparameters, meaning that the classifiers trained on these last two signal sets use the same features for classification as the classifiers trained with the signals from the LHS and RHS signal sets.

3. Results

Once the vibration signals have been obtained and after the necessary feature extraction has been performed, the classifier tests are carried out. The feature extraction and the implementation of the SVM algorithm are implemented in the commercial program Matlab, using its Classification Learner application from the Statistics and Machine Learning Toolbox.

3.1. Feature selection

The sensitivity analysis for the feature selection is repeated for four hyperparameters and four kernels, resulting in 16 accuracy values for each feature studied. Although absolute variation in accuracy is observed among different tests, no significant variation is seen for the relative values between features with equal hyperparameters. That is, the different analyses gave rise to the same set of selected features.

For simplicity, and due to the similarity of results, the analysis with varying box constraint is discussed as

Feature	Domain	Definition
Peak value	Time, PSD and spectral kurtosis	$x_p = \max(x(t))$
Mean value	Time, PSD and spectral kurtosis	$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)$
Peak to peak value	Time, PSD and spectral kurtosis	$x_{pp} = \max(x(t)) - \min(x(t))$
RMS	Time and PSD	$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)^2}$
Crest factor	Time	$CF = \frac{\max(x)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)^2}}$
Variance	Time	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2$
Standard deviation	Time	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2}$
Impulse factor	Time	$IF = \frac{\max(x)}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) }$
Margin factor	Time	$MF = \frac{\max(x)}{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \right)^2}$
Form factor	Time	$FF = \frac{RMS}{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \right)^2}$
Liquidation factor	Time	$LF = \frac{\max(x)}{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \right)^2}$
Skewness	Time	$Skewness = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^3}{\sigma^3}$
Kurtosis	Time	$Kurtosis = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^4}{\sigma^4}$

Table 2. Description of the features studied

Hyperparameter	Studied Values
Codification	One vs all, one vs one, all pairs, binary complete
Box constraint	$10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 1, 10^1, 10^2$ y 10^3
Kernel scale	$10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 1, 10^1, 10^2$ y 10^3
Cross validation K-fold	5, 10, 20, 25, 30, 40 y 50
Kernel	Linear, quadratic, cubic, Gaussian

Table 3. Description of the sensitivity analyses

it is the most representative case. The conclusions obtained can, however, be extrapolated to the rest of the analyses. This test was carried out with a kernel scale value of 1, one vs. one codification and cross validation with a k-fold value of 5. The results presented in tables 4 and 5 correspond to the average accuracy of the four kernels studied for the LHS and RHS sets respectively.

In tables 4 and 5 it can be seen that the features associated with the PSD are considerably better performant for classification than the rest of the features, corroborating the results

obtained in previous studies (Bustos et al., 2019). Among the features of the PSD, the RMS value stands out, which achieves maximum accuracy in all cases. Taking the high range of hyperparameters studied into account, it is considered appropriate to conclude that the RMS value of the PSD will be highly significant, regardless of the hyperparameters of the final classifier.

Among the time domain features, the following stand out: the RMS value, the variance and standard deviation, and the skewness. It is possible that the high performance of the RMS value is associated with

BC	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰	10 ¹	10 ²	10 ³
Peak value	38.01 %	53.38 %	63.26 %	62.92 %	62.84 %	63.01 %	62.58 %
Mean value	38.18 %	45.52 %	49.32 %	49.32 %	48.82 %	48.56 %	48.56 %
RMS Value	39.86 %	56.67 %	67.40 %	67.15 %	67.91 %	68.58 %	68.75 %
Peak to peak value	38.51 %	58.11 %	66.05 %	65.88 %	66.30 %	65.79 %	65.88 %
Crest factor	36.40 %	43.50 %	49.32 %	50.00 %	49.75 %	49.92 %	48.14 %
Variance	40.03 %	56.50 %	67.82 %	68.33 %	67.82 %	68.33 %	68.07 %
Standard deviation	39.53 %	56.59 %	66.89 %	68.24 %	68.33 %	68.75 %	68.24 %
Impulse factor	36.57 %	44.26 %	50.76 %	51.01 %	50.76 %	50.42 %	50.25 %
Margin factor	36.74 %	44.76 %	51.69 %	51.69 %	51.35 %	51.44 %	50.59 %
Form factor	40.20 %	55.07 %	57.43 %	57.60 %	56.76 %	58.02 %	58.28 %
Liquidation factor	37.67 %	49.58 %	55.91 %	56.17 %	56.33 %	56.17 %	56.42 %
Skewness	35.81 %	42.15 %	48.56 %	49.16 %	48.40 %	48.56 %	48.56 %
Kurtosis	40.63 %	54.90 %	54.56 %	54.48 %	55.57 %	55.41 %	56.17 %
Power	39.95 %	56.25 %	67.40 %	67.74 %	69.09 %	68.75 %	68.75 %
PSD RMS value	42.99 %	73.23 %	85.22 %	85.05 %	85.30 %	85.39 %	85.05 %
PSD peak to peak value	40.88 %	65.12 %	75.00 %	75.42 %	76.01 %	75.51 %	75.51 %
PSD peak value	40.96 %	65.03 %	75.17 %	76.10 %	76.18 %	75.68 %	76.77 %
Peak value of the envelope	40.71 %	64.78 %	75.17 %	75.34 %	76.35 %	75.84 %	76.44 %
Spectral kurtosis RMS value	36.40 %	44.00 %	53.80 %	53.13 %	53.80 %	53.63 %	53.72 %
Spectral kurtosis mean value	36.66 %	45.19 %	52.53 %	52.87 %	52.53 %	53.13 %	52.45 %
Spectral kurtosis peak value	36.57 %	39.86 %	46.96 %	48.56 %	48.99 %	48.99 %	49.07 %

Table 4. Results for the sensitivity analysis for feature selection using LHS signal set.

the information it provides about the signal power, as it can be seen in tables 4 and 5 by the correlation between the accuracies of the power and the RMS value. The variance and standard deviation also stand out, possibly due to the information they provide about the variability of the signal and, therefore, the interference of the vibrations generated by the fault. The correlation between their values is evident since one is mathematically defined as the square root of the other (table 2). Finally, the skewness value is particularly effective for classifying signals from the RHS set, although it is not significant in the LHS set.

In light of the results analysed above, six features were selected for classification with high accuracy and without correlation between each other:

- Peak value of the time signal.
- RMS value of the time signal.
- Variance of the time signal.
- Skewness of the time signal.
- RMS of the power spectrum.

- Peak value of the power spectrum

3.2. Tuning of Hyperparameters

Similar to the studies carried out for the feature selection, sensitivity analyses are performed for four hyperparameters and four kernels. In this case the classifiers are trained with the set of features previously selected. Additionally, the hyperparameters for the MS and IMS sets are also tuned.

Little variation in accuracy can be seen for different codifications, as can be seen in figure 2. The maximum accuracy is obtained with different kernels, depending on the training set (LHS, RHS, LM or LMI). Their distribution relative to different kernels, however, remains relatively constant between signal sets except in the case of the LHS set, in which an increase in the variability of the quadratic and Gaussian kernels is observed.

Figure 3 shows how the signal accuracies of the LHS and RHS sets vary almost identically with

BC	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰	10 ¹	10 ²	10 ³
Peak value	36.49 %	47.21 %	56.08 %	58.19 %	58.61 %	58.95 %	58.78 %
Mean value	36.40 %	36.40 %	37.42 %	38.51 %	38.26 %	39.02 %	39.02 %
RMS value	40.29 %	63.18 %	76.52 %	76.94 %	76.86 %	77.03 %	77.11 %
Peak to peak value	36.32 %	48.23 %	61.91 %	62.16 %	61.49 %	60.64 %	60.73 %
Crest factor	35.56 %	40.63 %	44.85 %	44.93 %	44.17 %	44.00 %	43.92 %
Variance	40.12 %	63.01 %	76.77 %	76.77 %	76.69 %	76.60 %	77.20 %
Standard deviation	39.95 %	63.09 %	76.60 %	76.77 %	76.94 %	77.03 %	77.03 %
Impulse factor	35.81 %	41.13 %	46.37 %	45.19 %	45.44 %	45.02 %	45.10 %
Margin factor	35.81 %	41.30 %	46.28 %	44.59 %	44.59 %	44.09 %	44.51 %
Form factor	36.32 %	41.05 %	44.85 %	45.35 %	45.02 %	45.27 %	44.85 %
Liquidation factor	35.39 %	39.44 %	46.03 %	46.71 %	45.95 %	47.55 %	46.45 %
Skewness	38.26 %	63.77 %	81.50 %	81.50 %	81.93 %	81.93 %	81.93 %
Kurtosis	37.84 %	48.56 %	55.91 %	56.93 %	56.17 %	55.24 %	56.00 %
Power	40.12 %	63.68 %	76.52 %	77.03 %	76.86 %	77.03 %	77.03 %
PSD RMS value	38.43 %	75.34 %	93.83 %	94.93 %	94.93 %	95.02 %	95.27 %
PSD peak to peak value	36.49 %	71.62 %	88.34 %	88.26 %	88.26 %	88.26 %	87.58 %
PSD peak value	36.40 %	71.79 %	88.43 %	88.34 %	88.18 %	88.18 %	88.01 %
Peak value of the envelope	36.40 %	72.55 %	88.68 %	88.60 %	88.68 %	88.68 %	88.43 %
Spectral kurtosis RMS value	36.23 %	41.64 %	50.25 %	50.17 %	49.75 %	49.58 %	50.42 %
Spectral kurtosis mean value	36.06 %	44.17 %	52.11 %	53.38 %	53.89 %	52.96 %	53.21 %
Spectral kurtosis peak value	35.14 %	37.08 %	41.47 %	42.57 %	42.48 %	42.48 %	41.30 %

Table 5. Results for the sensitivity analysis for feature selection using RHS signal set

the box constraint, reaching higher maximum accuracies in the RHS set. The accuracy of the MS and IMS sets behave similarly, with the IMS set showing marginally higher accuracies.

Figure 3 also shows that small values of the box constraint give comparatively low accuracy values, with the linear and Gaussian kernels being particularly susceptible to this effect. As the box constraint increases, all kernels converge to a similar accuracy value, beginning to converge at a box constraint value of approximately 10⁻² for the quadratic, linear and cubic kernels and a box constraint value of approximately 1 for the Gaussian kernel.

In similarity to the case of the box constraint, figure 4 shows how small values of the kernel scale result in low accuracy values. This behaviour holds for all kernels, except for the linear kernel, which maintains comparatively high accuracy values. It can be seen that the accuracies do not converge, but rather reach a

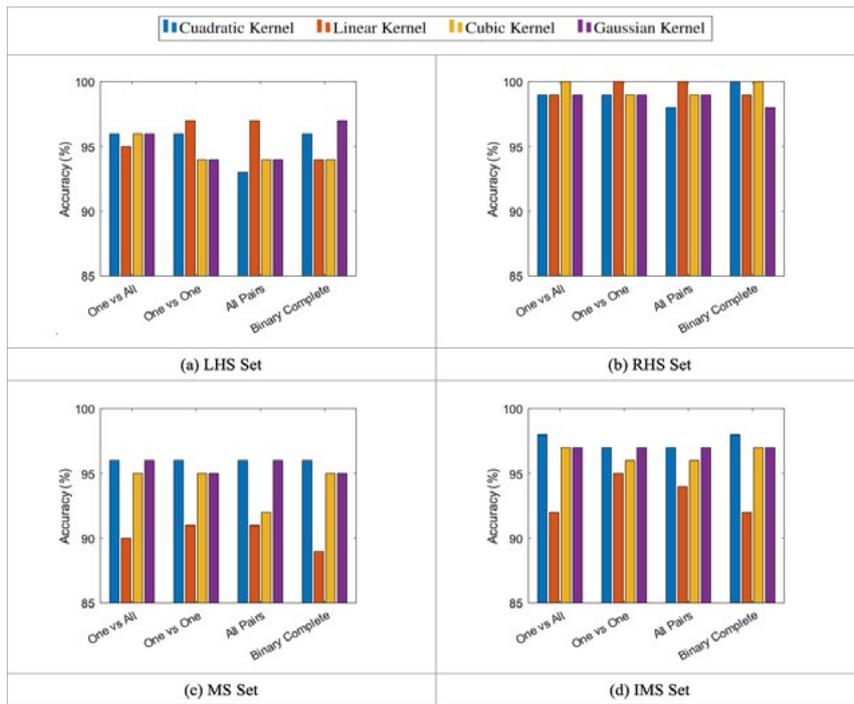


Figure 2. Comparison between sensitivity analyses for codification.

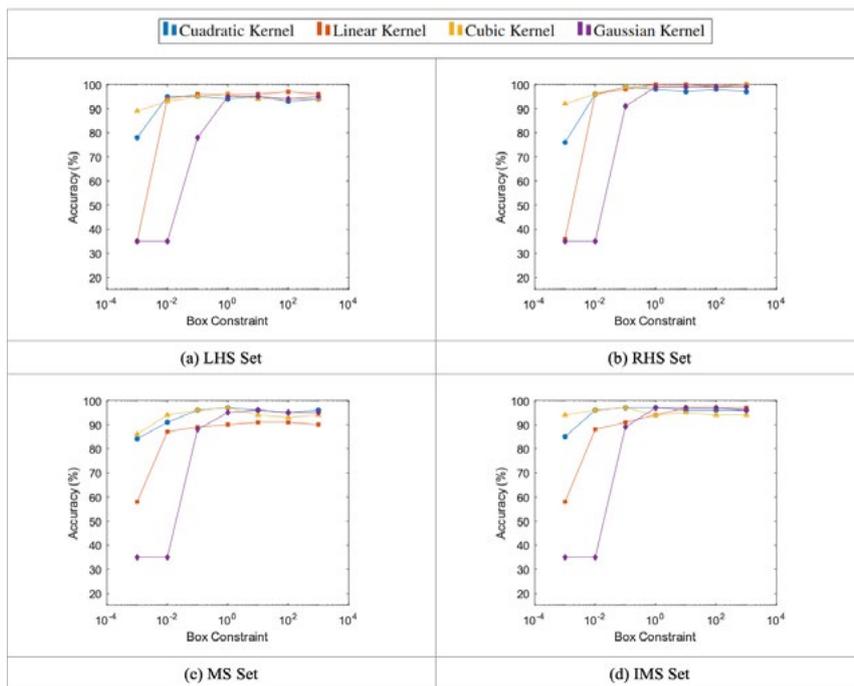


Figure 3. Comparison between sensitivity analyses for box constraint.

maximum with kernel scale values between 1 and 10.

Figure 5 shows how, as with the codification case, there appears to be no significant variation in accuracy values between high and low values of the k-fold. On the other hand, the accuracy remains relatively constant, oscillating around an average value. The quadratic kernel has greater

variability, while the Gaussian kernel is the most constant.

The linear kernel stands out for its high accuracy relative to other kernels in most cases, with the exception of the MS set, in which the lowest accuracies are obtained. The cubic kernel obtains comparatively high accuracy values for the LHS and RHS signal sets, although low accuracy values are

obtained for the MS and IMS signal sets. The quadratic kernel behaves in the opposite way, obtaining low accuracy values for the LHS and RHS signal sets and high accuracy values for the MS and IMS signal sets. The Gaussian kernel, on the other hand, does not vary significantly relative to other kernels. This difference in behaviour between signal sets seems to indicate that the appropriate kernel and hyperparameter values depend on the set of signals used for training, as was the case with the feature selection.

3.3. Study of sensor position

In figure 6, as an illustrative example, confusion matrices for the classifiers corresponding to each sensor configuration are presented and discussed for the case of one vs one coding, box constraint of 100, kernel scale of 1, cross validation with k-fold value of 5 and linear kernel.

Figure 6 shows how the main loss of accuracy for the classifier with the LHS set can be interpreted as the confusion between the healthy axle (ES) and defect 1 (D1) classes. In the case of the RHS set, the loss of accuracy is due to the confusion between defect 2 (D2) and defect 3 (D3). The increase in accuracy could possibly be explained by the high classification ability of the skewness of the time signal for the RHS signal set, as discussed in the feature selection section. The two matrices are mainly diagonal, although the RHS set classifier achieves the highest accuracy. It can be deduced, therefore, that the behaviour of the signals during classification depends on the location of the sensor.

The classifier for the MS signal set has the lowest performance of the four cases. Figure 6 shows how, in addition to the confusion between the healthy axle and defect 1, there is some confusion between defect 2 and defect 3. A possible explanation for the decrease in accuracy is that the combination of the LHS and RHS sets gives rise to a set of signals without a clear distinction between classes, possibly due to the differences between the separation of classes of the LHS and RHS sets previously discussed.

Lastly, figure 6 shows how the IMS signal set classifier behaves almost identically to the LHS

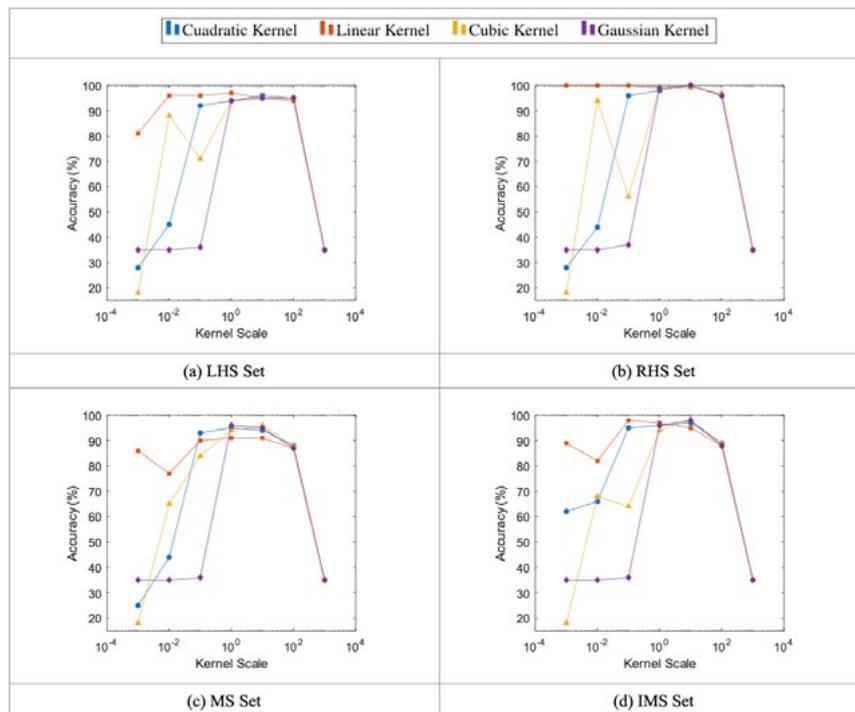


Figure 4. Comparison between sensitivity analyses for Kernel scale.

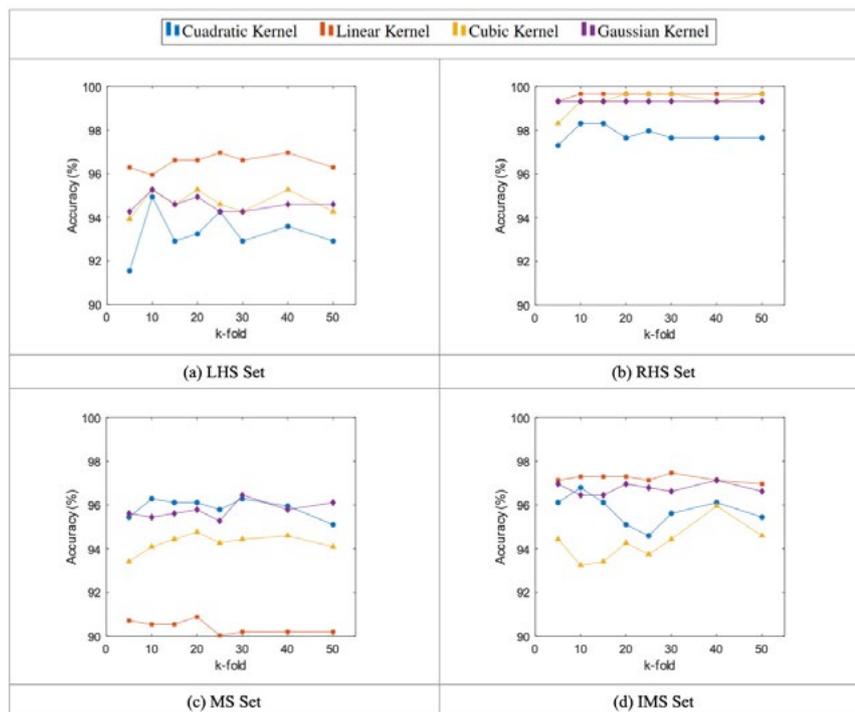


Figure 5. Comparison between sensitivity analyses for cross validation k-fold.

signal set classifier. Again, the main cause of the loss of accuracy is due to the confusion between the healthy axle and defect 1. This seems to indicate that the identification of the signals is effective in eliminating the effect that generates the loss of accuracy in the case of the MS signal set.

4. Conclusions

The main objective of this work was the application of machine learning techniques, through the use of support vector machine algorithms, for the classification of vibration signals for the fault detection in railway rolling stock. For this purpose, several vibration signals were recorded, coming from

a bogie test bench where tests were carried out with healthy axles and with different levels of defects. Once the signals were recorded, a series of sensitivity analyses were carried out to select features and hyperparameters capable of classifying the signals effectively. In light of the results obtained, it can be concluded that the methodology followed is capable of generating high-accuracy classifiers: in some classifiers, accuracies of 100% have been achieved.

With regards to the feature selection, it is concluded that the best features for classification are those associated with the spectral power density spectrum. It is also concluded that the set of features to be selected is independent of the hyperparameters of the final classifier. However, they do depend on the set of signals used in training, as has been seen with the difference in accuracy provided by the signal skewness between the sets on the left and right-hand side of the axle.

In relation to the tuning of hyperparameters, it is concluded that there is a strong relationship between the appropriate hyperparameters and the kernel used. Some variation is also observed for different sets of signals: the accuracies of classifiers seem to be independent of the values of both the codification and the k-fold of the cross-validation, with the kernel and signal set used in training being the dominant factors in these cases. It can also be concluded that both very low values of the box constraint and very low or high values of the kernel scale result in classifiers with low accuracy in general. After analysis, it is deduced that an appropriate value for these parameters ranges between 10^{-1} and 10^2 .

With regards to the analysis of the sensor location, it is concluded that the location of the sensors plays an important role in fault detection through vibration signals since it has an important impact on the feature selection, hyperparameter tuning and classification. It is also noted that mixing signals originating from different sensors without discriminating between signal sets results in a less accurate classifier overall, although this effect can be

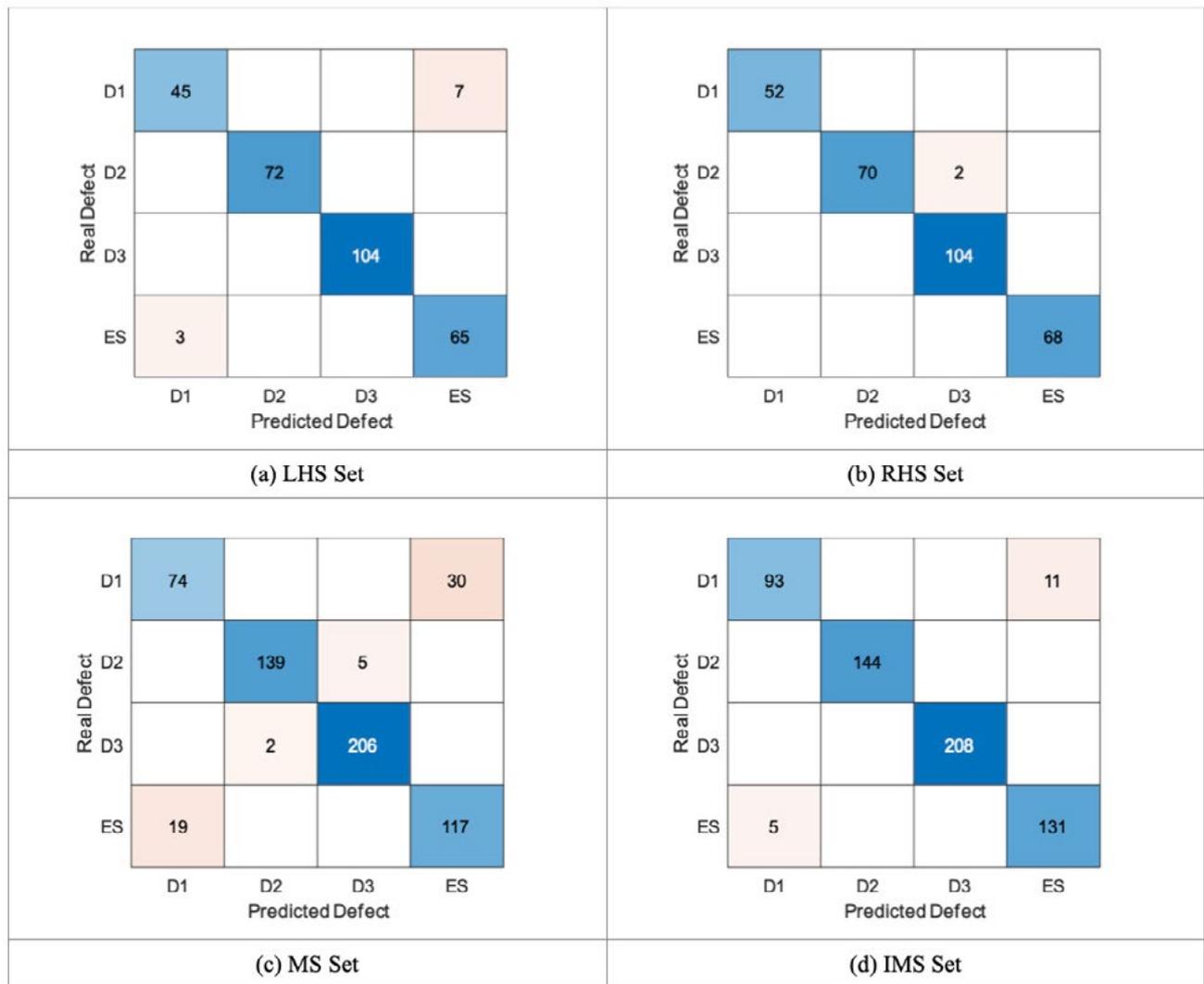


Figure 6. Confusion matrices for each signal set.

somewhat mitigated by incorporating an additional feature that identifies which sensor each signal originates from.

5. Acknowledgements

This publication is part of Project I+D+I MC 4.0, financed by AEI/10.13039/501100011033 through subprojects PID2020-116984RB-C21 and PID2020-116984RB-C22.

References

Antoni, J. (2006). The spectral kurtosis: A useful tool for characterising non-stationary signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(2), 282-307.
 Antoni, J., & Randall, R. B. (2006). The spectral kurtosis: Application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(2),

308-331.
 Bustos, A., Rubio, H., Meneses, J., Castejon, C., & Garcia-Prada, J. C. (2019). Crack detection in freight railway axles using Power Spectral Density and Empirical Mode Decomposition Techniques. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 73, 3691-3701.
 Bustos, A., Rubio, H., Soriano-Heras, E., & Castejon, C. (2021). Methodology for the integration of a high-speed train in Maintenance 4.0. *Journal of Computational Design and Engineering*, 8(6), 1605-1621.
 Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273-297.
 Cristianini, N. (2000). *An introduction to support vector machines: And other Kernel-based learning methods*. Cambridge University Press.

Junquera, E., Rubio, H., Bustos, A. & Soriano, E. *Aplicación de Técnicas de Aprendizaje Automático a la Diagnóstico de Sistemas Mecánicos* [Conference paper presentation]. XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Madrid. (2022, november 22-24).
 Lee, J., Wu, F., Zhao, W., Ghaffari, M., Liao, L., & Siegel, D. (2014). Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 42(1-2), 314-334.
 Randall, R. B. (2011). *Vibration-based condition monitoring: Industrial, aerospace, and automotive applications*. Wiley.
 Sun, B., & Liu, X. (2023). Significance Support Vector Machine for High-Speed Train Bearing Fault Diagnosis. *IEEE Sensors Journal*, 23(5), 4638-4646.

Beyond the lab: human motion analysis with sports machines using smartphones

Más allá del laboratorio: análisis del movimiento humano con máquinas deportivas utilizando 'smartphones'

Rosa Pàmies-Vilà¹, Lluïsa Jordi Nebot¹, Joan Puig-Ortiz¹

Abstract

For the analysis of human motion, researchers typically turn to biomechanics laboratories equipped with infrared cameras to capture the positions of reflective markers placed on anatomical points of the subject. When motion analysis is conducted outside the laboratory (outdoors or in homes), inertial sensors are commonly employed. The introduction of OpenCap application for iOS devices in October 2022 could represent a significant revolution in motion capture. This application, developed by the same creators of OpenSim, allows for obtaining the joint kinematics of a subject's movement without the need for markers or infrared cameras. It requires a minimum of two iOS devices (iPhone, iPad, or iPod) placed on tripods, a calibration board, and a third device to run the OpenCap web application. Kinematic features are derived using the OpenPose and HRNet algorithms, as well as inverse kinematics in OpenSim. OpenCap web application enables users to collect synchronized videos and visualize motion data that is processed automatically in the cloud, thus eliminating the need for specialized hardware. This work goes a step further and focuses on the use of OpenCap and OpenSim to analyse kinematic motion performed on exercise machines. Unlike most previous studies that are limited to modelling only the subject without the ability to incorporate other elements, our approach includes the modelling of gym machines and the recording of data in an uncontrolled environment, allowing exploration of the capabilities of these tools in the recreational and sports domain. In this work, we present the results obtained by using the OpenCap and OpenSim applications to analyse motion performed on two exercise machines located outside a biomechanics laboratory. While challenges were identified in modelling the person-machine interaction, this approach shows potential for enhancing measurement procedures and opening new research possibilities in the sports field.

Keywords

Motion capture, smartphones, OpenCap, sports machines.

Resumen

Para el análisis del movimiento humano, usualmente se recurre a los laboratorios de biomecánica que están equipados con cámaras de infrarrojos para capturar la posición de marcadores reflectantes situados en puntos anatómicos del sujeto. Habitualmente, cuando el análisis del movimiento se realiza fuera del laboratorio (al aire libre o en viviendas) se utilizan sensores inerciales. La aparición de la aplicación OpenCap para dispositivos iOS, en octubre de 2022, puede representar una gran revolución en la captura de movimientos. Esta aplicación, de los mismos desarrolladores de OpenSim, permite obtener la cinemática articular del movimiento de un sujeto sin la necesidad de utilizar marcadores ni cámaras de infrarrojos. Requiere un mínimo de dos dispositivos iOS (iPhone, iPad o iPod) colocados en trípodes, un tablero de calibración y un tercer dispositivo para ejecutar la aplicación web de OpenCap. Las características cinemáticas se derivan utilizando los algoritmos OpenPose y HRNet, así como la cinemática inversa en OpenSim. La aplicación web de OpenCap permite a los usuarios recopilar vídeos sincronizados y visualizar datos de movimiento que se procesan automáticamente en la nube, eliminando así la necesidad de hardware especializado. Este trabajo va un paso más allá y se centra en el uso de OpenCap y OpenSim para analizar el movimiento cinemático realizado en máquinas deportivas. A diferencia de la mayoría de los estudios previos, que se limitan a modelar solo al sujeto sin la capacidad de agregar otros elementos, nuestro enfoque incluye el modelado de las máquinas de gimnasio y la realización de grabaciones en un entorno no controlado, lo que permite explorar las capacidades de estas herramientas en el ámbito recreativo y deportivo. En el trabajo, se presentan los resultados obtenidos mediante la utilización de las aplicaciones OpenCap y OpenSim en el análisis del movimiento realizado en dos máquinas deportivas situadas fuera de un laboratorio biomecánico. Si bien se identificaron desafíos en la modelación de la interacción persona-máquina, este enfoque muestra potencial para mejorar los procedimientos de medición y abrir nuevas posibilidades de investigación en el ámbito deportivo.

Palabras clave

Captura del movimiento, smartphones, OpenCap, máquinas deportivas.

Recibido/received: 01/06/2023 Aceptado/accepted: 10/10/2023

¹Department of Mechanical Engineering. Universitat Politècnica de Catalunya.

Corresponding authors: rosa.pamies@upc.edu; lluisa.jordi@upc.edu; joan.puig@upc.edu

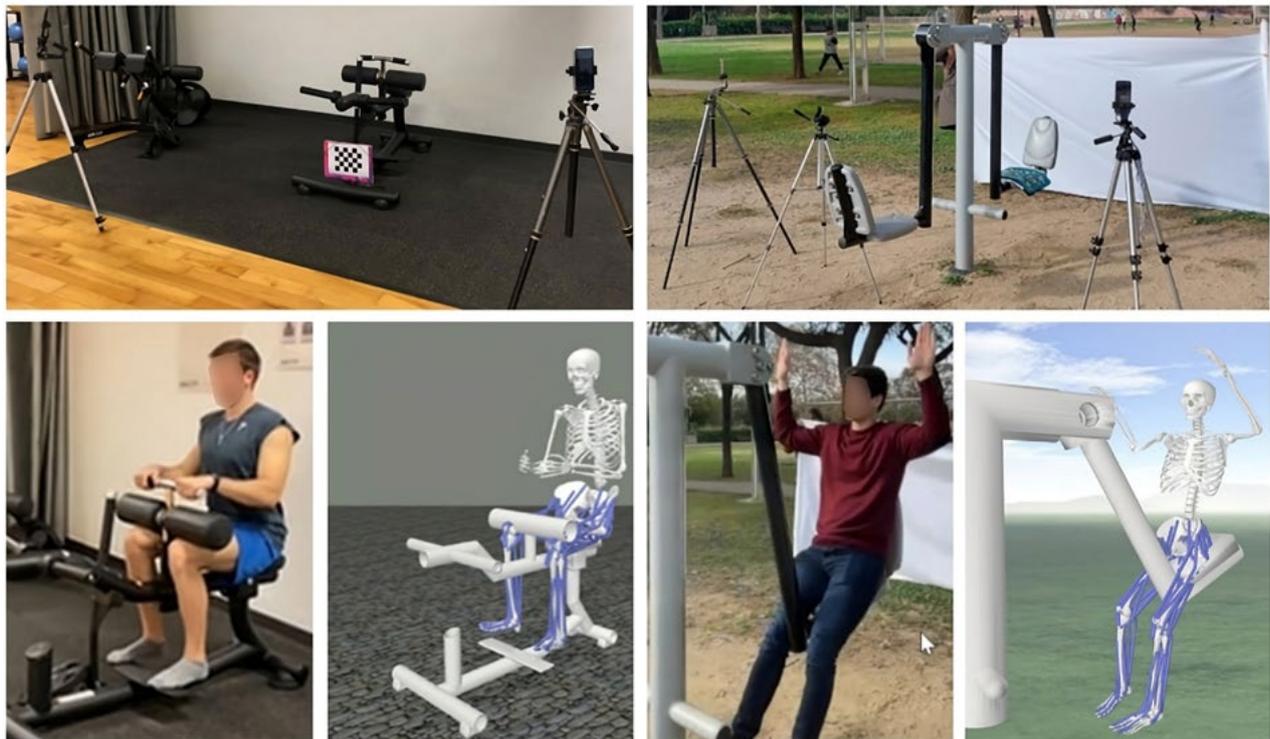


Image provided by the authors of the article.

1. Introduction

Biomechanical analysis of human motion provides quantitative information about the muscular and skeletal system during the execution of specific movements. Data capture systems are key tools for obtaining objective, quantified, reproducible, and accurate measurements of the movements to be analysed. In laboratory settings, infrared cameras are often used to capture the position of reflective markers placed on anatomical points of the subject. However, outside the laboratory, such as in outdoor environments or homes, inertial sensors (IMUs) are commonly used, which combine accelerometers, gyroscopes, and magnetometers. Although IMUs offer a convenient alternative, they have limitations in terms of measurement accuracy, which can be affected by external factors such as electromagnetic interference, vibrations, calibration, and drift issues over time.

Recently, the emergence of the OpenCap application (Uhlrich et al., 2022), for iOS devices in October 2022 has raised the possibility of a revolution in motion capture. Developed by the same team

responsible for OpenSim (Delp et al., 2007), OpenCap allows for obtaining the joint kinematics of a subject's movement without the need for markers or infrared cameras. To implement it, a minimum of two iOS devices (iPhone, iPad, or iPod) placed on tripods, a calibration board, and a third device to run the OpenCap web application are required. Kinematic characteristics are derived using the OpenPose and HRNet algorithms, as well as inverse kinematics in OpenSim.

The main goal of this study is to demonstrate the feasibility of conducting biomechanical experiments outside a laboratory when the subject interacts with other elements. More specifically, we investigate the application of this methodology in scenarios that involve exercise machines. This unique aspect introduces an extra complexity to motion capture, as the cameras may encounter obstructions in certain segments of the analysis due to the presence of these machines.

2. Methods

This work presents two distinct case studies. The first one involves

a subject using a gym machine to exercise the gastrocnemius muscle, and the second one involves a subject using an outdoor bio-healthy sports machine. For both cases, it is necessary to first model the components of the sports machine and edit the musculoskeletal model to incorporate these new components. The final part of this section also explains the methodology for preparing motion capture outside the laboratory.

2.1. Machines Modelling

The modelling of both machines was carried out using the SolidWorks software based on measurements taken from the existing machines. In both cases, the machines consist of a fixed base attached to the ground and a movable component.

Figure 1 shows the model of the gym machine. The first assembly is fixed to the ground (figure 1a), and the part containing the seat is movable (figure 1b). Similarly, figure 2 displays the outdoor bio-healthy sports machine, consisting of a fixed part (figure 2a) and a movable part (figure 2b). Both figures include an image of the

commercial model.

2.2. Musculoskeletal model's edition

OpenCap uses the musculoskeletal model developed by Rajagopal et al. (2016), consisting of 21 segments and 33 degrees of freedom (pelvis in ground reference [6], hips [2×3], knees [2×1], ankles [2×2], metatarsophalangeal joints [2×1], lumbar region [3], shoulders [2×3], and elbows [2×2]).

In the scope of this study, our objective is to extend the modelling approach to incorporate the machine components. Therefore, it is necessary to modify the human model to include the two new solid components of each machine, importing their geometries from STL files generated through SolidWorks.

In addition, two extra joints have been introduced in the model. A PinJoint, which is a revolute joint connecting the two machine components, has been incorporated in both machine models. Moreover, in the case of the gym machine, a WeldJoint links the machine to the right femur, while in the bio-healthy sports machine, it connects the pelvis to the mobile part.

2.3. Configuration and preparation for motion capture

To carry out the desired motion

capture, the following equipment is required: a laptop computer, a reliable internet connection, a minimum of two iOS devices manufactured from 2018 onwards (iPhone or iPad), the installation of the Test Flight application, tripods equipped with mobile device mounts for each unit, and A4-sized printed chessboard supplied by OpenCap.

After selecting the equipment and a suitable recording environment, the cameras must be positioned on their tripods to capture the entire motion on both devices. To ensure a complete view of the motion and the subject, the cameras should be placed at a height between 1 metre and 1.5 metres.

In both of the analysed scenarios, this configuration ensures that the cameras comprehensively cover the entire range of motion without the subject moving beyond the field of view of the devices. It is important to note that the selected configuration should also allow for the capture of the subject in a standing position, which is necessary for calibration purposes. Regarding the distance between the cameras, the subject, and the machinery under investigation, it must be such that both the subject and the machinery are entirely within the range of the cameras. In

the case of this study, this distance was between 2 metres and 4 metres. Concerning the angles between the cameras, it is recommended not to place them in a purely frontal or lateral position concerning the subject and the machinery, as this would result in obstructions to the limbs and adversely affect motion capture. Recommendations suggest that the recording angles should be between 30 degrees and 45 degrees relative to the front of the object under study.

To calibrate the cameras, the chessboard should be placed in the recording scene. It must be visible to all cameras, perpendicular to the ground, and located within the desired capture volume. Figure 3 depicts the capture setup for the gym machine. The calibration process is carried out following a step-by-step guide provided on the OpenCap website.

Prior to starting the recording process, it is necessary to calibrate the subject's model. For this purpose, basic anthropometric data, including gender, height, and mass, must be entered into the OpenCap software. The participant is required to stand with arms extended at an angular range of 20 degrees to 25 degrees relative to their trunk.



Figure 1. Analysed gym machine. a) Fixed part, b) movable part, c) commercial model.

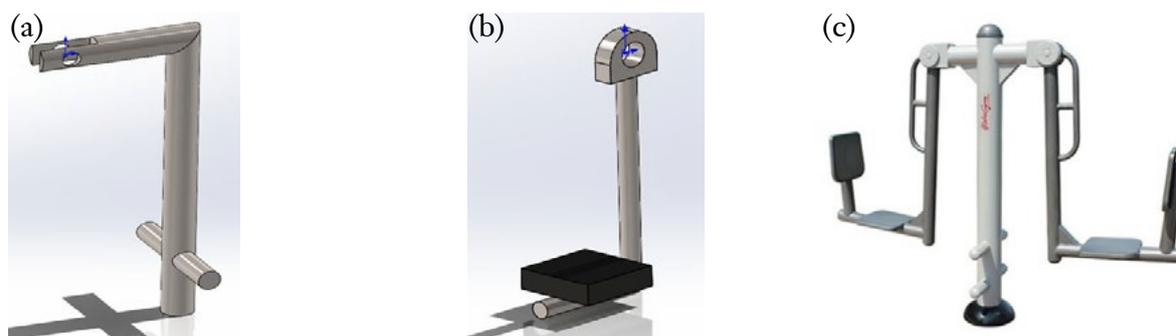


Figure 2. Outdoor bio-healthy sport machine. a) Fixed part, b) movable part, c) commercial model.

Initiating the calibration process within OpenCap generates a virtual model of the subject, forming the basis for subsequent analytical procedures.

From this point, users can record any movement using the OpenCap web application. OpenCap employs a set of 3D key points derived from recorded videos and a Long Short-Term Memory (LSTM) network to compute joint kinematics using the Inverse Kinematics tool of OpenSim and the scaled musculoskeletal model (Uhlrich et al., 2022). Users can visualise the resulting three-dimensional kinematics within the web application.

3. Results

Figure 4 illustrates, for the two cases under examination, a real image and its representation in OpenSim.

OpenCap is capable of capturing the temporal evolution of the 28 relative joint angles of the human model and the 6 degrees of freedom that position and orient the pelvis with respect to the ground in an absolute manner. Additionally, including the machine in the overall model introduces a new constraint between the subject and the ground (via the machine). With the new subject-machine models and motion captures from OpenCap, kinematics of the entire system can be obtained in OpenSim using the AnalyzeTool.

One of the key challenges is the precise determination of the relative positioning of the subject concerning the machine, i.e., the sub-



Figure 3. Motion capture scene in the gym.

ject's posture on the machine. The OpenCap model does not offer this information, leaving the sole option of measuring the distance between an anthropometric point on the individual and a distinctive point on the machine during motion capture. Furthermore, it is unclear how the subject's outfit (and its contrast with the environment) may influence the obtained results.

This section addresses these two challenges. In the case of the gym machine, changes in the joint angles of the legs are analysed based on the clothing worn by the user. Secondly, in the outdoor machine model, the kinematics are examined in relation to the definition of the subject-machine connection.

3.1. Gym machine

During the capture motion procedure, challenges arose in precisely capturing the positioning of the feet. As a result, we analyse the joint kinematic results in three distinct

scenarios: when the subject was wearing socks, when he had shoes on, and when he was barefoot. Figure 5 shows the evolution of ankle, knee, and hip flexion angles for both legs in these three situations. The mean absolute difference between the joint angle of each leg has been calculated, and the values are presented in table 1.

Based on the presented results, it can be observed that the most symmetrical movement occurred when the subject was barefoot. Notably, significant differences were observed, particularly in hip flexion, across all three study situations. The difference of over 25 degrees can be attributed to the inclusion of the machine in the model. The machine's moving part is fixed to the right leg, thereby affecting this angle due to a new constraint (leg-machine-ground connection). These findings raise questions about the accuracy of the subject-machine connection. Two potential sources

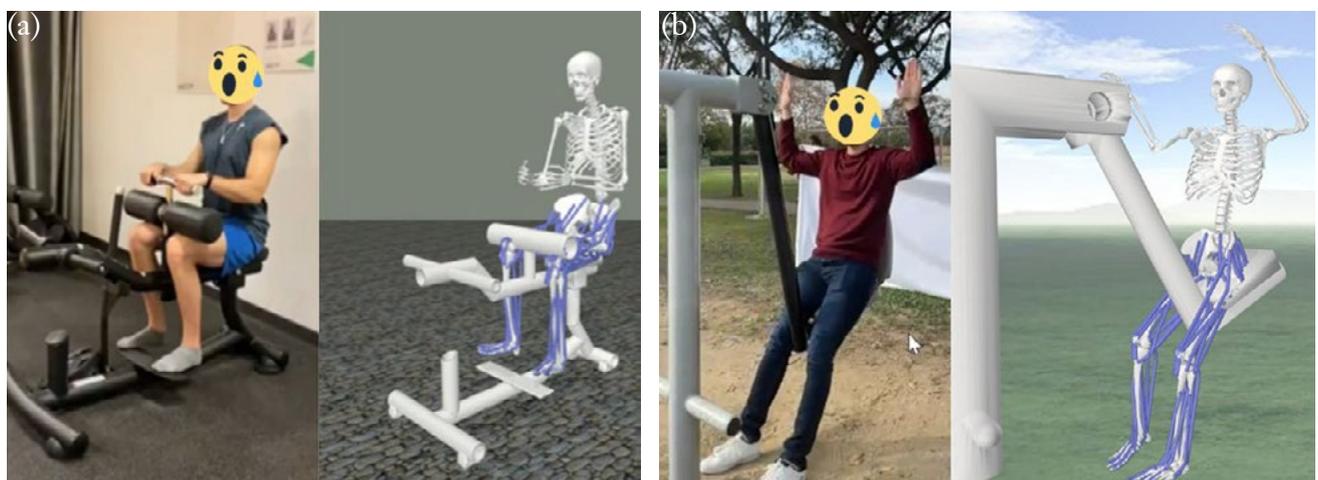


Figure 4. Illustrative capture of the studied machines: a) gym machine, and b) bio-healthy outdoor sports machine.

of error are identified: firstly, the machine was rigidly attached (via a welded joint) to the subject's leg, whereas in reality, it involves significant soft tissue. Secondly, the precise subject-machine relative position is unknown, and the results are highly dependent on this positioning, as will be explored in the following section.

3.2. Bio-healthy outdoor sports machine

The outlined methodology allows for the determination of the subject's joint angles during exercise on the outdoor sports machine. In figure 6, we have graphed the ankle, knee, and hip flexion angles for both legs. The mean absolute differences between the two curves are 6.2 degrees for the ankle, 9.1 degrees for the knee, and 4.9 degrees for the hip.

In this case, the incorporation of the machine into the model does not affect the relative joint angles. The moving part of the machine is fixed to the solid pelvis, which serves as the base of the model (providing absolute position and orientation with respect to the ground). Consequently, a new constraint is introduced, connecting the pelvis-machine-ground, which does not alter the orientation of the human model's limbs but does impact the absolute orientation angle of the pelvis with respect to the ground.

This study investigates how the kinematic results vary based on the

	Socks	Shoes	Barefoot
Ankle flexion [°]	8.1	7.5	6.4
Knee flexion [°]	3.4	5.4	4.5
Hip flexion [°]	28.2	27.2	26.4

Table 1. Mean absolute differences in joint angles between both legs

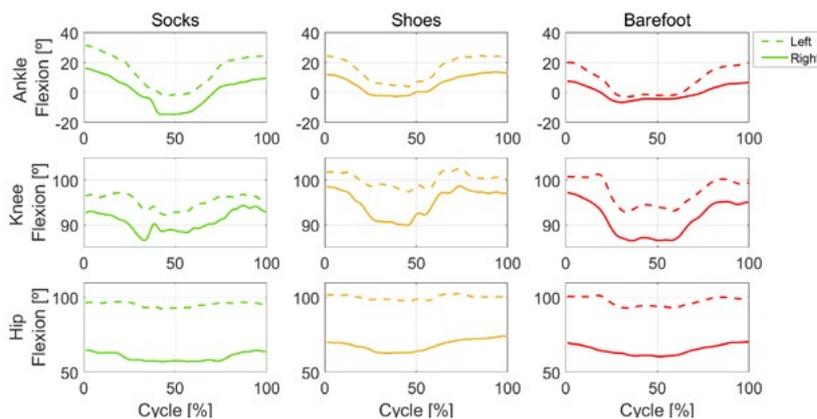


Figure 5. Leg flexion angles in gym machine exercise. Results for motion capture with socks, wearing shoes, and being barefoot.

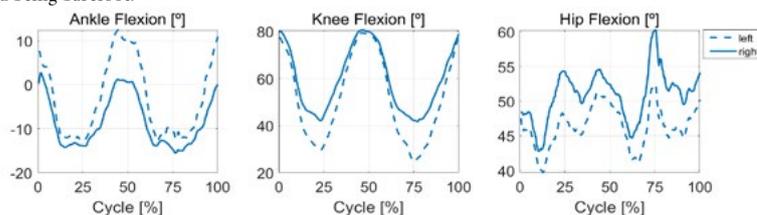
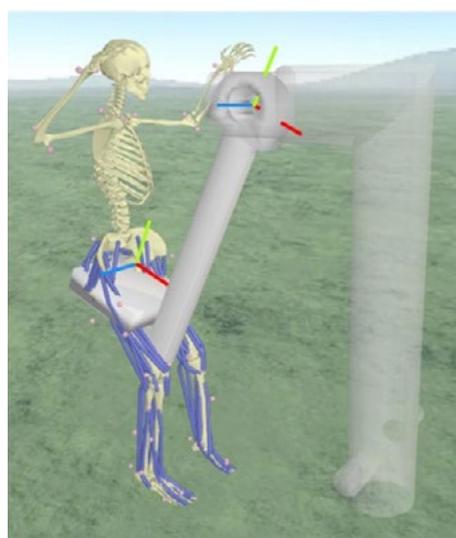


Figure 6. Leg flexion angles in outdoor sports machine exercise.

parametrization of this connection. A welded joint links the pelvis to the mobile part of the machine. To define this connection, it is necessary to specify the relative position and orientation of the machine frame (with origin where the two machine components connect) with respect

to the pelvis frame (refer to figure 7 for clarification). To illustrate the significance of this connection, two models (M1 and M2) have been created with the parameters displayed in figure 7. These parameters define the coordinates of the machine origin point, expressed



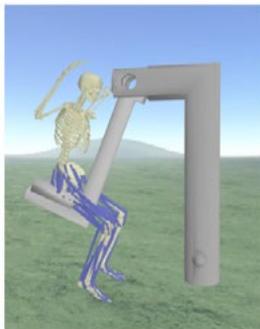
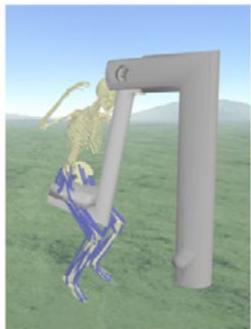
	Model M1	Model M2
Position [m]	(0.45 0.65 0)	(0.28 0.8 0)
Orientation [rad]	(0 0 -0.4)	(0 0 -0.05)
Initial configuration		

Figure 7. Definition of Models M1 and M2 based on the determination of the machine's origin points relative to the pelvis's frame.

on the pelvis frame (in metres) and its orientation (in radians). The sequence of these coordinates aligns with the RGB frame in the image (red, green, blue).

Conducting a kinematic analysis with the incorporation of the machine allows for the determination of the machine opening angle and the evaluation of its impact on the pelvic flexion angle. Figure 8a) presents these angles for the base model (without the machine) and for the two proposed connections (Models M1 and M2). In figure 8b), the machine opening angle can be observed. In the actual machine, this angle is 0 when the machine is in its equilibrium position (closed), and it increases as the subject initiates the movement. Figure 8a shows a significant alteration in the absolute pelvic flexion angle, with the alteration being more pronounced in the case of the M2 machine model (mean absolute difference of 19.4 degrees for M1 and 30.4 degrees for M2). Therefore, model M1 appears to closely approximate the actual movement. However, when considering the machine opening angle, M2 more faithfully replicates the genuine machine motion, with the initial and final angles approaching the zero angle it should have in the closed position. These disparities in the initial position of the two models are also visible in figure 7.

4. Discussion and conclusions

In this study, we have presented the results of our investigation using the OpenCap and OpenSim applications to analyse kinematic motion performed on two outdoor sports machines, in a setting outside the traditional biomechanics laboratory. Until now, most motion capture studies using markerless videographic images have focused solely on modelling the human subject, often neglecting the integration of additional elements (Uhlrich et al., 2022; Van Hooren et al., 2023). In contrast, our work stands out for its inclusion of the modelling of two gym machines and for conducting recordings outside the controlled laboratory environment.

It is important to note that our

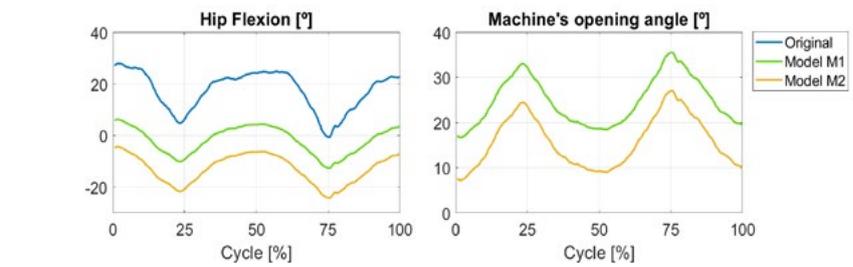


Figure 8. Hip flexion and machine opening angles. The blue line represents the original capture results, while the green and orange lines depict the outcomes based on Models M1 and M2, respectively.

objective was not to validate the image processing for obtaining joint angles, as this has been analysed by other researchers who reported errors ranging from 2 degrees to 10 degrees in joint angles (Uhlrich et al., 2022). Instead, our focus was on exploring the potential applications of these tools in more recreational contexts, specifically within the realm of gym-based sports techniques.

Our findings show up that the clothing worn does not significantly impact the accuracy of markerless motion capture, in line with previous research that arrived at the same conclusion (Keller et al., 2022). Furthermore, our observations revealed that the key challenge when incorporating machine elements into the analyses lies in achieving a precise modelling of the interaction between the subject and the machine. Further studies in this direction are necessary to make progress in this regard.

Despite these inherent limitations, our work emphasizes that this innovative technique can be applied beyond controlled environments. Although there is still much to explore, the combined use of CAD software and the OpenCap and OpenSim applications has the potential to expedite data collection procedures and simplify field measurements. Consequently, this development presents promising prospects for future research initiatives in the domains of sports and recreation.

5. Acknowledgments

The authors extend their thanks to Eric Veciana Pérez and Eric Fernández Cintas, students whose contributions to obtaining the motion capture data have been crucial. Their

invaluable collaboration played a pivotal role in the achievement of this research.

References

- Delp, S. L., Anderson, F. C., Arnold, A. S., Loan, P., Habib, A., John, C. T., Guendelman, E., & Thelen, D. G. (2007). OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 54(11), 1940–1950. <https://doi.org/10.1109/tbme.2007.901024>
- Keller, V. T., Jereme Outerleys, Kanko, R., Laende, E. K., & Deluzio, K. J. (2022). Clothing condition does not affect meaningful clinical interpretation in markerless motion capture. *Journal of Biomechanics*, 141, 111182–111182. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2022.111182>
- Rajagopal, A., Dembia, C. L., DeMers, M. S., Delp, D. D., Hicks, J. L., & Delp, S. L. (2016). Full-Body Musculoskeletal Model for Muscle-Driven Simulation of Human Gait. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 63(10), 2068–2079. <https://doi.org/10.1109/tbme.2016.2586891>
- Uhlrich, S. D., Falisse, A., Kidziński, Ł., Muccini, J., Ko, M., Chaudhari, A. S., Hicks, J. L., & Delp, S. L. (2022). OpenCap: 3D human movement dynamics from smartphone videos. <https://doi.org/10.1101/2022.07.07.499061>
- Van Hooren, B., Pecasse, N., Meijer, K., & Essers, J. M. N. (2023). The accuracy of markerless motion capture combined with computer vision techniques for measuring running kinematics. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. <https://doi.org/10.1111/sms.14319>

A study of the corrosion in the equipment of a WWTP for planning preventive measures

Estudio de la corrosión en equipos de una EDAR para la planificación de medidas preventivas

M.D. Sánchez Blanco¹, F.C. Gómez de León Hijes², F.J. Navarro Sánchez³

Abstract

Corrosion keeps being one of the problems that causes huge losses worldwide and, if not properly detected, triggers failures in industrial facilities, with the consequent risk that this entails. Particularly, in wastewater treatment plants (WWTP), corrosion is responsible for significantly reducing the useful life of equipment, pipes, instruments, etc. causing large economic losses and, sometimes, accidents due to the premature degradation of materials in equipment and metal structures. Among the factors causing corrosion are hydrogen sulphide and the humidity inherent to these installations. In this work, the concentrations of these two agents in a WWTP are analysed, representing them through concentration maps, to study their relationship with the elements most affected by this phenomenon, that reveals the areas of the facility that were potentially most exposed to corrosion. Furthermore, because of these results, maintenance strategies were modified, largely reactive, including a program of periodic preventive actions in the facility, prioritized based on the criticality of the equipment, as well as other elements of the facility, and the level of potential exposure to such corrosive agents.

Keywords

Corrosion, hydrogen sulphide, preventive maintenance, WWTP.

Resumen

La corrosión sigue siendo uno de los problemas causantes de enormes pérdidas en todo el mundo y, de no ser adecuadamente detectado, desencadenante de fallos en las instalaciones industriales, con el consiguiente riesgo que esto supone. Particularmente, en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), la corrosión puede reducir significativamente la vida útil de los equipos, tuberías, instrumentos, etc. y causar cuantiosas pérdidas económicas y, en ocasiones, accidentes debido a la degradación prematura de los materiales en equipos y estructuras metálicas. Entre los factores causantes de la corrosión se encuentran el ácido sulfhídrico y la humedad inherente a estas instalaciones.

En este trabajo se analizan las concentraciones de estos dos agentes en una EDAR, representándolas mediante mapas de concentración, para estudiar su relación con los elementos más afectados por este fenómeno, lo que pone al descubierto las zonas de la instalación que estaban potencialmente más expuestas a la corrosión. Además, como consecuencia de estos resultados, se modificaron las estrategias de mantenimiento, en gran parte reactivas, incluyendo un programa de actuaciones preventivas periódicas en la instalación, priorizadas en función de la criticidad de los equipos y elementos de la instalación y de su nivel de exposición potencial a dichos agentes corrosivos.

Palabras clave

Corrosión, ácido sulfhídrico, mantenimiento preventivo, EDAR.

Recibido/received: 01/06/2023 Aceptado/accepted: 10/10/2023

¹ Technical Service & Development. Dow España.

² Mechanical Engineering Area. University of Murcia.

³ Leader of Purification and Discharge Control Department. Aguas de Murcia.

Corresponding author: Félix Cesáreo Gómez de León Hijes; e-mail: gdleon@um.es



Image provided by the authors of the article.

1. Introduction

In industrialized countries, direct and indirect losses due to corrosion are between 3% and 4% of their GDP (García et al., 2015; Gómez de León and Alcaraz, 2004), an even higher figures in developing countries, where protection and preventive measures against corrosion are clearly lower. Furthermore, not a minor problem is the loss of materials, which are discarded without any recovery process (Gómez, 2004). It is estimated that 25% of the annual world production of steel is destroyed due to corrosion (García et al., 2015; Ávila and Genescá, 1995). According to the World Corrosion Organization, between 15% and 35% of annual losses caused by corrosion could be saved if prevention and control actions were implemented (Crespo, 2022).

Particularly, in wastewater treatment plants (WWTP), corrosion is an inherent problem because wastewater constitutes a powerful corrosive and aggressive agent, as do other waste and emissions that arise

during the purification process. Whether in liquid, solid or gaseous phase, corrosive processes develop spontaneously, causing considerable maintenance costs, both in repairs and preventive measures, in addition to equipment failures, more specifically in pipes and lines of water and sludge, metal structures and even in warehouses, where electrical panels, instruments, various substances, etc., are temporarily stored.

Consequently, carrying out an exhaustive analysis of the corrosive processes that develop in a wastewater treatment plant is beneficial in several aspects. Firstly, it can suggest relevant conclusions regarding preventive measures, thus facilitating the work regarding maintenance of this type of facilities. At the same time, if situations that promote corrosion are foreseen, the costs related to this phenomenon can be reduced. Finally, given that corrosion can trigger accidents due to material failure, an exhaustive study of its evolution would increase safety in this type of facilities.

For this reason, at the WWTP under study it was decided to carry out an in-depth preventive inspection, including absolutely all elements of the plant, in order to check its current state and, consequently, analyse the convenience of modifying the programmed preventive strategies.



Figure 1. Orthophoto of the WWTP under study (Source: IGN's Iberpix cartographic viewer).

This study has been carried out in a large WWTP in the Region of Murcia, which is located on the left bank of the Segura river, downstream from the urban area of the city of Murcia (Spain). It is, due to its purification capacity, the largest wastewater treatment plant in the Region of Murcia and the 18th in Spain (EMUASA, 2023).

The plant under study has a design flow of 100,000 m³/day and serves most of the population of the municipality of Murcia, with a population in 2022 of 462,979 in 2022, according to Spanish National Institute of Statistics (INE, 2022). It is a modern facility, with advanced purification technologies, which has a sludge production of 5,587 tons of dry matter/year that are reused mainly in agriculture. The purified water is returned to Segura river, collaborating in its regeneration and conservation, while the dehydrated sludge has a direct agricultural application and compost production. In addition, the WWTP has a biogas production stage that satisfies 100% of the process heat needs and 48% of the electricity consumption of the WWTP (iAgua, 2012).

Figure 1 shows an orthophoto of the WWTP, where the distribution of the facilities can be observed as well as Segura river, coloured blue to highlight it, where the treated water is discharged.

The overall process of the plant is divided into three lines (Vicepresidencia, 2023): water line, sludge line and, from 2012, a gas line that provides energy to the plant from the biogas generated during the purification process.

As seen in that image (Figure 1), the facilities extend parallel to the river, having the raw water inlet (pretreatment stage) through the highest area (lower left area of the image) and, by gravity, it passes through the successive stages of the process, with a lower altitude (upper right area of the image), that is, from southwest to northeast, to be discharged into the river once the water has been purified.

2. Methodology

2.1. Corrosive agents

The corrosive processes that develop in a wastewater treatment plant have mainly three origins: electrochemical, chemical and microbial activity. The synergistic effect of these three causes premature degradation in all plant facilities and equipment (Marín et al., 2011). The

unforeseen failure of a treatment plant can cause total or partial discharge of wastewater without correctly completing its purification process and, in addition to the economic losses it entails, it would have a high social, health and environmental cost.

Although water itself already produces corrosion in many materials, the organic and inorganic substances present in wastewater, with high quantities of microorganisms capable of producing microbiological or bacterial corrosion (Loto, 2017; Gómez de León and Alcaraz, 2004), enhance its corrosive activity. In addition, there are other factors that trigger corrosive processes that are equally important and that must be considered (INNOTECH, 2021). Thus, according to the sources consulted in the WWTP laboratories under study, important corrosive agents can be found in the waste produced in the different operations, such as: chemicals for cleaning and periodic maintenance, purges in the degreasing and sanding stage, purges in the primary and secondary decantation stages, or in the water from drying or centrifugation of the sludge line. On the other hand, the emissions produced in the different processes are a highly relevant corrosive agent.

The wastewater that enters in a treatment plant contains of a wide variety of volatile compounds, which may be proper of said water, but also coming from chemical and microbial reactions that occur in it. It is worth highlighting hydrogen sulphide (H₂S), a gas with a characteristic rotten egg stench that is common in this type of facilities, which easily leaves the liquid phase, forming part of the gas phase and, consequently, of the surrounding atmosphere, coming into contact with all the equipment, pipes, and instruments of the plant, where important corrosive processes will develop.

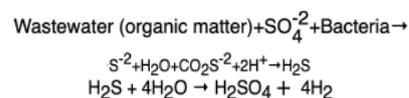
Other corrosive agents are solids separated whether forcibly or not, as well as deposits that appear in different equipment and lines, mainly in pipes or places with a low slope, manholes and bottoms of bags, areas prone to the accumulation of solids and in which there is a low flow velocity. There is also a considerable risk of finding solid deposits in equipment that is not used frequently and that can fill with waste naturally (rain, infiltrations, etc.) or remain stopped for certain periods of time, such as pipes or pumps. Among the most chemically and biologically aggressive solid waste, it is worth highlighting the

solids removed in the coarse matter pit and in tanks before reaching the pumping of raw water, screening of coarse matter and solids removed in the gritting and degreasing process, and sludge from the primary and secondary settling processes.

2.2. Corrosive process caused by H₂S

According to Bethencourt et al. (Bethencourt et al., 2010), "in wastewater the most frequent origin of this volatile gas is the reduction of sulphate carried out by sulphate-reducing bacteria (SRB)", capable of oxidizing, under anaerobic conditions, organic matter containing sulphur, releasing H₂S. In areas with low circulation speed, for instance, in sludge line pipes, bacteria are accumulated, creating biofilms that protect the bacteria from acids, alkalis, oxygen, etc. Furthermore, these biofilms can, on the one hand, also actively participate in corrosive processes through direct interactions with the metal surface and, on the other hand, form differential aeration cells, creating corrosion piles due to different oxygenation in different areas of the metal surface.

Under humid and warm conditions, hydrogen sulphide can undergo biological oxidation forming sulfuric acid, which is the main corrosive agent in facilities. The reactions that rule these processes are indicated below (Tchobanoglous and Burton, 1998):



H₂SO₄ attacks concrete, copper, steel, iron, etc., prematurely degrading those structures where preventive measures have not been adopted. Corrosion rate increases with H₂S concentration, humidity, temperature and the number of bacteria. Corrosive power increases when the structures are submerged.

2.3. Importance of humidity in the environment

One of the factors that enhances the phenomenon of corrosion in the atmospheric medium is the amount of water contained in the air, that is, the relative humidity of the surrounding atmosphere which, given the nature of a WWTP, is always present at high values. Humidity is considered the most damaging atmospheric agent with respect to corrosion.

In these cases, the corrosion mechanism is of electrochemical origin,

whose electrolyte is the layer of humidity on the surface of the metal. The intensity of the corrosive process will depend on the length of time the humidity layer remains on the metal, as well as the thickness of said layer. The smaller the thickness of the humidity layer, the greater the ohmic resistance between the anode (metal) and the cathode, making it more difficult for corrosion to advance (Genescá, 1994).

Therefore, it can be stated that one of the main causes of corrosion in a WWTP comes from hydrogen sulphide, present in these facilities, in combination with high relative humidity.

3. Methodology and results

3.1. Functional criticality

Although all components of the plant, that is, equipment and facilities, are necessary for its operation, not all of them are equally important, in the sense that failure in the service of each of them does not have the same consequences. Therefore, it is convenient, if not necessary from the point of view of maintenance planning, to determine the functional criticality of each element of the installation. Thus, for example, while a total failure in the raw water pumping system would paralyze the process and, consequently, all the incoming water would be poured directly into the river without purification, the failure of one of the pumps in said system would not, since there are redundant pumps. The repair time or the costs derived from the failure are also factors to take into account, since in some stages of the process there is a certain margin of time to stop it, without affecting the general debugging process.

To know the functional criticality of each element of the installation, the MCCE (Multi-Criteria Classification of Critical Equipment) method, formulated by Gómez de León and Ruiz (Gómez de León and Ruiz, 2006), was followed. This method provides a percentage scale of relative importance of the elements under study, which is based on the interrelationships of multiple factors that determine the effects of the failure, considering them all together but taking into account their distinct levels of importance and, therefore, of influence on the final result.

In order to determine the criticality criteria to be taken into account in the consequences of the failure, as well as their relative importance, that is, the weight (w_i) and the different degrees (d_i) in which each criterion will be evaluated,

Designation	Criterion	Concept to evaluate	Weight	Degrees
C1	Risk for operators	Accident possibility	5	Very low (0), low (1), medium (2), high (3), very high (4)
C2	Spill risk	Purification status of the effluent discharged into the river	5	Completely purified water (0) ... Unpurified water (4)
C3	Effect on service	Impact on the function performed	3	Does not stop the service (0) ... Stops its function (4)
C4	Other items affected	Other damage caused to the equipment in case of failure	3	None (0) ... Many (4)
C5	Equipment/ item cost	Acquisition cost	3	Very low (0), low (1), medium (2), high (3), very high (4)
C6	Alternative equipment	Is there alternative equipment in case of failure?	3	Several (0) ... None (4)
C7	Item reliability	MTBF	2	Very low (0), low (1), medium (2), high (3), very high (4)
C8	Time to repair	MTTR	2	Less than 2 hours (0) ... More than a week (4)
C9	Repair cost	Economic cost in case of failure	2	Less than 100 € (0) ... More than 6000 € (4)
C10	Effects on organization	Effects on personnel	1	None (0) ... Many (4)

Table 1. Functional criticality criteria.

a team of experts was formed consisting of the following people: the director of the WWTP, the chief maintenance engineer, the two maintenance shift leaders, the process director and the two plant process shift leaders. This team also had the advice of the authors of this work, with voice but no vote in the decisions made.

Although table 1 does not show it in detail, it can be seen that each of the ten criteria ($n = 10$) is divided into five levels or degrees of criticality (d_i), each of which represents the extent to which the failure of the element analysed has importance as far as the criterion in question is concerned. Following the method presented (Gómez de León y Ruiz, 2006), the criticality index (I_c) of each element is calculated by applying equation (1), where d is the maximum value that can be reached with a criterion. As seen in table 1, in this case $d = 4$:

$$I_c = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (d_i \cdot w_i)}{d \cdot \sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

The result of applying this method to all the analysed elements of the WWTP results in an ordered list of all of them according to their criticality index, that is, the relative

importance that the consequences derived from the possible failure of each element would have for the plant.

3.2. Measurement of H2S concentration and relative humidity

To carry out this analysis, numerous measurements of relative humidity and hydrogen sulfide concentration were made throughout the plant. To do this, firstly, gridded templates were designed on the WWTP plans. In these templates, the measurement points were identified and marked, with planimetry coordinates, in order to later transfer them to the terrain with the greatest possible precision. The purpose of creating those grid templates is to ensure that they were measured uniformly in the surroundings and inside the buildings, to obtain relative humidity and H2S concentration data from the entire WWTP so that they were uniformly distributed and with the greatest repeatability possible.

To facilitate successive measurements, once the templates were finished, the selected measurement points were marked on the floor of the plant. Specifically, outdoors with a grid cell dimension of approximately 3×5 meters and indoors with a grid cell dimension of approximately

2 × 2 meters. The stages and buildings considered were pretreatment, primary decantation, biological reactor, secondary decantation, control building and sludge line.

To mark the grid points on the floor, a fluorine red spray was used so that the marks could be seen long enough (approximately six months) to take measurements. Once the study was completed, all marks were removed. In total, 476 points were scored outdoors and 452 indoors.

The instrument used to measure hydrogen sulphide (H₂S) concentrations was the Jerome J605 Hydrogen Sulphide Analyzer. This equipment allows measuring concentrations in a range of 3 parts per billion (3 ppb; 0.003 ppm) to 10 parts per million (10 ppm). Values greater than 10 ppm are displayed as high concentration, while values less than 3 ppb are displayed as 0.00 ppb. This is because NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health), part of the United States Health Service, recommends not exceeding the maximum exposure limit of 10 ppm over a 10-minute period. Nevertheless, low concentrations, up to 20 ppm, can cause nose and throat irritation. At high concentrations (generally greater than 500 ppm) it can cause loss of consciousness and even death even in very short periods of time, even less than a minute.

The instrument used to determine relative humidity is the PCE-313S Thermohygrometer, which is capable of measuring relative humidity in a range of 10-95%, with a resolution of 0.1%, and temperatures from 0 to 50 °C with a resolution of 0.1 °C.

3.3. Measurement maps

The results of the H₂S concentration and relative humidity measurements carried out have been represented in the form of contour lines, with coloured areas, on the WWTP plans. The colour correspondence of each zone, according to its concentration of H₂S or humidity, respectively, is shown in figure 2.

It should be noted that measurements were also made in other buildings and areas of the plant, but the H₂S concentrations were practically zero and, in addition, the relative humidity values were clearly lower than those analysed, specifically, the pretreatment buildings (Figure 3), lamellar decantation building (Figure

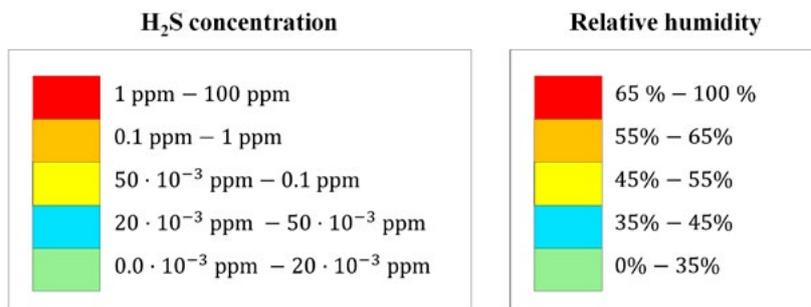


Figure 2. H₂S concentration and relative humidity scales.

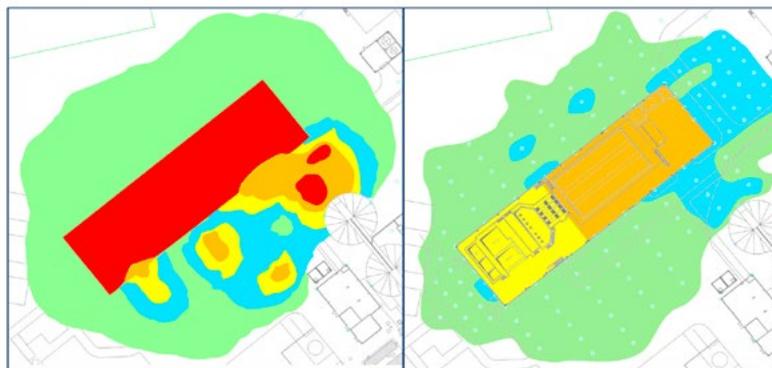


Figure 3. Concentrations of H₂S (left) y relative humidity (right) in pretreatment building.

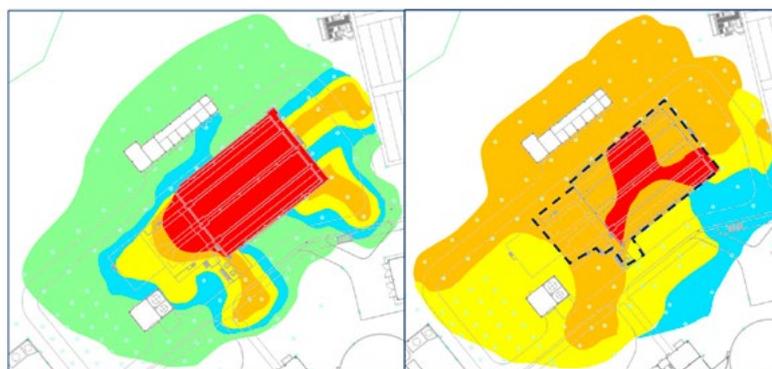


Figure 4. Concentrations of H₂S (left) y relative humidity (right) in lamellar decantation building.



Figure 5. Concentrations of H₂S (left) y relative humidity (right) in sludge line.

4), the sludge line (Figure 5) and the biological reactor (Figure 6).

3.4. Assessment of the level of exposure to corrosion

The maps of H₂S concentration and relative humidity were superimposed

to obtain the areas in which both levels were high and, also, if any equipment or element was susceptible to being affected by corrosion. For example, outdoors where there was no equipment or structure were ruled out. The criterion followed to determine these critical

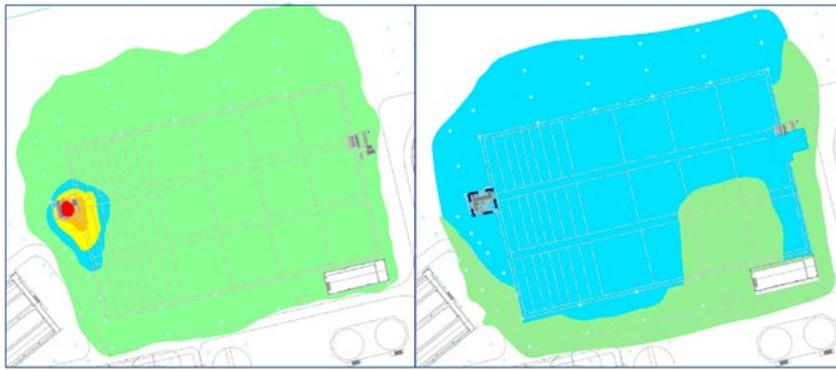


Figure 6. Concentrations of H₂S (left) y relative humidity (right) in biological reactor.

H ₂ S Concentration	10	10	20	30	50	100
	5	5	10	15	25	50
	3	3	6	9	15	30
	2	2	4	6	10	20
	1	1	2	3	5	10
		Relative humidity				
		1	2	3	5	10

Figure 7. Corrosion Exposure Level matrix based on H₂S concentration and relative humidity.

zones was highlighted in figure 7.

Given that the scale of levels of each of the two parameters in question consists of five categories, a relative weight was given to each of them, so that the lowest level was given unit weight and the highest level 10,

according to the following sequence of weights: 1, 2, 3, 5 and 10, as indicated in the corresponding cells of each of the parameters in figure 7. As seen in said figure, to evaluate the severity of the conditions that promote corrosion, the Corrosion Exposure Levels matrix is used. It is a criticality matrix calculated following a simple geometric method (Gómez de León et al., 2023), where each cell of the matrix takes the value of the product of the corresponding parameters.

The cut-off level to select the most exposed areas was set at a value of 10. This choice was not arbitrary. On the contrary, after a thorough analysis of the status of corrosion of the equipment and elements of the plant, that is, its

degree of affectation, it was possible to demonstrate that the criterion followed was correct. That is, all those areas affected by a clearly higher degree of corrosion had a criticality level greater than 10.

To do this, a status sheet, or registration file, was completed for each of the plant elements where, in addition to the identification and location data of the element, its degree of deterioration due to corrosion was assessed. In all these inspection routes, appropriate protection measures were adopted in each space of the plant (INSST, 2017). Figure 8 shows an example of a register file for one of the elements.

Since the cases were varied, it was decided to establish a classification with the five categories indicated in table 2, so that they sufficiently reflect the different degrees of corrosion damage observed.

It was found that none of the areas of the matrix of figure 7 with an exposure level less than 10 presented elements with a corrosion degree equal to or greater than 3. Consequently, maintenance intensification efforts should focus on the shaded areas of said matrix.

Although, as expected, an area with an exposure level of 100 indicates a maximum exposure to the corrosive phenomenon potentially ten times greater than that of another with a value of 10, it is also necessary to consider the risk associated with potential failure of each of the affected components. In this way, the greater the consequences of the failure of an element, the greater the level of supervision must be or the preventive measures to be carried out, which has been called Functional criticality of the element.

The result of applying the criticality analysis to all the analysed elements of the WWTP resulted in an ordered list of these according to the value of their criticality index. Specifically, in the case studied the values were finally between a minimum value of 5.77% and a maximum of 63.38%. To simplify the interpretation and subsequent use of these results, the indicated range was divided into four approximately equal parts (classes) whose criticality indices were considered: low ($I_c \leq 20\%$), medium ($20\% < I_c \leq 35\%$), high ($35\% < I_c \leq 50\%$) and very high ($I_c > 50\%$).

Element:	<i>Plate securing the actuator to the ground</i>
Unit:	Actuator of sluice gate well 1
Reference Code:	-
Location:	Pretreatment
Exact Ubicación:	(See reference on plan)
Environment:	Air inside the building
Material:	SS-AISI 316L
Degree of corrosión:	4
Images:	



Figure 8. Example of an element status sheet.

Degrees of corrosion	Status
1	No corrosion observed (areas corresponding to a criticality less than 10)
2	Very slight corrosion (barely taken)
3	Widespread corrosion. Uniform layer of low thickness and/or large number of holes. The pitting does not pierce the material
4	Widespread corrosion. Uniform layer of low thickness and/or large number of holes. Pitting does not pierce the material
5	Very extended corrosion with the presence of excavations and obvious loss of material and/or large or deep pitting

Table 2. Categories based on the degree of corrosion observed.

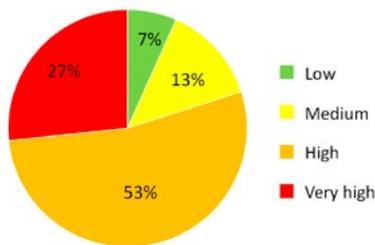


Figure 9. Distribution of the water line elements according to their criticality index.

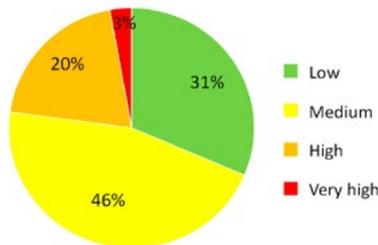


Figure 10. Distribution of the sludge line elements according to their criticality index.

The number of elements of each of the classes of this partition is represented in percentage terms in figure 9, for the water line elements, and in figure 10, for the sludge line elements.

3.5. Combined effect of functional criticality and corrosion exposure

As shown in table 2, the criteria evaluated to determine the functional criticality of each of the plant elements only take into consideration their effect on the service, but not the level of exposure to corrosion and, consequently, the

risk associated with said exposure. The combined effect of both factors will be obtained by applying the same MCCE methodology, previously used to calculate functional criticality, giving the same weight to both factors.

Since both factors move on a scale from 0 to 100 (figure 7 and equation 1), the effect of both factors, or combined criticality, is obtained as a semi-sum of both values, resulting in the distribution of values shown in figure 11. It is, therefore, an aggregative method with identical weights for both

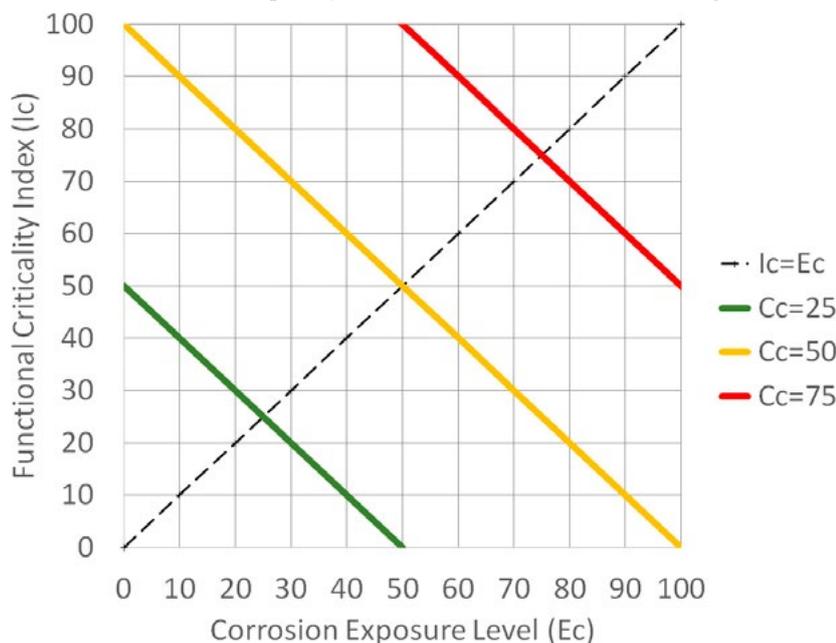


Figure 11. Combined criticality (Cc).

factors (Gómez de León et al., 2023), where the combined criticality takes values between 0 and 100, which is easily interpretable in relative terms.

Figure 11 shows three lines corresponding to the points on the graph whose combined criticality (Cc) has a value of 25 (green line), 50 (orange line) and 75 (red line). These three lines delimit four areas that make it easier to group the elements of the installation into blocks to set preventive routines with different periodicities to be applied to each of the elements of the installation depending on its combined criticality.

Table 3 shows an example of the results obtained in some elements of the water line after applying the complete methodology set out in the WWTP, while table 4 shows an example with the combined criticality obtained for some elements of the sludge line.

4. Discussion: Planning preventive measures

Although a predictive maintenance plan is followed in the WWTP under study, it applies only to dynamic equipment: motors, pumps, fans, blowers, compressors, etc., plant components whose operation is essential to carry out the entire purification process. Due to the nature of its function, its rate of deterioration, that is, its frequency of failure, is clearly higher than that of the static elements or equipment of the installation, such as pipes, supports, flanges, metal structures, etc. In addition, periodic preventive maintenance reviews are carried out at the plant. It was precisely as a result of these reviews that the advanced state of deterioration due to corrosion of some parts of the plant was detected, as well as the dispersion of its effects, which launched and formed the work team described in section 6 and the project of the work summarized here.

The results of the study carried out were useful not only to determine the criticality of the equipment, from the point of view of risk to the effects of corrosion, but also made it possible to analyse in detail the status of the entire plant, as well as reveal the convenience of carrying out certain corrective maintenance actions in some of the elements of the plant.

The result was a table with all the specific actions to be carried out on the

Element	Unit	Location	Funcional criticality (%)	Corrosion exposure	Combined criticality
Plate securing the actuator to the ground	Sluice-gate actuator (Well 1)	Pretreatment	47.12	50	48.56
Rails of the sand removal mobile bridge	Sand and grease removal stages.	Pretreatment	36.54	50	43.27
Pump 1 support-guide structure (Well 1)	Raw water inlet (Well 1)	Pretreatment	63.38	30	46.69
Bridge crane support beams	Bridge crane	Lamellar Decantation	49.04	100	74.52
Tramex floor of the entrance to the building.	Tramex (building entrance)	Decantation building	49.04	50	49.52
Pressurized air pipe to biological reactor	Aeration of the biological reactor	Biological Reactor	40.38	15	27.69
Supernatant purge pipes and valves	Decanters	Biological Reactor	34.62	25	29.81

Table 3. Combined criticality of some elements of the water line.

Element	Unit	Location	Funcional criticality (%)	Corrosion exposure	Combined criticality
External structure of rotating sieve	Primary sludge sieving	Sludge line	6.73	10	8.36
Compactor screw structure	Dehydration	Dehydration	30.77	10	20.38
Sludge thickener support structure	Thickeners	Dehydration	40.38	25	32.69
Flanges on digesters	Digesters	Sludge line	53.70	15	34.35
Flotation pipelines	Floating line towards dehydration	Sludge line	53.85	50	51.92

Table 4. Combined criticality of some elements of the sludge line.

Element	Unit	Location	Combined criticality	Proposed corrective actions
Tramex floor of the entrance to the building.	Tramex (building entrance)	Decantation building	49.52	Gradual replacement of metal gratings with GRP ones
Plate securing the actuator to the ground	Sluice-gate actuator (Well 1)	Pretreatment	48.56	Cleaning affected surfaces and repainting. Put insulating washers on screws and nuts
Bridge crane support beams	Bridge crane	Lamellar Decantation	74.52	Repaint surfaces. Place a test gauge to estimate the rate of corrosion
External structure of rotating sieves	Primary sludge sieving	Sludge line	8.36	Only the corresponding biannual inspection
Flanges on digesters	Digesters	Sludge line	34.35	Install monitored biogas leak detector sensors
Flotation pipelines	Floating line towards dehydration	Sludge line	51.92	Replace with polyethylene pipes

Table 5. Corrective measures to be carried out in some elements of the plant.

affected elements of the plant. Table 5 shows, as an illustrative example, the actions to be carried out on some of the elements shown in tables 3 and 4. In addition, the work team agreed to include, within its catalogue of Preventive Work Orders of the plant, periodic reviews of these elements to evaluate their status and evolution, that is, their degree of affectation by

corrosion. While waiting to observe the results of the first reviews, it was decided to schedule them on an annual basis for all those elements that had obtained a combined criticality greater than 50 and on a biannual basis for those that had a lower criticality.

5. Conclusions

Corrosion in the equipment and facilities

of a wastewater treatment plant (WWTP) constitutes a severe problem that causes enormous losses. It represents a danger to the environment if an uncontrolled discharge of wastewater occurs due to the failure of essential elements of the purification process and, even more serious, it can cause unforeseen accidents due to “apparently” sudden breaks. Therefore, determining the causes of

corrosive processes in the plant is the first step to implement preventive measures that minimize their impact and reduce the possibility of unforeseen breakdowns and accidents to the minimum possible. As demonstrated by the study carried out in a WWTP, given the nature of its operation, the agents that most contribute to triggering the corrosive phenomenon are water, with the consequent high level of humidity in the plant, and high concentrations of hydrogen sulphide, H₂S, whose joint effect generates sulfuric acid as a product, a highly aggressive substance that deteriorates equipment, structures and facilities at high speed. Using concentration maps of both agents throughout the plant, and their subsequent superimposition, an assessment of the level of exposure to corrosion in each area of the plant can be obtained. A discrete scale of values ranging from 0 to 100 has been used, which represent the two extreme situations, that is, a negligible exposure level and the maximum exposure level of the plant, respectively. In this way, it is possible to know which parts, equipment and structures of the plant are most exposed to corrosive phenomena. To establish a plan of preventive measures against maintenance, given that the resources allocated to maintenance are always limited, the above information was combined with the criticality of each of the equipment and elements of the plant. In this way, the most urgent measures, as well as the most far-reaching, can be concentrated on the most critical equipment, the failure of which would have the worst consequences for people, the environment and the economic consequences for the plant. To classify the equipment according to its functional criticality, the MCCE (Multi-Criteria Classification of Critical Equipment) method has been used. The joint evaluation of the functional criticality of the equipment together with its level of exposure to corrosion results in a percentage value of combined criticality for each of the equipment and elements under analysis, which facilitates decision making when establish periodic preventive maintenance programs, as well as priorities when adopting corrective measures in each of them.

References

- Ávila Mendoza J, Genescá J (1995). La corrosión en la vida diaria. Más allá de la herrumbre (I). Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa. Biblioteca Digital. La ciencia para todos. México. Available in: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/09/htm/sec_6.html (Consulted April 4 2023).
- Bethencourt M, García de Lomas J, Corzo A, Villahermosa D, Matres V (2010). Efecto de la biopelícula en la corrosión de aceros inoxidable. *Revista de metalurgia*, 46(1): 37-51.
- Crespo J (2022). El problema de la corrosión y su implicancia en pérdidas económicas para la industria. Available in: <https://www.linkedin.com/pulse/el-problema-de-la-corrosion-y-su-implicancia-en-p%C3%B3rdidas--1e/> (Consulted April 14 2023).
- EMUASA (2023). Aguas de Murcia. Available in: <https://www.emuasa.es/depuracion> (Consulted April 14 2023).
- García-Delgado BM, Corvo-Pérez FE, Moo-Yam VM (2015). Generación de conocimiento para la medición continua y a distancia de la corrosión. Uso de la información de patentes. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 46: 152-160.
- Genescá Llongueras J (1994). Más allá de la herrumbre, III. Corrosión y medio ambiente. Fondo de Cultura Económica (FCE). México.
- Gómez de León Hijos FC, Alcaraz Lorente D (2004). Manual básico de corrosión para ingenieros. Servicio de publicaciones de la Universidad de Murcia, Murcia. ISBN 84-8371-506-6.
- Gómez de León Hijos FC, Ruiz Cartagena JJ (2006). Maintenance strategy based on a multicriterion classification of equipments. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(4): 444-451.
- Gómez de León FC, Sánchez Robles J, Martínez García FM, Alarcón García M (2023). Dynamic management of periodicity between measurements in predictive maintenance. *Measurement* 213: 112721.
- Gómez Fernández JC (2004). El problema de la corrosión. Academia de Ciencias de la Región de Murcia (um.es). Available in: <https://www.um.es/acc/el-problema-de-la-corrosion/> (Consulted April 14 2023).
- iAgua (2012). Smart Water Magazine. Available in: <https://www.iagua.es/data/infraestructuras/edar/murcia-este> (Consulted April 14 2023).
- INE (2022). Población del municipio de Murcia. Available in: <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2883> (Consultado el 14 de abril de 2023).
- INNOTEC Laboratorios (2021). La importancia y características de las aguas residuales. 17 de junio de 2021. Available in: <https://www.innotec-laboratorios.es/la-importancia-y-caracteristicas-de-las-aguas-residuales/> (Consulted April 14 2023).
- INSST. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (2017). Documento 024. Limpieza y mantenimiento en espacios confinados de estaciones depuradoras de aguas residuales: exposición a sulfuro de hidrógeno. Available in: <https://www.insst.es/stp/basequim/024-limpieza-y-mantenimiento-en-espacios-confinados-de-estaciones-depuradoras-de-aguas-residuales-exposicion-a-sulfuro-de-hidrogeno-2017> (Consulted March 15 2023).
- Loto CA (2017). Microbiological corrosion: mechanism, control and impact—a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer 92(9-12): 4241-4252.
- Marín Galvín R (2011). Corrosión y agresividad en aguas residuales. Mecanismos, ejemplos y costes. *Tecno ambiente: Revista profesional de tecnología y equipamiento de ingeniería ambiental*, 21(219): 15-24.
- Tchobanoglous G, Burton FL (1998). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. McGraw-Hill. Madrid.
- Vicepresidencia tercera del Gobierno. Ministerio para la Transición Ecológica y el reto demográfico (2023). Anteproyecto, estudio de impacto ambiental y seguimiento y gestión de la evaluación de impacto ambiental que corresponda de las obras de ampliación de la EDAR Murcia-Este. Available in: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/actuaciones/Murcia%20Este.aspx> (Consulted April 14 2023).

NORMAS DE PUBLICACIÓN

Técnica Industrial, fundada en 1952 y editada por la Fundación Técnica Industrial, se define como una publicación técnica de periodicidad cuatrimestral en el ámbito de la ingeniería industrial. Publica tres números al año (marzo, julio y noviembre) y tiene una versión digital accesible en www.tecnicaindustrial.es. Los contenidos de la revista se estructuran en torno a un núcleo principal de artículos técnicos relacionados con la ingeniería, la industria y la innovación, que se complementa con información de la actualidad científica y tecnológica y otros contenidos de carácter profesional y humanístico.

Técnica Industrial. Revista de Ingeniería, Industria e Innovación pretende ser eco y proyección del progreso de la ingeniería industrial en España y Latinoamérica, y, para ello, impulsa la excelencia editorial tanto en su versión impresa como en la digital. Para garantizar la calidad de los artículos técnicos, su publicación está sometida a un riguroso sistema de revisión por pares (peer review). La revista asume las directrices para la edición de revistas científicas de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (Fecyt) y las del International Council of Scientific Unions (ICSU), con el fin de facilitar su indexación en las principales bases de datos y ofrecer así la máxima visibilidad y el mayor impacto científico de los artículos y sus autores.

Técnica Industrial considerará preferentemente para su publicación los trabajos más innovadores relacionados con la ingeniería industrial. Todos los artículos técnicos remitidos deben ser originales, inéditos y rigurosos, y no deben haber sido enviados simultáneamente a otras publicaciones. Sus autores son los únicos responsables de las afirmaciones vertidas en los artículos. Todos los originales aceptados quedan como propiedad permanente de *Técnica Industrial*, y no podrán ser reproducidos en parte o totalmente sin su permiso. El autor cede, en el supuesto de publicación de su trabajo, de forma exclusiva a la Fundación Técnica Industrial, los derechos de reproducción, distribución, traducción y comunicación pública (por cualquier medio o soporte sonoro, audiovisual o electrónico) de su trabajo.

Tipos de artículos La revista publica artículos originales (artículos de investigación que hagan alguna aportación teórica o práctica en el ámbito de la revista), de revisión (artículos que divulguen las principales aportaciones sobre un tema determinado), de innovación (artículos que expongan nuevos procesos, métodos o aplicaciones o bien aporten nuevos datos técnicos en el ámbito de la ingeniería industrial) y de opinión (comentarios e ideas sobre algún asunto relacionado con la ingeniería industrial). Además, publica un quinto tipo de artículos, el dossier, un trabajo de revisión sobre un tema de interés encargado por la revista a expertos en la materia.

Redacción y estilo El texto debe ser claro y ajustarse a las normas convencionales de redacción y estilo de textos técnicos y científicos. Se recomienda la redacción en impersonal. Los autores evitarán el abuso de expresiones matemáticas y el lenguaje muy especializado, para así facilitar la comprensión de los no expertos en la materia. Las mayúsculas, negritas, cursivas, comillas y demás recursos tipográficos se usarán con moderación, así como las siglas (para evitar la repetición excesiva de un término de varias palabras se podrá utilizar una sigla a modo de abreviatura, poniendo entre paréntesis la abreviatura la primera vez que aparezca en el texto). Las unidades de medida utilizadas y sus abreviaturas serán siempre las del sistema internacional (SI).

Estructura Los trabajos constarán de tres partes diferenciadas:

1. Presentación y datos de los autores. El envío de artículos debe hacerse con una carta (o correo electrónico) de presentación que contenga lo siguiente: 1.1 Título del artículo; 1.2 Tipo de artículo (original, revisión, innovación y opinión); 1.3 Breve explicación del interés del mismo; 1.4 Código Unesco de cuatro dígitos del área de conocimiento en la que se incluye el artículo para facilitar su revisión (en la página web de la revista figuran estos códigos); 1.5 Nombre completo, correo electrónico y breve perfil profesional de todos los autores (titulación y posición laboral actual, en una extensión máxima de 300 caracteres con espacios); 1.6 Datos de contacto del autor principal o de correspondencia (nombre completo, dirección postal, correo electrónico, teléfonos y otros datos que se consideren necesarios). 1.7 La cesión de los derechos al editor de la revista. 1.8 La aceptación de estas normas de publicación por parte de los autores.

2. Texto. En la primera página se incluirá el título (máximo 60 caracteres con espacios), resumen (máximo 250 palabras) y 4-8 palabras clave. Se recomienda que el título, el resumen y las palabras clave vayan también en inglés. Los artículos originales deberán ajustarse en lo posible a esta estructura: introducción, material y métodos, resultados, discusión y/o conclusiones, que puede re-

producirse también en el resumen. En los artículos de revisión, innovación y opinión se pueden definir los apartados como mejor convenga, procurando distribuir la información entre ellos de forma coherente y proporcionada. Se recomienda numerar los apartados y subapartados (máximo tres niveles: 1, 1.2, 1.2.3) y denominarlos de forma breve.

1.1 Introducción. No debe ser muy extensa pero debe proporcionar la información necesaria para que el lector pueda comprender el texto que sigue a continuación. En la introducción no son necesarias tablas ni figuras.

1.2 Métodos. Debe proporcionar los detalles suficientes para que una experiencia determinada pueda repetirse.

1.3 Resultados. Es el relato objetivo (no la interpretación) de las observaciones efectuadas con el método empleado. Estos datos se expondrán en el texto con el complemento de las tablas y las figuras.

1.4 Discusión y/o conclusiones. Los autores exponen aquí sus propias reflexiones sobre el tema y el trabajo, sus aplicaciones, limitaciones del estudio, líneas futuras de investigación, etcétera.

1.5 Agradecimientos. Cuando se considere necesario se citará a las personas o instituciones que hayan colaborado o apoyado la realización de este trabajo. Si existen implicaciones comerciales también deben figurar en este apartado.

1.6 Bibliografía. Las referencias bibliográficas deben comprobarse con los documentos originales, indicando siempre las páginas inicial y final. La exactitud de estas referencias es responsabilidad exclusiva de los autores. La revista adopta el sistema autor-año o estilo Harvard de citas para referenciar una fuente dentro del texto, indicando entre paréntesis el apellido del autor y el año (Apple, 2000); si se menciona más de una obra publicada en el mismo año por los mismos autores, se añade una letra minúscula al año como ordinal (2000a, 2000b, etcétera). La relación de todas las referencias bibliográficas se hará por orden alfabético al final del artículo de acuerdo con estas normas y ejemplos:

1.6.1 Artículo de revista: García Arenilla I, Aguayo González F, Lama Ruiz JR, Soltero Sánchez VM (2010). Diseño y desarrollo de interfaz multifuncional holónica para audioguía de ciudades. *Técnica Industrial* 289: 34-45.

1.6.2 Libro: Roldán Vloria J (2010). Motores trifásicos. Características, cálculos y aplicaciones. Paraninfo, Madrid. ISBN 978-84-283-3202-6.

1.6.3 Material electrónico: Anglia Ruskin University (2008). University Library. Guide to the Harvard Style of Referencing. Disponible en: http://libweb.anglia.ac.uk/referencing/files/Harvard_referencing.pdf. (Consultado el 1 de diciembre de 2010).

3. Tablas y figuras. Deben incluirse solo las tablas y figuras imprescindibles (se recomienda que no sean más de una docena). Las fotografías, gráficas e ilustraciones se consideran figuras y se referenciarán como tales. El autor garantiza, bajo su responsabilidad, que las tablas y figuras son originales y de su propiedad. Todas deben ir numeradas, referenciadas en el artículo (ejemplo: tabla 1, figura 1, etc.) y acompañadas de un título explicativo. Las figuras deben ser de alta resolución (300 ppp), y sus números y leyendas de un tamaño adecuado para su lectura e interpretación. Con independencia de que vayan insertas en el documento del texto, cada figura debe remitirse, además, en un fichero aparte con la figura en su formato original para que puedan ser editados los textos y otros elementos.

Extensión Para los artículos originales, de revisión y de innovación, se recomienda que la extensión del texto no exceda las 15 páginas de 30 líneas a doble espacio (letra Times de 12 puntos; unas 5.500 palabras, 32.000 caracteres con espacios). No se publicarán artículos por entregas.

Entrega Los autores remitirán sus artículos a través del enlace Envío de artículos de la página web de la revista (utilizando el formulario de envío de artículos técnicos), en el que figuran todos los requisitos y campos que se deben rellenar; de forma alternativa, se pueden enviar al correo electrónico cogitii@cogitii.es. Los autores deben conservar los originales de sus trabajos, pues el material remitido para su publicación no será devuelto. La revista acusará recibo de los trabajos remitidos e informará de su posterior aceptación o rechazo, y se reserva el derecho de acortar y editar los artículos.

Técnica Industrial no asume necesariamente las opiniones de los textos firmados y se reserva el derecho de publicar cualquiera de los trabajos y textos remitidos (informes técnicos, tribunas, información de colegios y cartas al director), así como el de resumirlos o extraerlos cuando lo considere oportuno. Los autores de las colaboraciones garantizan, bajo su responsabilidad, que las fotos, tablas y figuras son originales y de su propiedad.

Análisis técnico y funcional de un sistema de elevación de agua de la época romana

Technical and functional analysis of a water lifting system from Roman times

Ana María Gómez Amador¹, Álvaro Joya Machado¹, Leopoldo Prieto Fernández¹, Alejandro Quesada González¹, Juan José Jiménez de Cisneros Fonfría², Higinio Rubio Alonso¹

Resumen

Se ha realizado el modelado geométrico mediante un programa CAD y un análisis mecánico de un sistema ideado hace, aproximadamente, 2.000 años por el ingeniero romano Vitruvio. El mecanismo denominado paternóster o patenotre es un sistema de bombeo vertical que se asemeja a un rosario. Cuenta con un sistema de tracción tipo cuerda con nudos o discos que empuja el agua a través de un tubo por la fuerza de una rueda en la parte superior del pozo o lugar de trabajo. Se ha utilizado el programa de diseño asistido por ordenador, Solid Edge, en su versión 2020 para obtener el modelo tridimensional del mecanismo romano y su documentación detallada de bocetos y visualización geométrica. El modelo se basa en el sistema de escalado autónomo de las minas de sal de Leninz en Gipuzkoa, España, así como en el sistema de accionamiento manual de las minas de sal de Wieliczka en Cracovia, Polonia. El modelado 3D del sistema permite explicar el montaje y el funcionamiento mecánico de este invento vitruviano, y muestra tanto su sencillez y originalidad como su fiabilidad.

Después de modelar y ensamblar el mecanismo, este se estudia en condiciones mecánicas de trabajo. Por tanto, el modelo a escala se somete a un análisis de semejanza mediante trabajos de carga sobre los elementos principales del sistema, analizando los factores de fuerza y sus efectos sobre el eje. Al mismo tiempo, el estudio permite recrear el modelo utilizando una escala diferente y aplicar las fórmulas para obtener las condiciones de trabajo adecuadas para el análisis de semejanza.

Palabras clave

Modelado, sistema elevación de agua, bombeo de agua en minas, análisis de semejanza.

Abstract

Geometric modeling has been carried out using a CAD program, and also a mechanical analysis of a system designed, approximately, 2000 years ago by the Roman engineer Vitruvius. The mechanism, called paternoster or patenotre, is a vertical pumping system that resembles a rosary. This has a rope-type traction system with knots or discs that pushes water through a tube by the force of a wheel at the top of the well or workplace. The computer-aided design program, Solid Edge, in its 2020 version, has been used to obtain the three-dimensional model of the Roman mechanism and its detailed documentation of sketches and geometric visualization. The model is based on the autonomous scaled system in the Leninz salt mines in Gipuzkoa, Spain, as well as the manual drive system of the Wieliczka salt mines in Krakow, Poland. The 3D modeling of the system allows us to explain the assembly and mechanical operation of this Vitruvian invention, showing both its simplicity and originality, as well as its reliability.

After modeling and assembling the mechanism, it is studied under mechanical working conditions. Therefore, the scale model is subjected to a similarity analysis through load work on the main elements of the system, analyzing the force factors and their effects on the axis. At the same time, the study allows the model to be recreated by using a different scale and the formulas to be applied to obtain the appropriate working conditions for the similarity analysis.

Keywords

Modeling, water lifting system, pumping water in mines, similarity analysis.

Recibido/received: 01/06/2023 Aceptado/accepted: 10/10/2023

¹Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid.

² Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera. Universidad de Jaén.

Autor para correspondencia: Ana María Gómez Amador; e-mail: amgomez@ing.uc3m.es



Mecanismo de Leintz Gatzaga. (Fuente: Museo de la Sal, en Gipuzkoa).

1. Introducción

Se suele admitir que, durante la historia de la humanidad, todo proceso bélico impulsa el desarrollo o el avance científico en todas las áreas de conocimiento. El desarrollo de modelos CAD (Computer Aided Design) comenzó con la Guerra Fría (segunda mitad del siglo XX) (Landes, 1987) y hoy continúan desarrollándose nuevos módulos (Marchante, 2020; Jaycon Systems, 2022). Muchas técnicas de diseño en tres dimensiones o vectoriales, entre otras, tienen su origen en programas o aplicaciones de modelado CAD. Con el tiempo, estos modelos han evolucionado gracias al impulso de la industria, en particular de las industrias automotriz y aeroespacial, y debido a la innovación de ingenieros con un fuerte enfoque en el desarrollo de nuevas técnicas de modelado. De acuerdo con M. Groover (2013) se trata de “una tecnología enfocada al uso de computadoras digitales para llevar a cabo ciertas funciones en diseño y producción”. La gran ventaja de este tipo de programas, y que ha hecho posible el desarrollo de este trabajo, es la adaptación para cambios en escalas, modificaciones del modelo o adecuaciones a las medidas requeridas por el fabricante. Por tanto, el enfoque principal del desarrollo de programas CAD es facilitar la creación de componentes mediante modelos computarizados con elevada repetitividad y baja

inversión en prototipos, cambios o desechos. Los ingenieros pueden desarrollar componentes y modelos completos de máquinas o herramientas que, si se produjeran mediante métodos tradicionales de la época industrial, requerirían mayor inversión tanto económica como en tiempo.

Actualmente, para aumentar la precisión y la eficacia en la producción se utilizan softwares avanzados para diseñar componentes, subconjuntos y sistemas de manera integrada. Estos softwares permiten la creación de sistemas complejos con características mecánicas, eléctricas o electrónicas, y el análisis de los componentes y sistemas en función de sus propiedades (Rosamond, 2020; Marchante, 2020). Para el desarrollo del presente trabajo se ha utilizado fabricación aditiva o impresión 3D (Andújar, 2016; 3DSouced, 2021; Cubo, 2016; E3D, 2020).

Los avances tecnológicos son innegables (software, impresión 3D, etc.), pero nada habría sido posible sin los “inventores”, figuras históricas que diseñaron utilizando técnicas que hoy en día son usadas por los softwares de diseño asistido. Polímatas como Leonardo da Vinci, Herón de Alejandría y Arquímedes de Siracusa desafiaron las leyes conocidas y crearon mecanismos o estructuras revolucionarias. Las civilizaciones antiguas contaban con instrumentos capaces de lograr pre-

cisiones de diseño que habrían sido inimaginables en su tiempo. Los primeros intentos documentados de mecanizar el transporte vertical de agua se remontan al siglo XVI. Sin embargo, se sabe que las civilizaciones antiguas tenían mecanismos capaces de cumplir las funciones

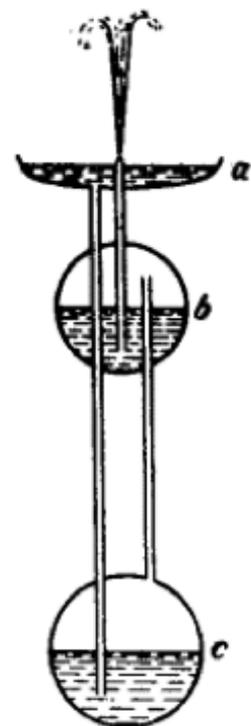


Figura 1. Esquema de las fuentes de Herón.

requeridas para trabajos de extracción de minerales o de pozo. En cuanto a los sistemas hidráulicos, la civilización minoica destacó en el dominio de técnicas de regadío y otros sistemas como cisternas, pozos, acueductos y manantiales. Matemáticos, arquitectos e ingenieros diseñaron sistemas hidráulicos a gran escala, como el desagüe de Copais, el túnel de abastecimiento de la isla de Samos y el canal de Halis (Argudo, 2019).

Arquímedes inventó la primera bomba de agua con su "tornillo de Arquímedes" en el siglo III a.C., aunque ya había sido utilizado por el rey Senaquerib de Asiria cuatro siglos antes. La máquina es un sistema gravimétrico helicoidal que eleva grandes cantidades de agua o materiales (Instrumentos de Medición, 2022). Herón de Alejandría inventó la fuente y la aeolipila, una cámara hueca que se suspende sobre un eje entre dos tuberías verticales y que es la invención precursora de la máquina de vapor. La fuente es el sistema que más se relaciona con un mecanismo de elevación de agua y funciona con presiones de aire y agua, haciendo que el líquido suba por un tubo y salga verticalmente siguiendo el esquema de la figura 1 (OEPM, 2016).

Juanelo Turriano, uno de los mayores ingenieros del Renacimiento español, asesoró a los técnicos e ingenieros del rey en la construcción de presas y canales en la segunda mitad del siglo XVI. Después de concluir sus trabajos, el ingeniero Turriano conocido como el "Arquímedes renacentista", se trasladó a Castilla-La Mancha y allí creó el artificio de Toledo

en 1569, un sistema de elevación de agua basado en el movimiento en balancín. Este sistema consistía en diferentes tubos sujetos en su centro a un eje vertical con un cuenco recolector en un extremo y un orificio de salida en el otro, y se utilizó en una estructura completa que incluía una rueda de cangilones en la primera etapa y las torres de cazos en la segunda. El movimiento del semicírculo superior del artificio de Toledo afectaba al equilibrio del balancín, haciendo que el líquido se desplazara de extremo a extremo, depositando el agua en el siguiente nivel (Lerma et al., 2019).

2. El paternóster romano

En el siglo XVI se documentan los primeros intentos de mecanización del transporte vertical de agua, pero se sabe que las antiguas civilizaciones contaban con mecanismos para extraer agua en minas inundadas. Así, los romanos utilizaban para la extracción de agua un mecanismo denominado paternóster o patenotre, que tenía una cadena de nudos de cuero o discos de madera. De ahí su similitud con el rosario y la asociación del nombre al sistema. Su descripción se puede encontrar en obras del siglo XVI como *De reta metallica* libro XII, de Georgii Agricolae (1556), así como en el libro titulado *Los veintidós libros de los ingenios y de las máquinas*, en el que se detalla su funcionamiento y se hace referencia a su construcción, ilustrando el mecanismo como se muestra en la figura 2 (Lerma et al., 2019; Lastanosa, 1600).

El arquitecto, escritor e ingeniero

más renombrado del siglo I a.C., Vitruvio, no dejó ningún documento sobre la creación de una máquina como la descrita anteriormente. Sin embargo, hay una gran cantidad de referencias a su trabajo en ese momento (Ortiz y Sanz, 1787). La importante relación que muestra el sistema de rosario o patenotre con una rueda de cadena de cubos, transportando agua a través de una rueda motriz mediante un sistema de cuerdas y enlaces, ha provocado que la gente asuma que Vitruvio fue el creador, sin haber expuesto sus ideas en un escrito conocido.

No obstante, la utilización del sistema patenotre en el siglo XVI tuvo un gran impacto en minas y pozos a lo ancho del continente europeo (Ugalde, 2010). El mecanismo era fácil de montar y de manejar, lo que lo convertía en una herramienta valiosa para elevar aguas a profundidades de hasta 60 metros. Los mineros ya no tenían que cargar vasijas de agua ni utilizar poleas con cubetas, sino que contaban con un sistema de bombeo continuo que les permitía desalojar cámaras completas para evitar posibles colapsos debido a la humedad o al peso del líquido. El funcionamiento se basaba en la impermeabilidad entre los nudos o discos de la cadena y el interior del conducto de elevación del líquido. Gracias al sellado con las paredes del tubo, el agua subía con el movimiento circular de la cuerda y quedaba atrapada en las paredes del tubo. Sin embargo, el inconveniente radicaba en la resistencia de los discos en el interior del tubo, lo que reducía la estanqueidad y, por tanto, la eficacia del sistema. Además, se pro-

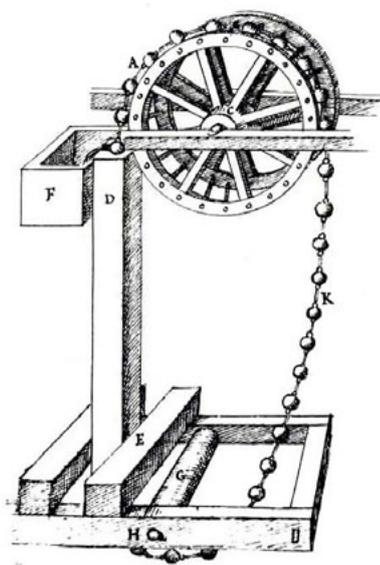


Figura 2. Ilustración del sistema según Turriano (Lastanosa, 1600).



Figura 3. Paternóster: a) mecanismo de Leintz Gatzaga; b) mecanismo de Wieliczka.

ducía corrosión debido al entorno salino en el que se utilizaba. En consecuencia, con el desarrollo de nuevos mecanismos, este sistema fue reemplazado, excepto en algunas minas de sal. En la actualidad, se pueden encontrar máquinas como la descrita anteriormente en el museo de la sal de Leintz Gatzaga en Gipuzkoa, España, (fig. 3a) y en las minas de sal de Wieliczka en Cracovia, Polonia (fig. 3b).

Aunque la maquinaria utilizada en el museo de la sal y en las minas de sal funciona de manera similar y se utiliza para el mismo propósito, su sistema de propulsión es diferente. En el museo, se emplea la fuerza de un río y una rueda que arrastra una cadena para elevar el líquido salino a una altura de ocho metros, mientras que, en las minas, dos trabajadores operan un sistema manual para elevar el agua a una altura de 60 metros. Después de analizar ambos mecanismos, se decidió enfocar el presente estudio en el mecanismo autónomo utilizando la fuerza del río.

3. Modelado 3D

3.1. Vista global

El patenotre romano es un mecanismo hidráulico del que se carece de información precisa sobre sus dimensiones o componentes necesarios para su funcionamiento. A lo largo de los siglos, diversas civilizaciones han incorporado este sistema a otros mecanismos de elevación de agua, y han logrado desarrollar una versión funcional como la presente en Gipuzkoa y Wieliczka. Mediante el análisis de imágenes y la ampliación de fotografías, se han conseguido modelar las diferentes partes del mecanismo, teniendo en cuenta las referencias de Vitrubio sobre el uso de la rueda de agua y la cadena con pletinas. En la figura 4, se

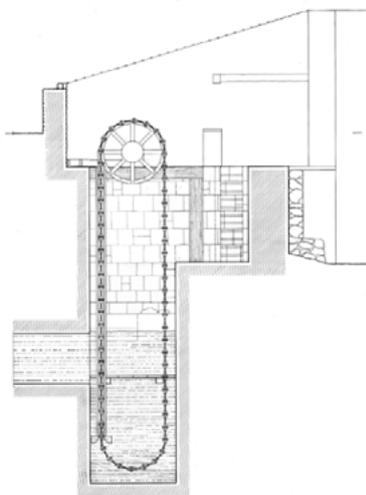


Figura 4. Plano del alzado del sistema (Ugalde, 2010).

muestra un borrador del mecanismo sin dimensiones establecidas (Ugalde, 2010). Para poder asignar unas dimensiones se ha considerado el uso de la rueda hidráulica y la cadena de rosario.

Es un mecanismo de montaje simple, pero la complejidad radica en la cadena que porta los elementos de estanqueidad para arrastrar el agua y que se coloca sobre la rueda tractora. La longitud de esta cadena depende por completo de la altura del sistema sobre el nivel del agua subterránea, lo que afecta directamente al tamaño del tubo colector de agua. Para la realización de este modelo se han tenido en cuenta las dimensiones escaladas del sistema encontrado en Gipuzkoa. En las figuras 5 y 6 se muestra el

conjunto del mecanismo y su explosionada, que permiten visualizar todos los componentes que forman parte del sistema.

3.2. Planos de detalle principales

Para analizar el sistema mecánicamente, es necesario examinar los planos detallados de algunos de sus componentes principales. Así pues, es relevante presentar las dimensiones y las cotas de estos planos para poder estudiar el funcionamiento bajo cargas y movimientos una vez que el sistema esté en uso.

En la figura 7 se muestra el plano detallado de la rueda hidráulica con las dimensiones correspondientes al mecanismo real. El modelo de este componente es fundamental para realizar el análisis de similitud

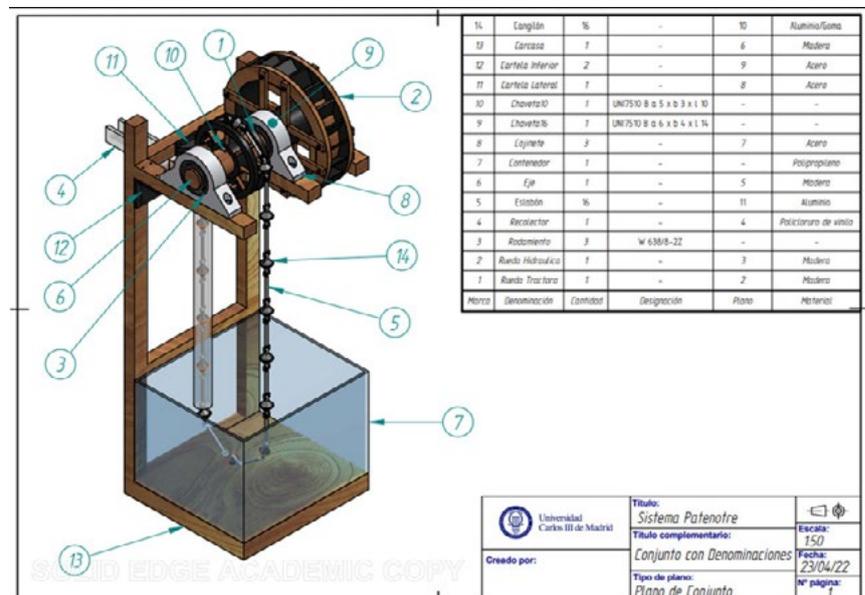


Figura 5. Plano de conjunto del mecanismo.

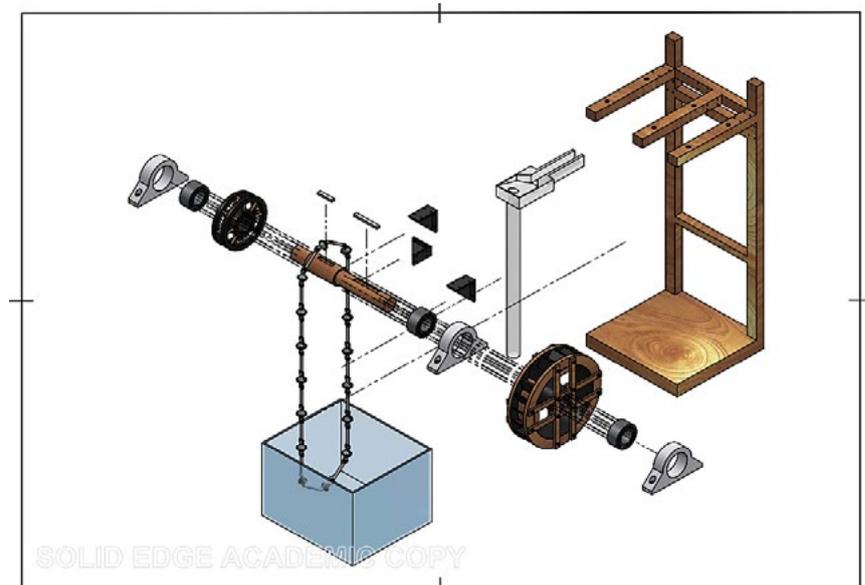


Figura 6. Plano de conjunto explosionado.

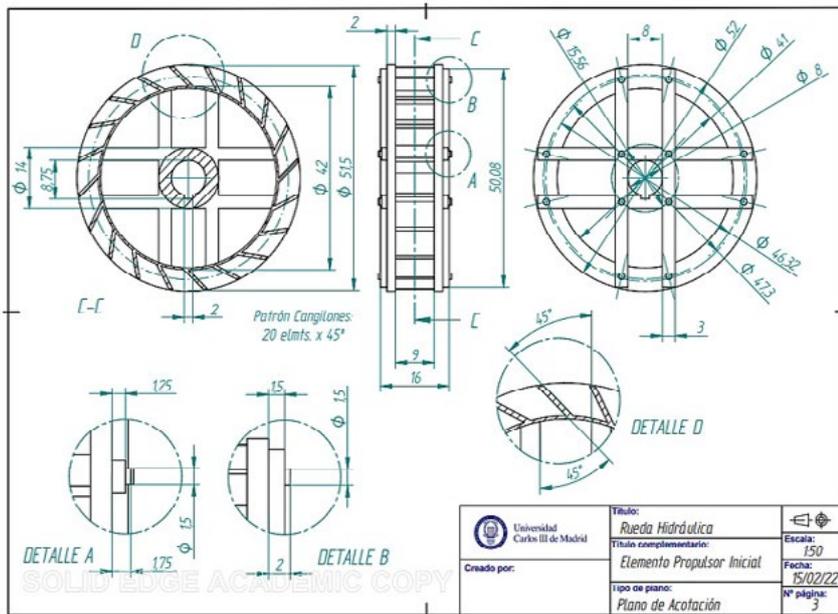


Figura 7. Plano acotado de la rueda hidráulica.

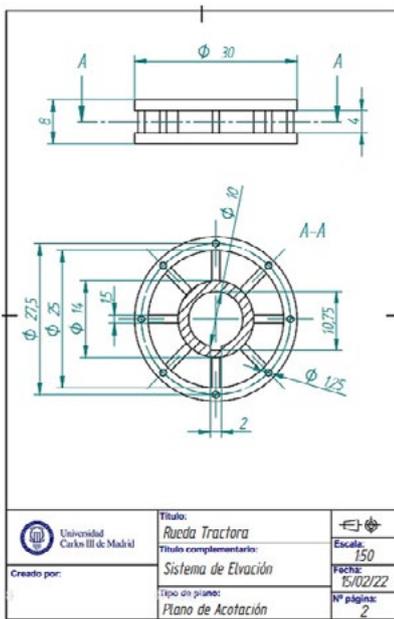


Figura 8. Plano acotado de la rueda tractora.

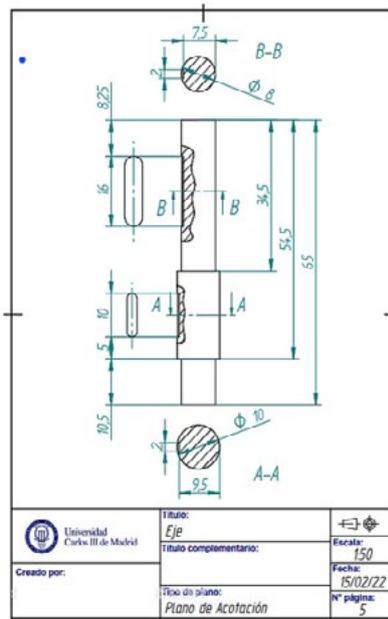


Figura 9. Plano acotado del eje.

y dimensional que se llevará a cabo posteriormente, ya que las medidas del diseño influirán en los resultados finales. Este elemento consta de 20 paletas que recogen el caudal de un río, generan la fuerza motriz del sistema y permiten que la rueda impulsora eleve el líquido desde el nivel freático inferior. La inclusión de la rueda hidráulica hace que sea un sistema autónomo. Se ha de tener en cuenta que este componente puede ser reemplazado por un sistema de propulsión manual o incluso eléctrico, según las condiciones de uso del mecanismo.

En segundo lugar, se incluye el plano detallado de la rueda impulsora del sistema de

elevación de agua ilustrado en la figura 8. El funcionamiento de esta rueda está estrechamente relacionado con el movimiento de la cadena de arrastre del agua y las fuerzas que esta ejerce sobre la rueda.

El tercer elemento que analizar es el eje del sistema. Éste será examinado con mayor detalle dado que se deben tener en cuenta las fuerzas generadas por el movimiento de ambas ruedas, que impactan directamente en el rendimiento y la durabilidad del mecanismo. A través de un estudio de fatiga, se podrá conocer las condiciones de trabajo a las que el modelo podrá ser sometido. En la Figura 9 se presentan las dimensiones del

eje, prestando especial atención a los cambios de diámetro y a los puntos de concentración de tensiones, como los chaveteros. Mediante el análisis de las fuerzas incidentes o provocadas por las ruedas impulsora e hidráulica, así como los puntos de apoyo en los cojinetes, será posible evaluar la vida útil del eje y los coeficientes de seguridad con los que podrá operar.

3.3. Maquetado

Una vez completado el diseño del modelo utilizando el software Solid Edge, se procede a su impresión 3D, como se muestra en la figura 10. Para la fabricación de las piezas del sistema, se utilizó filamento PLA (ácido poliláctico) como material de trabajo. Esto permitió obtener un modelo a escala del paternóster.

En la figura 11 se muestra el detalle de la impresión 3D de las dos ruedas del sistema.

A continuación, se incluye detalle del ensamblaje de la parte superior del conjunto con y sin cadena (fig. 12).

4. Hipótesis de estudio

Un mecanismo propulsado de manera manual, tomando como referencia las indicaciones de la máquina presente en Wieliczka, requeriría de un esfuerzo energético aproximado de 803 kJ/d, cifra realista suponiendo que un operario que trabaja 8 horas diarias puede generar una potencia media de 47 W, lo que se traduce en 1.354 kJ/d. En el caso opuesto, en el que el mecanismo funciona de manera autónoma, como el de Gipuzkoa, la rueda hidráulica debe proporcionar el mismo empuje que el operario para mantener el caudal de elevación en condiciones similares (Ugalde, 2010). En la figura 13, se incluye el modelo de estudio.



Figura 10. Modelo impreso a escala 1:50.

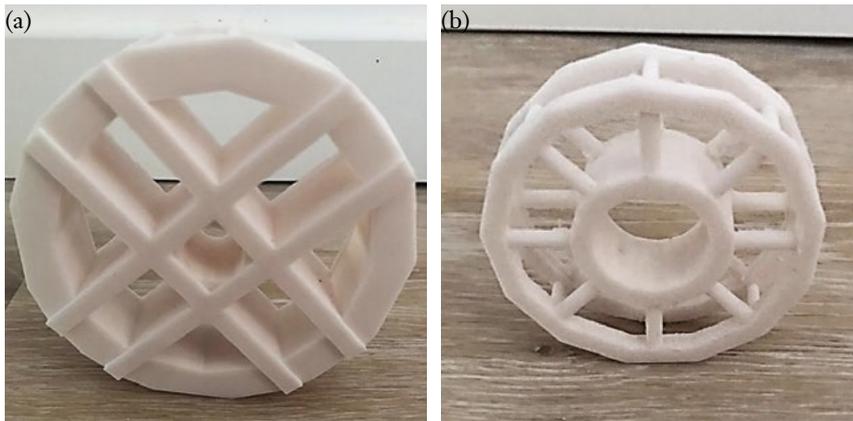


Figura 11. Detalle de impresión: a) Rueda hidráulica y b) rueda tractora.

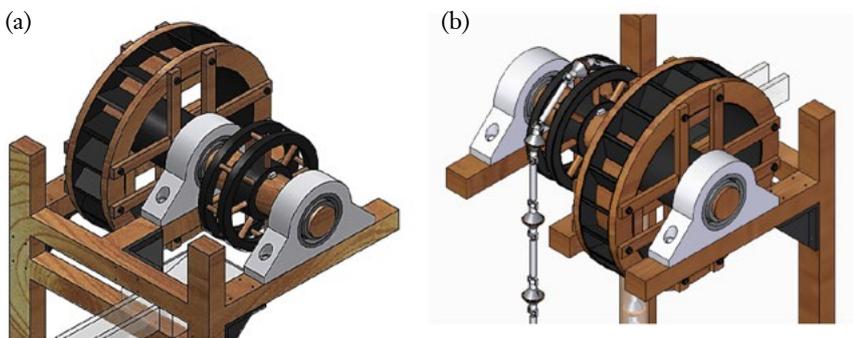


Figura 12. Detalle de montaje de maqueta: a) ensamblaje del eje, las ruedas, los cojinetes laterales y elementos normalizados y b) conjunto completo con cadena.

4.1. Diseño fundamental

Para realizar el análisis del mecanismo, se utilizarán como referencia las dimensiones presentadas en la tabla 1. Estas dimensiones servirán como base para asociar las nuevas condiciones de trabajo al modelo a escala. La fuente de energía que pone en funcionamiento el mecanismo es la energía hidráulica de una corriente de agua que incide con una velocidad de 2,22 m/s sobre la rueda hidráulica, lo que le confiere una velocidad angular de 1,88 rad/s. Mediante la aplicación de la ecuación de Bernoulli (1), se obtiene la fuerza de empuje, que, al multiplicarse por el radio de la rueda, resulta en un par motor de 311 Nm. Como resultado, el mecanismo puede ponerse en marcha, y es el par motor el responsable de mover la rueda y torsionar el eje, con una resistencia equivalente en la zona del rosario del mismo valor (2).

$$F = \frac{1}{2} v^2 \cdot \rho \cdot A = \frac{1}{2} 2,22^2 \cdot 997 \cdot (450 \cdot 237,5) \cdot 10^{-6} = 262,57 \text{ [N]} \quad (1)$$

$$262,57 \cdot \frac{2365}{2} = F_{rosario} \cdot \frac{1375}{2} \rightarrow F_{rosario} = 452 \text{ [N]} \quad (2)$$

El estado tensional refleja que las fuerzas de rosario e hidráulica generan tensiones

normales alternantes, mientras que el torsor genera tensiones cortantes medias.

Teniendo en cuenta los datos proporcionados y siguiendo el método de análisis por semejanza mecánica, se van a determinar las principales variables de funcionamiento de una maqueta a escala. Las variables de velocidades, tanto angulares como lineales, caudales, fuerzas y momentos serán recalculadas bajo condiciones semejantes de uso en la maqueta diseñada. Dado que el estudio se realizará sobre el modelo autónomo, propulsado por la rueda hidráulica, todo se

relacionará con su movimiento y el empuje que esta pueda tener, controlando el caudal de entrada a la maqueta.

5. Semejanza

El concepto de semejanza mecánica implica evaluar un modelo con el objetivo de adaptar las condiciones de uso a un prototipo que sea más fácil de analizar y estudiar. Esto permite a los ingenieros probar sus creaciones en condiciones similares a las que los sistemas reales experimentarán. Para lograrlo, es necesario comprender las unidades de medida básicas que formarán el núcleo de las ecuaciones dimensionales utilizadas para expresar aspectos mecánicos del estudio. Estas magnitudes se aplican posteriormente y se resuelven para obtener resultados aplicables a modelos reales. Se utiliza el metro (L) como unidad de longitud, el segundo (T) como unidad de tiempo y el kilogramo (M) como unidad de masa, que son todas unidades fundamentales de medida, y se relacionan con las magnitudes básicas del problema de estudio, como se muestra en la tabla 2.

Para realizar el análisis del sistema de paternóster, utilizando la semejanza mecánica en el modelo en cuestión, es necesario considerar las dimensiones indicadas en la tabla 2, ya que la relación geométrica será de gran importancia en este estudio. Para ello, se establece la semejanza geométrica comparando las dimensiones de la maqueta con las del sistema real, como se muestra a continuación:

$$\varnothing_{modelo} = \alpha \cdot \varnothing_{real} \quad (3)$$

$$\frac{\varnothing_m}{\varnothing_r} = \alpha \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{47,3}{2365} = 0,02 \quad (5)$$

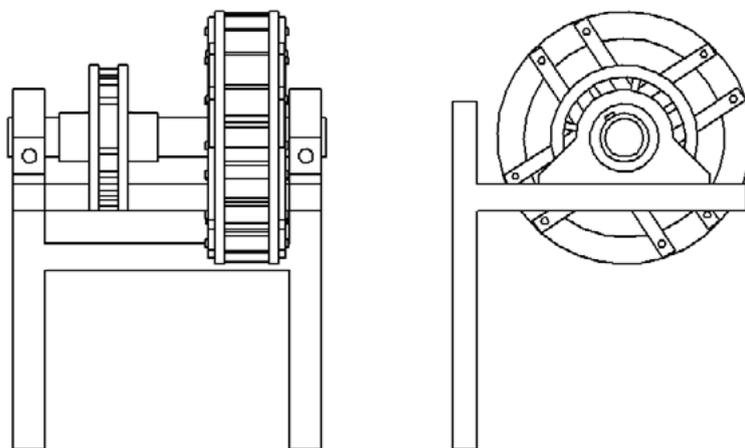


Figura 13. Esquema del sistema para el estudio mecánico.

Variable del diseño	Diseño Real	Dimensión en planos del modelo geométrico (E=1/50)
Diámetro de la rueda hidráulica	2,365 [mm]	47,3 [mm]
Diámetro de la rueda tractora	1,375 [mm]	27,5 [mm]
Diámetro interno del tubo	250 [mm]	5 [mm]
Diámetro inferior del eje	400 [mm]	8 [mm]
Diámetro exterior del eje	500 [mm]	10 [mm]
Velocidad angular (rev/min)	18 [rpm]	-
Velocidad angular (rad/s)	1,88 [rad/s]	-
Velocidad lineal hidráulica	2,22 [m/s]	-
Velocidad lineal del rosario	1,29 [m/s]	-
Fuerza de la rueda hidráulica	263 [N]	-
Fuerza de la rueda de rosario	452 [N]	-
Momento tursor hidráulico	788,56 [N·m]	-
Momento tursor tractor	310,49 [N·m]	-

Tabla 1. Lista de variables de análisis mecánico con dimensiones reales y del modelo

En este caso, el factor toma un valor de 0,02, lo que se puede interpretar como una escala de 1:50, sabiendo que el maquetado tendrá las dimensiones expresadas en los planos de diseño, mientras que el modelo real trabajará en condiciones semejantes.

Establecida la semejanza geométrica del sistema, se procede a analizar su semejanza cinemática en términos de velocidades de trabajo. En este análisis, se relacionan las variables conocidas en condiciones reales y, utilizando la semejanza geométrica previamente establecida, se obtienen las condiciones de trabajo en el modelo a escala. Es decir, la relación fundamental entre las variables se basa principalmente en la relación geométrica entre el modelo y el sistema real. En el contexto del análisis cinemático, se consideran los números de Reynolds y Froude, y este último es el utilizado para resolver el problema en cuestión.

El número de Froude (ecuación 6) considera la velocidad del fluido (V), la gravedad

(g) y la profundidad hidráulica de trabajo (Y). Para la obtención de la velocidad, se iguala el número de Froude del modelo con el sistema real, despejando el cociente de velocidades.

$$Fr_{modelo} = \frac{V_m}{\sqrt{gY_m}} = \tag{6}$$

$$\frac{V_r}{\sqrt{gY_r}} = Fr_{real}$$

$$\frac{V_m}{V_r} = \frac{\sqrt{gY_m}}{\sqrt{gY_r}} = \sqrt{\frac{Y_m}{Y_r}} \tag{7}$$

$$\frac{Y_m}{Y_r} = \frac{\varnothing_m}{\varnothing_r} = \alpha \tag{8}$$

Magnitud	Símbolo	Dimensión
Longitud	l	m
Área	A	m ²
Volumen	V	m ³
Tiempo	t	s
Velocidad	v	m·s ⁻¹
Ángulo	Θ	rad
Velocidad Angular	Ω	rad·s ⁻¹
Masa	m	kg
Densidad	ρ	kg·m ⁻³
Fuerza	F	N
Caudal	Q	m ³ ·s ⁻¹
Par	Mo	N·m

Tabla 2. Dimensiones de magnitudes básicas

$$\frac{V_m}{V_r} = \sqrt{\alpha} = \sqrt{0,02} = 0,141 \tag{9}$$

A partir de la velocidad se puede establecer el factor de tiempo, que se determina a partir de la distancia y la velocidad de trabajo de modelo y sistema real.

$$\frac{T_m}{T_r} = \frac{\frac{\varnothing_m}{V_m}}{\frac{\varnothing_r}{V_r}} = \frac{\varnothing_m \cdot V_r}{\varnothing_r \cdot V_m} = \tag{10}$$

$$\alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \tag{11}$$

$$\frac{T_m}{T_r} = \frac{\alpha \cdot \sqrt{\alpha}}{\alpha} = \sqrt{\alpha} = \sqrt{0,02} = 0,141$$

La semejanza cinemática se logra cuando se cumple la semejanza geométrica, lo que permite alcanzar la semejanza dinámica. Esta última depende de las dos anteriores, así como del sistema de fuerzas que actúa sobre el mecanismo, dimensionadas de acuerdo con el problema actual. En el estudio, se presta especial atención a la fuerza hidrostática en la superficie de contacto, y posteriormente se igualan las fuerzas en el modelo y en el sistema real para obtener las relaciones necesarias. Estas fuerzas dependerán de la densidad del fluido (ρ), la distancia al centro de presión (hcg), el área (A) y la gravedad (g). Son las ecuaciones 12-15.

$$F = \rho h_{cg} A g \tag{12}$$

$$\frac{F_m}{F_r} = \frac{\rho_{agua} h_{cg} A_m g}{\rho_{agua} h_{cg} A_r g} = \tag{13}$$

$$\frac{h_{cg} A_m}{h_{cg} A_r} \tag{14}$$

$$\frac{F_m}{F_r} = \frac{h_{cg} A_m}{h_{cg} A_r} =$$

$$\frac{\varnothing_m}{\varnothing_r} \cdot \frac{\varnothing_m^2}{\varnothing_r^2} = \alpha \cdot \alpha^2$$

$$\frac{F_m}{F_r} = \alpha^3 = 0,02^3 = = 8 \cdot 10^{-6} \tag{15}$$

De la misma forma, se puede asignar el momento tursor provocado por las fuerzas hidráulica y tractora sobre el eje (ecuación 16), sabiendo que dicho momento es resultante de la fuerza (F) por la distancia, en este caso el radio (R).

$$\frac{M_{T,m}}{M_{T,r}} = \frac{F_m \cdot \frac{\varnothing_m}{2}}{F_r \cdot \frac{\varnothing_r}{2}} = \quad (16)$$

$$\frac{F_m \cdot \varnothing_m}{F_r \cdot \varnothing_r} = \alpha^3 \cdot \alpha =$$

$$\alpha^4 = 16 \cdot 10^{-8}$$

Una vez conocidos los factores geométricos, cinemáticos y dinámicos, se puede solucionar el problema para condiciones de trabajo del modelo. Es decir, aplicando las semejanzas halladas, se obtendrán las velocidades de trabajo, al igual que las fuerzas ejercidas sobre las ruedas del sistema, traducidas al eje de movimiento, y los momentos torsores que estas generan.

$$n_m = \sqrt{\alpha} \cdot n_r = \sqrt{0,02} \cdot 18 = \quad (17)$$

$$2,546 \text{ [rpm]} \quad (18)$$

$$V_m = \sqrt{\alpha} \cdot V_r = \sqrt{0,02} \cdot 1,29 = \quad (19)$$

$$0,182 \text{ [m/s]}$$

$$F_{m,hidraulica} = \alpha^3 \cdot F_{r,hidraulica} = \quad (20)$$

$$0,02^3 \cdot 262,57 = 0,0021 \text{ [N]}$$

$$F_{m,rosario} = \alpha^3 \cdot F_{r,rosario} = \quad (21)$$

$$0,02^3 \cdot 1147 = 0,0092 \text{ [N]}$$

$$M_{T,m,hidro} = \alpha^4 \cdot M_{T,r,hidro} =$$

$$0,02^4 \cdot 788560 =$$

$$0,1262 \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

$$M_{T,m,rosa} = \alpha^4 \cdot M_{T,r,rosa} = \quad (22)$$

$$0,02^4 \cdot 310490 =$$

$$0,0497 \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

6. Conclusiones

Los sistemas de elevación de agua de la antigüedad continúan en uso hoy en día debido a que son mecanismos robustos, con gran adaptabilidad al entorno en el que trabajaban. Su función era facilitar las tareas humanas reduciendo la carga que un operario debería soportar e incluso eliminar el trabajo humano y hacer uso únicamente de energías naturales, como la hidráulica en el caso de las norias y ruedas hidráulicas.

En el presente estudio se han recuperado los planos de un sistema de elevación de agua de la época romana, denominado paternóster. Se trata de un sistema sencillo y muy original que servía para evacuar agua de las minas. El sistema se ha analizado mecánicamente modelando todos sus componentes y obteniendo los planos de fa-

bricación. Posteriormente, mediante fabricación aditiva, se ha obtenido una maqueta del sistema. Además, se han calculado por semejanza mecánica las condiciones de funcionamiento que tendría la maqueta.

El uso de la fabricación aditiva, en unión al modelado tridimensional del sistema, reduce los costes de construcción, dado que se puede utilizar materiales adaptables a las condiciones de ensayo. Es decir, según los requerimientos del prototipo, este se puede imprimir en materiales reciclados o de precios bajos y realizar el análisis necesario sobre él sin aumentar los costes provenientes de aplicar materiales con mayores precios de adquisición. Dependiendo del uso final que tenga la maqueta, esta podrá ser impresa a escala, con materiales económicos y luego reciclada para abaratar costes de diseño en el proyecto.

Finalmente, el estudio de mecanismos bajo semejanza mecánica reduce la necesidad de construir sistemas a escala real con poca certeza de su viabilidad o funcionamiento. Al realizar un estudio mecánico con un sistema semejante, se obtienen resultados con mucha precisión, que pueden ser traducidos a las condiciones de trabajo en las que el sistema real se encontrará. De esta forma, el equipo técnico puede contar con mayor certeza en la viabilidad del proyecto.

Referencias

- 3DSourced (2021). The Complete History of 3D Printing: From 1980 to 2022. Disponible en: <https://www.3dsourced.com/guides/history-of-3d-printing/> (consultado el 5 de marzo de 2022).
- Agricolae G (1556). De re metallica libri XII. Basileae.
- Andújar B (2016). Amizar Alcor Grupo Additive Manufacturing. ¿Qué es la fabricación aditiva? Disponible en: <https://mizaradditive.com/que-es-fabricacion-aditiva/> (consultado el 28 de febrero de 2022).
- Argudo García JJ (2019). Iagua, Grecia o el origen de la ingeniería. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-argudo-garcia/gestion-agua-distintas-civilizaciones-grecia-actualidad-ii>. (Consultado el 5 de marzo de 2022).
- Cubo N (2016). Aquae Fundación. Bioprinting: imprimiendo tejidos humanos. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/bioprinting-imprimiendo-tejidos-humanos/> (consultado el 10 de marzo de 2022).
- E3D (2020). Never Forget Your Roots: A Brief History of RepRap. Disponible

en: <https://e3d-online.com/blogs/news/history-of-reprap> (consultado el 3 de marzo de 2022).

- Groover MP (2013). CAD/CAM: Computer-aided design and manufacturing, Pearson Education. ISBN 8177584162.
- Instrumentos de Medición (2022). Tornillo de Arquímedes: Qué es, características y funcionamiento. Disponible en: <https://instrumentosdemedicion.org/general/tornillo-de-arquimedes/> (consultado el 10 de marzo de 2022).
- Jaycon Systems (2022). Exporting 3D files: stl vs. obj vs. iges vs. step. Disponible en: <https://jayconsystems.com> (consultado el 1 de marzo de 2022).
- Landes DS (1997). MIT Lincoln Laboratory: Technology in the National Interest. ISIS A Journal of the History of Science Society. Vol. 88, Number 2. E.C. Freeman, Ed.
- Lastanosa PJ d (1600). Los veinte y un libros de los yngenios, y máquinas de Juanelo Turriano.
- Lerma R, Álvaro L (2019). El ingenio de Juanelo Turriano. Técnica Industrial 322: 92-94.
- Marchante A (2020). 3Dnatives. CATIA, el software que trasciende la tecnología de diseño CAD. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/catia-software-tecnologia-cad-080720202/#!> (consultado el 9 de febrero de 2022).
- Marchante A (2020). 3Dnatives. Solid Edge, ¿qué características tiene esta solución de modelado 3D?. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/solid-edge-solucion-modelado-021120202/#!> (consultado el 19 de febrero de 2022).
- Oficina Española de Patentes y Marcas, y Universidad Autónoma de Madrid (2016). Herón de Alejandría.
- Oficina Española de Patentes y Marcas, y Universidad Autónoma de Madrid (2016). Herón de Alejandría. Disponible en: http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Her%C3%B3n%20de%20Alejandr%C3%ADa.xml (consultado el 3 de marzo de 2022).
- Ortiz y Sanz JF (1787). Los diez libros de arquitectura de M. Vitruvio Poleón. Imprenta Real, Madrid.
- Rosamond Z. (2020). All3DP (All About 3D Printing). What Is SolidWorks? – Simply Explained. Disponible en: <https://all3dp.com/2/what-is-solidworks-simply-explained> (consultado el 26 de febrero de 2022).
- Ugalde T (2010). Máquinas de elevación de agua en la minería romana. Traianvs. 2010: 327-345.

Estimación de prestaciones en una motocicleta de competición

Performance estimation of a racing motorcycle

A. Noriega González¹, I. Fernández de Bustos²

Resumen

La competición Motostudent implica el diseño, construcción y puesta a punto de una motocicleta de competición que debe pasar una serie de pruebas dinámicas durante la fase final de dicha competición. Entre esas pruebas se incluyen una prueba de aceleración, una prueba de frenada, la obtención de la velocidad máxima en el circuito y la mejor vuelta realizada al mismo.

Dado que las pruebas comentadas son puntuables, resulta de gran interés disponer de una herramienta de simulación que permita estimar el rendimiento alcanzable por un diseño de motocicleta o una puesta a punto de la misma en función de ciertos parámetros ajustables como puede ser la curva de par del motor, el desarrollo de la transmisión, la posición del centro de masas, etc. Esta herramienta debe ser paramétrica, robusta y muy eficiente para poder automatizar más adelante el proceso de obtención de los parámetros óptimos para el diseño o la puesta a punto.

En este artículo se muestra cómo se ha realizado el modelado de la dinámica longitudinal de una motocicleta de competición de la categoría Motostudent Petrol, despreciando los efectos de cabeceo e inclinación lateral. El modelo de piloto gestiona el cambio de marchas, el control de tracción y anticaballito, así como la elección del punto de frenada óptimo. Basándose en este modelado, se realiza una simulación dinámica que permite calcular, de manera detallada, el movimiento de la moto a lo largo de una recta y estimar las prestaciones anteriormente comentadas asociadas al diseño o puesta a punto que se desee estudiar.

La herramienta desarrollada se ha validado comparando las prestaciones calculadas con las obtenidas por motocicletas participantes en ediciones pasadas de la competición Motostudent Petrol.

Palabras clave

Simulación, prestaciones, motocicleta, competición.

Abstract

The Motostudent competition involves the design, construction and tuning of a racing motorcycle that must pass a number of dynamic tests during the final phase of the competition. These tests include an acceleration test, a braking test, obtaining the maximum speed on the circuit and the best lap of the circuit.

Since the tests mentioned above are scoring tests, it is of great interest to have a simulation tool that allows estimating the achievable performance of a motorcycle design or tuning depending on certain adjustable parameters such as engine torque curve, transmission ratio, center of masses position, etc. This tool must be parametric, robust and highly efficient in order to automate later the process of obtaining the optimal parameters for the design or tuning.

This paper shows how the longitudinal dynamics of a Motostudent Petrol racing motorcycle has been modeled neglecting the effects of pitch and lateral tilt. The rider model manages the gear shifting, traction control and antiwheelie, as well as the choice of the optimal braking point. Based on this modeling, a dynamic simulation is performed to calculate, in detail, the movement of the motorcycle along a straight line and to estimate the above-mentioned performance associated with the design or tuning to be studied.

The developed tool has been validated by comparing the calculated performance with those obtained by motorcycles participating in past editions of the Motostudent Petrol competition.

Keywords

Simulation, performance, motorcycle, racing.

Recibido/received: 01/06/2023 Aceptado/accepted: 10/10/2023

¹Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo.

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco.

Autor para correspondencia: Álvaro Noriega González; e-mail: noriegaalvaro@uniovi.es



Imagen cedida por los autores del artículo.

1. Introducción

La competición Motostudent es un desafío bienal entre universidades de todo el mundo en el que un equipo de estudiantes universitarios debe diseñar una motocicleta de competición de pequeño tamaño bajo unos condicionantes técnicos comunes, así como realizar y defender ese diseño y el plan de negocio asociado ante un tribunal de especialistas del sector. Además, cada equipo universitario debe construir la motocicleta diseñada, la cual debe pasar una serie de pruebas estáticas y dinámicas para comprobar el cumplimiento de la reglamentación y la seguridad del vehículo. Finalmente, si el prototipo construido se considera apto, pasa a disputar una carrera, incluida en el calendario de la Federación Internacional de Motociclismo (FIM), y que se disputa en el circuito de velocidad de Motorland Aragón, en España (Gadola, 2019).

En la competición Motostudent hay dos categorías. En la categoría Petrol, todas las motos llevan un motor de combustión interna de cuatro tiempos y 250 cc y en la categoría Electric, un motor eléctrico. En ambos casos, la organización proporciona los motores a utilizar y estos se encuentran precintados para evitar que se puedan manipular. Aparte del motor, la organización también proporciona los neumáticos y las pinzas y mandos de los frenos. Y a partir de ahí, los equipos tienen mucha flexibilidad para diseñar su motocicleta, respetando una normativa básica centrada principalmente en la seguridad. Esta flexibilidad permite innovar, pero también genera muchas dudas al inicio del proceso de diseño, sobre todo entre los participantes, que son estudiantes con muy poco bagaje práctico en el diseño de vehículos.

Los autores de este artículo lle-

van participando en esta competición desde sus inicios, tutorizando equipos en sus respectivas universidades y han observado que, durante la toma de decisiones sobre la geometría básica de la motocicleta, la cual va a determinar sus prestaciones, los estudiantes desearían estimar las prestaciones que serían alcanzables por diferentes diseños para poder decidir cuál sería el diseño óptimo. Esto puede hacerse, en un inicio, tomando como referencia los diseños de motocicletas de competición similares a la que se desea construir (se trataría de un diseño por analogía), pero esto no permite la comprensión completa de las razones que están detrás de dicho diseño. Por esta razón, les resultaría de gran utilidad una herramienta que, utilizando unos pocos parámetros de diseño, pueda estimar, de manera aproximada, las prestaciones de la motocicleta en las pruebas dinámicas que son

puntuables para la competición. Es cierto que hay modelados más complejos, que incorporan muchos datos y detalles, como el de Lesina (2022), los cuales permiten obtener resultados más precisos, pero dichos modelos no son adecuados para una etapa inicial de un nuevo diseño, precisamente por el nivel de detalle que exigen en el modelo a simular en un momento en el que dicho diseño está relativamente indefinido.

Otra observación basada en la experiencia es que, una vez construido el prototipo, se dispone de escaso tiempo para pruebas en pista previas a la competición. Además, en muchos casos, la localización alejada de circuitos adecuados para realizar estas pruebas, la disponibilidad de pilotos para realizarlas, los medios disponibles (como adquisición de datos y transporte) y el coste económico asociado (desplazamiento y alojamiento) hace que estas pruebas previas sean escasas o directamente inexistentes. Sin ellas, resulta muy complicado ajustar de manera óptima ciertos parámetros, como el desarrollo para la transmisión por cadena o la curva de par del motor, que deben dejarse, entonces, para la competición final, en la que únicamente se dispone de dos sesiones de entrenamientos libres para ajustar los parámetros indicados junto con otros

como el reglaje de las suspensiones. Si se dispusiera de una herramienta que permitiera simular de manera sencilla, pero con cierta fiabilidad, el comportamiento de la motocicleta en las distintas pruebas a realizar en el circuito o en partes de ellas, se facilitaría la decisión del diseño o compra de componentes como los elementos de la transmisión y el ajuste de la curva de par del motor sin necesidad de realizar pruebas intensivas en circuito, o al menos, reduciéndolas significativamente.

Las pruebas dinámicas que son puntuables en la competición Motostudent son las siguientes:

- Test de frenado.
- Yincana.
- Test de aceleración.
- Posición en la parrilla de salida.
- Mejor vuelta rápida.
- Velocidad máxima en pista.
- Posición final en la carrera.

Varias de estas pruebas (el test de frenado, el test de aceleración y la velocidad máxima en pista, la cual siempre se alcanza en la recta de atrás del circuito de Motorland Aragón) se desarrollan con la motocicleta circulando en línea recta y en una superficie sin peralte lateral, por lo que puede tener pendiente longitudinal positiva o negativa. En esta situación, el modelo de piloto se simplifica en gran medida, dado que solo debe controlar la aceleración y el frenado longitudi-

dinal, asegurando que los neumáticos trabajen al límite de su adherencia y que la motocicleta no sufra el despegue de sus ruedas respecto del suelo. También debe manejar el embrague y el cambio de marchas, en el caso de que la motocicleta disponga de ellos (obligatorio en la categoría Petrol y opcional en la categoría Electric).

Estas pruebas, que se realizan en línea recta, y otras similares a distinta velocidad, pueden simularse de manera sencilla en un ordenador y también realizarse en entornos controlados con el prototipo real una vez construido, comparando los resultados de ambas para valorar la precisión del modelo y la simulación realizados e identificar los parámetros sobre los que hay más incertidumbre. Esto permite ir ajustando de manera iterativa el modelo de simulación con los datos reales obtenidos y validar esta herramienta para ser usada en futuros diseños.

Para dar respuesta a esta necesidad, en este artículo se describirá cómo se puede realizar un modelado y una simulación simplificados, pero funcionales para una motocicleta de la categoría Petrol realizando pruebas, o partes de pruebas, que se desarrollen en línea recta y la validación de los resultados obtenidos de la simulación comparándolos con los resultados medidos

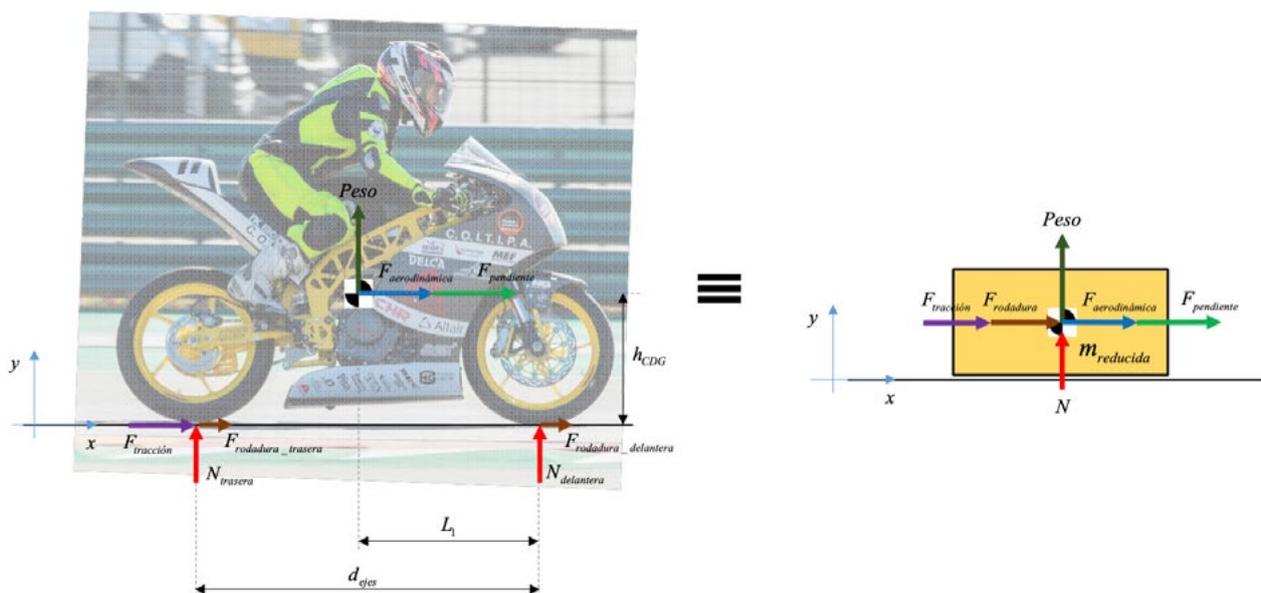


Figura 1. Modelo simplificado de la dinámica longitudinal durante una aceleración.

en el desarrollo de esas pruebas en la realidad.

2. Datos conocidos de la motocicleta

Para desarrollar un modelo simplificado de la dinámica longitudinal de la moto en un tramo recto y sin peralte lateral, se puede considerar lo siguiente:

El movimiento de la motocicleta se considera contenido en un plano vertical, con sus neumáticos apoyando en su parte central.

- No se considerará el cabeceo, ni el efecto de las suspensiones, ni la flexibilidad de los neumáticos ni el movimiento del piloto encima de la moto, por lo que puede considerarse que el movimiento de la motocicleta tiene un solo grado de libertad (en la dirección de avance de la motocicleta).
- Se obtendrá un modelo de la dinámica reducido a un grado de libertad, similar al propuesto en Hauser (2006), como se indica en la figura 1.
- Las direcciones y los sentidos de las fuerzas aplicadas sobre la motocicleta (v. fig. 1) son los habituales en simulación multicuerpo, coincidiendo el sentido positivo de velocidades, aceleraciones y fuerzas, para ser coherente con la segunda ley de Newton. Tanto los componentes de las fuerzas como los de las aceleraciones se esquematizan siempre en el sentido positivo de los ejes del sistema de referencia, dado que algunos de ellos pueden cambiar de sentido durante la simulación. Si se conoce el sentido de alguna de las fuerzas actuantes, se introducirá el signo en la ecuación correspondiente, como se puede ver en las expresiones (4). Este tipo de esquematización permite una formulación más

sencilla y directa de las ecuaciones de la dinámica.

Teniendo en cuenta lo anterior, se necesitarán los siguientes datos de la motocicleta:

Motor de combustión interna y caja de cambios asociada: se conocerá el momento de inercia del conjunto reducido a su cigüeñal, la curva de par motor al cigüeñal (de donde se obtendrá su par máximo $T_{m\acute{a}x}$ y su velocidad de rotación mínima $n_{m\acute{i}n}$ y máxima $n_{m\acute{a}x}$ operativas). En el caso de las ediciones V y VI de la competición Motostudent, se utilizó un motor de origen KTM con la curva de par que se puede ver en la figura 2.

La caja de cambios tiene una relación de reducción primaria $I_{primario}$ de 80/30 y seis marchas con las relaciones de reducción indicadas en la tabla 1. Tiene un rendimiento mecánico ρ_{cc} de 0,95.

La caja de cambios incorpora un quickshifter que realiza el cambio de marcha en 0,12 s.

Transmisión secundaria: por cadena, de la que se conocerá la relación de reducción i_{cadena} (37/14, modificable) y su rendimiento mecánico ρ_{cadena} de 0,95.

Resistencias al avance: se considera conocida la resistencia a la rodadura de los neumáticos $f_{rodadura}$ (0,02, igual para el delantero y el trasero y relaciona la carga vertical que recibe el neumático con la fuerza tangencial que se opone al avance del mismo mientras rueda), el coeficiente de penetración C_x de 0,45, la superficie frontal S de 0,4 m² y la densidad de aire ρ_{aire} de 1,29 kg/m³. Dimensiones: se considerará conocida la distancia entre ejes d_{ejes} de 1.300 mm, la distancia entre el CDG y el primer eje l_1 de 650 mm y la altura del CDG h_{CDG} de 645 mm (v. fig. 2). La posición del CDG tie-

ne en cuenta la masa conjunta de motocicleta y piloto.

Pesos: se considerará conocida la masa de la motocicleta en estado de marcha m_{moto} de 110 kg y la masa del piloto completamente equipado m_{piloto} de 85 kg.

Ruedas y neumáticos: se considerará conocido el momento de inercia de ambas ruedas respecto a sus ejes, el radio efectivo del neumático trasero r_{tras} de 0,30065 m y un coeficiente de adherencia longitudinal μ de 1,3 el cual se considera constante e igual para los neumáticos delantero y trasero.

Los datos mostrados pertenecen al prototipo desarrollado por el equipo Bizkaia ESI Bilbao.

3. Modelado de la dinámica en una recta

Para modelar el comportamiento de una motocicleta de competición en velocidad, hay que considerar que el fin último de la misma es recorrer la recta en el menor tiempo posible (Cossalter, 1998). A partir de esto, no habrá tramos de velocidad constante (salvo cuando el motor llegue a su límite máximo de velocidad de rotación). Entonces, la recta puede dividirse en dos sectores consecutivos y claramente diferenciados: la zona de aceleración y la zona de frenada. El modelo dinámico en esos dos sectores es diferente (la tracción está solo en la rueda trasera, pero el frenado se realiza con las dos ruedas) y también el modelo de piloto, que actúa de manera diferente, en un caso acelerando y subiendo marchas y, en el otro caso, frenando y bajando marchas.

El problema de simulación tendrá, además, unas condiciones de contorno diferentes a las clásicas en simulación (un problema de valores iniciales) ya que se conocerá la velocidad v_{ini} y la marcha n_{ccini} en la que inicia la recta, la longitud l y la pendiente θ de la recta y también se conocerán la velocidad v_{fin} y la marcha n_{ccfin} al final de la recta. El punto de frenado $x_{frenado}$ está situado dentro de la recta y marca el cambio de la dinámica y el modelo de piloto que se aplica. Ese punto de frenado está situado de tal manera que la velocidad y la marcha

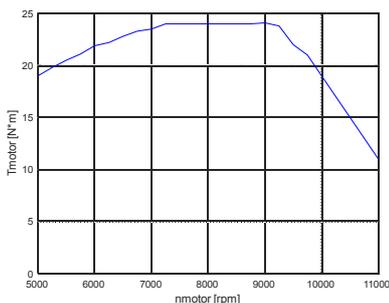


Figura 2. Curva de par en el motor.

Marcha	Relación de reducción
1ª	32/12
2ª	26/14
3ª	27/19
4ª	24/21
5ª	22/23
6ª	21/25

Tabla 1. Relaciones de reducción de la caja de cambios i_{cc}

engranada al final de la recta sean las establecidas en las condiciones de contorno de la simulación. Este punto de frenado habrá que obtenerlo resolviendo un problema de optimización.

La simulación de la dinámica tanto en la zona de aceleración como en la de frenada se realizará utilizando un integrador numérico sencillo modificado para incluir un criterio de parada que asegure que se recorre toda la recta, es decir, asegurando la robustez de la metodología.

A continuación, se pasa a describir el detalle de las situaciones y formas de actuar comentadas:

3.1. Zona de aceleración

En la zona de aceleración, el modelo dinámico a considerar es el indicado en la figura 1 y sobre el mismo se plantea la ecuación diferencial del movimiento de Eksergian (1930) mostrada en (1).

$$F_{reducida} = m_{reducida} \cdot a + \frac{1}{2} \cdot \frac{dm_{reducida}}{dx} \cdot v^2 \quad (1)$$

La masa reducida se calcula igualando energías cinéticas del sistema original (motocicleta con piloto) y el sistema reducido, que es una masa puntual equivalente situada en la posición del CDG del sistema original. Desarrollando esa igualdad y teniendo en cuenta la inercia de las masas rotantes en la motoci-

cleta, se puede llegar a la expresión (2).

$$m_{reducida} = \left(1,06 + 0,0014 \cdot (i_{primario} \cdot i_{cc} \cdot i_{cadena})^2\right) (m_{moto} + m_{piloto}) \quad (2)$$

Para calcular la fuerza reducida, se tendrán en cuenta todas las resistencias al avance y la fuerza de tracción generada en la rueda trasera, llegando a la expresión (3). Donde:

$$F_{reducida} = F_{traccion} + F_{rodadura} + F_{aerodinamica} + F_{pendiente} \quad (3)$$

$$F_{rodadura} = -f_{rodadura} \cdot (m_{moto} + m_{piloto}) \cdot g$$

$$F_{aerodinamica} = -\frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot C_x \cdot S_{frontal} \cdot v^2$$

$$F_{pendiente} = -(m_{moto} + m_{piloto}) \cdot g \cdot \sin\theta \quad (4)$$

Sustituyendo en la expresión (1), se puede llegar a la expresión (5).

$$F_{traccion} + F_{rodadura} + F_{aerodinamica} + F_{pendiente} = m_{reducida} \cdot a \quad (5)$$

La expresión (5) debe integrarse respecto al tiempo, para lo que se consideran conocidas, en cada instante, la posición x y la velocidad v y se calculará la aceleración a . Para ello, a partir de la velocidad de la motocicleta, puede calcularse la velocidad de rotación del motor con la expresión (6).

$$\omega_{motor} = \frac{v}{r_{tras}} \cdot i_{primario} \cdot i_{cc} \cdot i_{cadena} \quad (6)$$

La elección de la marcha a utilizar en cada momento se realiza mediante la utilización de un algoritmo de cambio de marcha que tiene en cuenta:

- El instante de simulación.
 - La velocidad de rotación de la rueda.
 - La marcha engranada.
 - El instante en el que realizó el último cambio de marcha.
 - La posición de la moto en la recta (si está acelerando o frenando).
 - La marcha más alta que puede utilizar en el tramo de recta.
 - La curva de par motor.
- Y proporciona:
- La velocidad de rotación del motor.
 - La marcha engranada óptima para maximizar la fuerza de tracción si está acelerando y para mantener el motor por encima del régimen de par máximo si está frenando.
 - El instante actualizado en el que se realizó el último cambio de marcha.

Conocida la velocidad del motor, se puede calcular el par generado por el mismo interpolando en la curva de par motor que puede verse en la figura 2. Cuando la velocidad de giro del motor está por debajo de la velocidad mínima operativa en competición, se entiende que el piloto pellizca el embrague (maniobra que consis-

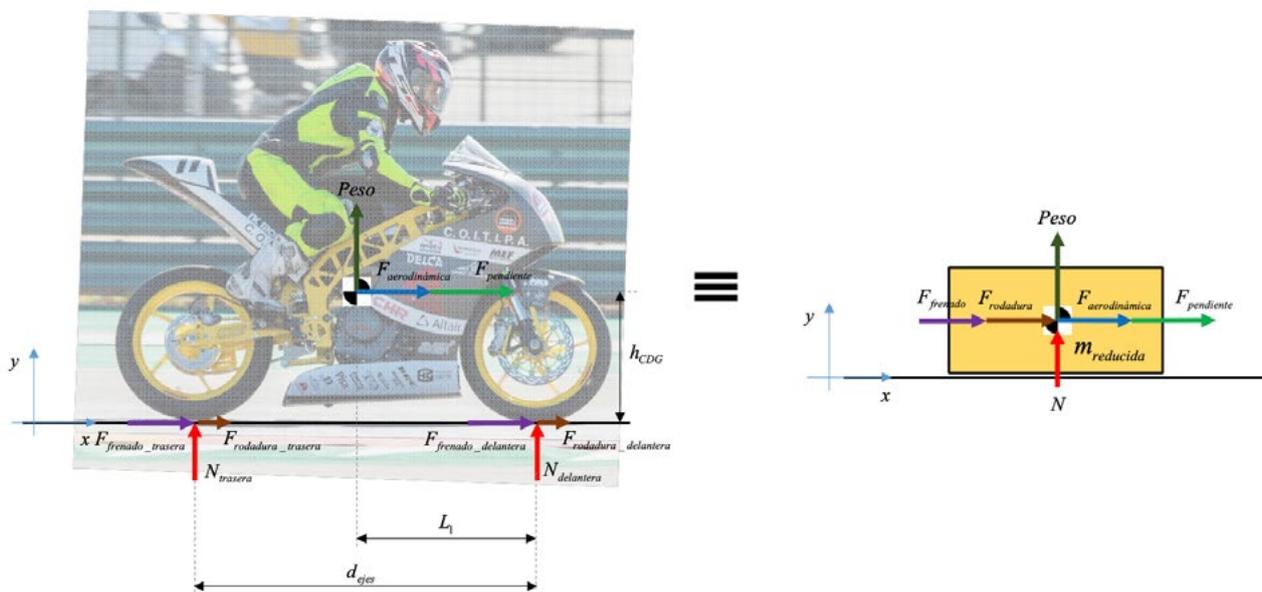


Figura 3. Modelo simplificado de la dinámica longitudinal durante una frenada.

te en desconectar la transmisión, acelerar el motor y volver a conectar la transmisión) generando una situación transitoria que se traduce un incremento de par súbito y momentáneo percibido en la transmisión. En esta situación, se ha decidido aplicar un par 1,5 veces mayor que el par máximo, ya que se ha comprobado que con ese par, se produciría una situación de levantamiento de la rueda delantera durante un arranque en parado, que es lo ocurre en la realidad en muchas ocasiones durante el test de aceleración.

A continuación, se puede calcular el par que suministraría el motor a la rueda con la expresión (7), la fuerza de tracción que se generaría, suponiendo una situación de no deslizamiento del neumático, con la expresión (8) y la máxima aceleración que permitiría el motor con la expresión (9).

$$T_{rueda} = T_{motor} \cdot i_{primario} \cdot i_{cc} \cdot i_{cadena} \cdot \rho_{cc} \cdot \rho_{cadena} \quad (7)$$

$$F_{rueda_motor} = \frac{T_{rueda}}{r_{tras}} \quad (8)$$

$$a_{motor} = \frac{F_{rueda_motor} + F_{rodadura} + F_{aerodinámica} + F_{pendiente}}{m_{reducida}} \quad (9)$$

En paralelo, se puede calcular la máxima fuerza de tracción que se conseguiría llevando al límite la adherencia del neumático trasero (Luque, 2004) con la expresión (10) y la máxima aceleración que permitiría la adherencia con la expresión (11).

$$F_{rueda_adherencia} = \frac{\mu \cdot (m_{moto} + m_{piloto}) \cdot g \cdot (l_1 - h_{CDG} \cdot f_{rodadura})}{d_{ejes} - \mu \cdot h_{CDG}} \quad (10)$$

$$a_{adherencia} = \frac{F_{rueda_adherencia} + F_{rodadura} + F_{aerodinámica} + F_{pendiente}}{m_{reducida}} \quad (11)$$

Finalmente, se puede calcular la aceleración que generaría un despegue de la rueda delantera con la expresión (12).

$$a_{caballete} = \frac{(m_{moto} + m_{piloto}) \cdot g \cdot (d_{ejes} - l_1)}{m_{moto} + m_{piloto}} + \frac{F_{aerodinámica} + F_{pendiente}}{m_{moto} + m_{piloto}} \quad (12)$$

De las tres aceleraciones calculadas, se escogerá la mínima aceleración de las tres a_{min} y se implementará un límite adicional cuando el motor haya alcanzado su máxima velocidad operativa con la expresión (13).

$$a = \begin{cases} \text{si } \omega_{motor} < \omega_{max} \rightarrow a_{min} \\ \text{si } \omega_{max} \leq \omega_{motor} \rightarrow 0 \end{cases} \quad (13)$$

3.2. Zona de frenada

En la zona de frenada, el modelo dinámico a utilizar se puede ver en la figura 3. En este caso, si se quiere determinar el esfuerzo de frenado en cada rueda es necesario realizar una hipótesis de como reparte el piloto la frenada entre los dos ejes, y, en consecuencia, que rueda llegará antes al límite de adherencia. Sin embargo, el análisis es más sencillo, dado que, como una motocicleta es un vehículo con una distancia entre ejes pequeña y un CDG relativamente alto en comparación, la deceleración más limitante es casi siempre la asociada al levantamiento de la rueda trasera (Massaro, 2022). Esta deceleración puede calcularse con la expresión (14), suponiéndola constante durante toda la frenada, y no necesita realizar ninguna hipótesis sobre el reparto de frenada entre los dos ejes.

$$a_{frenada} = \frac{-(m_{moto} + m_{piloto}) \cdot g \cdot \frac{l_1}{h_{CDG}} + F_{aerodinámica} + F_{pendiente}}{m_{moto} + m_{piloto}} \quad (14)$$

Se considerará que el límite de la operación de frenado es la de-

tención completa de la motocicleta con la expresión (15).

$$a = \begin{cases} \text{si } 0 < v \rightarrow a_{frenada} \\ \text{si } v \leq 0 \rightarrow 0 \end{cases} \quad (15)$$

3.3. Obtención del punto óptimo de frenada

Teniendo en cuenta las condiciones de contorno indicadas al final de la recta y que el punto de frenado está situado dentro de la recta, se utilizará una variante mejorada del algoritmo de bisección que permite calcular raíces de una función de una variable en un intervalo conocido llamado algoritmo Illinois (McNamee, 2013). La función de la que hay que obtener la raíz será la indicada en la expresión (16), donde $v_{final_deseada}$ es la velocidad a la que se toma la siguiente curva y v_{final} es la velocidad al final de la recta tras frenar en el punto de frenado $x_{frenado}$.

$$error = error(x_{frenado}) = v_{final_deseada} - v_{final}(x_{frenado}) \quad (16)$$

La velocidad al final de la recta se obtiene simulando la dinámica

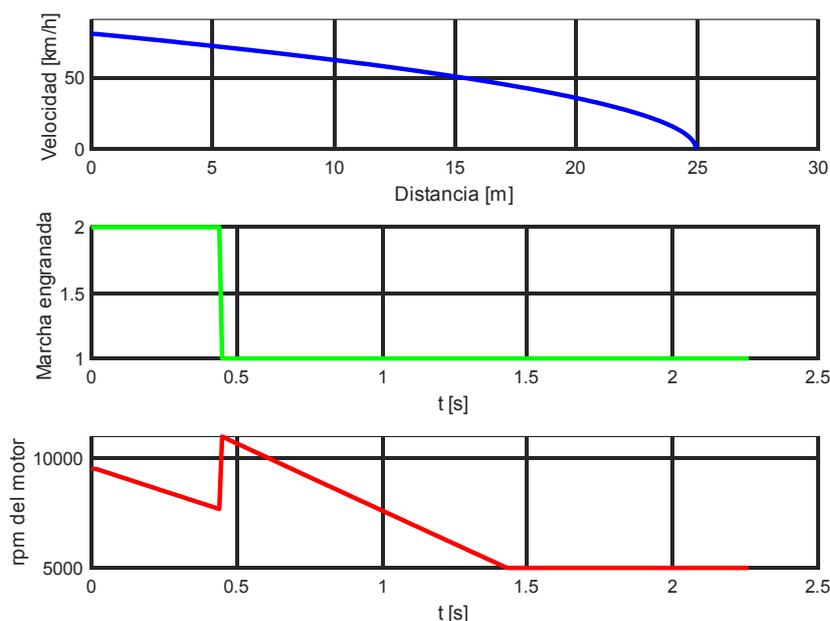


Figura 4. Simulación del test de frenada.

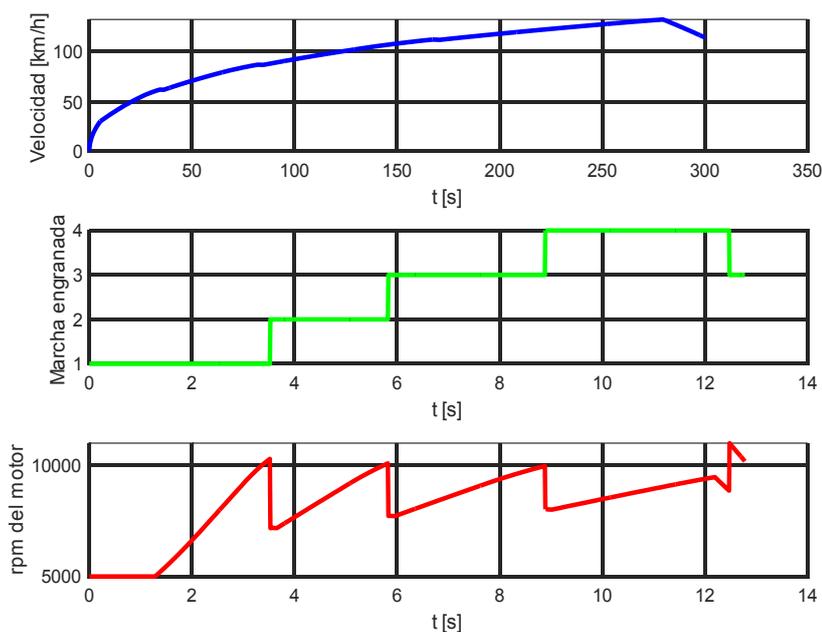


Figura 5. Simulación del test de aceleración.

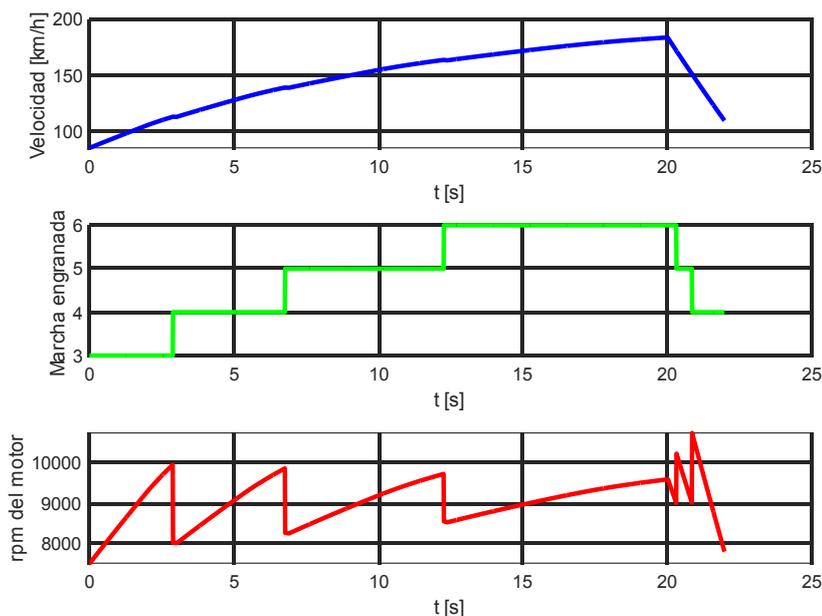


Figura 6. Simulación de la recta más larga del circuito.

en la recta con un punto de frenado, que actúa como variable independiente. El algoritmo Illinois va probando distintos puntos de frenado hasta que encuentra aquel que consigue una solución cuyo error está suficientemente cerca de cero y supone un incremento de distancia del punto de frenado por debajo de una tolerancia establecida. También tiene un límite máximo de evaluaciones de función para evitar que el coste computacional se dispare.

3.4. Integración

Dado que la ecuación diferencial a manejar no presenta discontinuidades, se ha utilizado un integrador Runge-Kutta explícito de segundo orden (Süli, 2003), porque tiene un coste muy bajo y una precisión aceptable. Se ha implementado una variante del mismo donde la integración continúa, siempre y cuando la velocidad de la motocicleta sea positiva y no se haya llegado al final de la recta. Las dos variables independientes que hay que integrar

son la posición x y la velocidad v . Para evitar que la integración genere un movimiento hacia atrás en la recta, cuando se detecte que dicha velocidad es negativa, se cambiará su valor por cero.

4. Simulación de pruebas

En esta sección se describirán los test simulados y los resultados obtenidos.

4.1. Test de frenado

El test de frenado de la competición Motostudent consiste en que la motocicleta, circulando a una velocidad igual o mayor a 80 km/h y sobre una superficie de asfalto con pendiente nula frene hasta detenerse completamente en el menor espacio posible y sin caerse. Si la motocicleta circula a una velocidad menor a 80 km/h tendrá una penalización, y puede considerarse nulo el intento. Cada equipo tiene dos oportunidades para realizar este test, y es puntuable el mejor resultado obtenido.

Se ha realizado la simulación del test con las condiciones indicadas y se ha obtenido el resultado de la figura 4. La frenada se realiza en 24,94 m y dura 2,26 s.

4.2. Test de aceleración

El test de aceleración consiste en que la motocicleta realice una aceleración desde parado sobre una superficie de asfalto con pendiente nula y recorra 150 m en el menor tiempo posible sin caerse. Nuevamente, cada equipo tiene dos oportunidades para realizar este test, y es puntuable el mejor resultado obtenido.

Se ha realizado la simulación del test con las condiciones indicadas y adelantando un poco el CDG respecto a la posición centrada para un pilotaje neutro, hasta que el eje delantero cargue con el 60% del peso. Esto es así porque se ha observado que los pilotos adelantan significativamente su posición sobre la moto para realizar esta maniobra. Tras la simulación, se ha obtenido el resultado indicado en la figura 5. La aceleración se realiza en 8,33 s, alcanzando una velocidad de 108,8 km/h en ese instante.

4.2. Velocidad máxima en el circuito

La obtención de la velocidad máxima

en el circuito no se consigue en una prueba específica si no que se produce durante la carrera. En la parte final de la recta más larga del circuito, la situada entre las curvas 15 y 16, se dispone de una fotocélula que registra la velocidad de paso de las motocicletas. Adicionalmente, se dispone de un sistema GPS que también da una lectura de la velocidad instantánea en esa zona.

Entonces, para realizar la simulación, se considerará que se inicia la recta a una velocidad de 85 km/h en tercera marcha, se recorrerán 902,7 m subiendo hasta sexta marcha y la velocidad al final será de 110 km/h circulando en cuarta marcha. Estos datos están sacados de la observación de los datos recogidos por el sistema de adquisición de datos que equipaba la motocicleta.

Se ha realizado la simulación con las condiciones indicadas y se ha obtenido el resultado indicado en la figura 6. La velocidad máxima alcanzada es de 183,77 km/h.

5. Validación con resultados experimentales

Para determinar la exactitud y la fiabilidad de los resultados obtenidos por la simulación, se compararán con los resultados obtenidos por el equipo Bizkaia ESI Bilbao en los test realizados durante la quinta edición de la competición Motostudent, celebrada en octubre de 2018.

En el test de frenada, se realizaron dos intentos nulos por iniciar la frenada a una velocidad muy inferior a 80 km/h. Sin embargo, como la organización de la competición informa de esa velocidad, se ha rehecho la simulación con la velocidad de uno de los intentos (61,7 km/h), y se ha obtenido una distancia de frenado de 14,95 m, mientras que, en la realidad, se consiguió frenar en 16,6 m.

En el test de aceleración, se ha cogido el mejor de los dos intentos, en el que se consiguió acelerar en 7,18 s frente a los 8,33 s que arroja la simulación.

Para determinar la velocidad máxima en el circuito, se sabe que esta se da en la parte final de la recta más larga, la situada entre las curvas 15 y 16. En esa zona, se dispone de una fotocélula que

registra la velocidad de paso de las motocicletas. Adicionalmente, también se dispone de un sistema GPS que da una lectura de la velocidad instantánea en esa zona. Durante la carrera, la motocicleta considerada alcanzó una velocidad máxima de 182,1 km/h, mientras que la simulación predice 183,77 km/h.

6. Conclusiones

La simulación del modelo planteado genera unos resultados cercanos a los reales en las tres pruebas simuladas. En el caso del test de frenada, la distancia de frenado real tiene el 11% de error respecto a la obtenida de la simulación. Pero este resultado tiene cierta variabilidad debida, principalmente, a que la actuación del piloto es decisiva, pero no repetible, puesto que nunca frena exactamente igual que la vez anterior ni pasa a la misma velocidad por el punto de frenada. El test de aceleración muestra un error del 13,8% respecto a los resultados obtenidos de la simulación. Nuevamente, esta prueba está afectada por la actuación del piloto, sobre todo, en el arranque, pellizcando el embrague, haciéndolo deslizar en cada cambio de marcha (acción que no es posible emular con precisión en la simulación) y porque mueve su posición sobre la moto respecto a la posición neutra.

En el caso de la velocidad máxima, está menos influida por la actuación del piloto y tiene mucha más dependencia de la longitud de la recta y de las prestaciones puras de la motocicleta, por lo que tiene mayor repetibilidad, la cual se observa en la situación vuelta a vuelta recogida en el sistema de adquisición de datos. Esto hace que la simulación obtenga una estimación de la velocidad máxima alcanzable con un error menor del 1%. Este error se considera muy bajo, teniendo en cuenta las circunstancias, lo que, sumado a la alta repetibilidad de la medida, valida la simulación planteada como método de estimación de la velocidad máxima alcanzable. El uso de este método de estimación simplifica la elección del desarrollo a utilizar

en la transmisión por cadena (aunque no lo determine totalmente) sin necesidad de comprar y probar muchos desarrollos diferentes en el circuito.

Estos resultados sugieren que la adaptación de este modelo a la simulación de una motocicleta eléctrica de competición sin embrague ni caja de cambios probablemente pueda generar una simulación más precisa de estas pruebas.

7. Agradecimientos

Se agradece enormemente el apoyo a este trabajo por parte del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España, en el marco del proyecto PID2021-124677NB-I00.

Referencias

- Cossalter V., Da Lio M., Lot R., Fabbri L. (1998). Simulation and performance evaluation of race motorcycle dynamics based on parts of real circuit. Power Two Wheels International Conference, Pisa, Italia.
- Eksergian, R. (1930). Dynamical analysis of machines. Journal of the Franklin Institute, 209(4), 503-531.
- Gadola, M., Chindamo, D. (2019). Experiential learning in engineering education: The role of student design competitions and a case study. International Journal of Mechanical Engineering Education, 47(1), 3-22.
- Hauser, J., Saccon, A. (2006). Motorcycle modeling for high-performance maneuvering. IEEE Control Systems Magazine, 26(5), 89-105.
- Lesina, F. (2022). Implementation of the motorcycle rider control strategies [Master Thesis, Universidad Politécnica di Milano].
- Luque, P., Alvarez, D., Vera, C. (2004). Ingeniería del automóvil. Sistemas y comportamiento dinámico. Ed. Paraninfo.
- Massaro, M., Lovato, S. (2022). The optimal trajectory of road vehicles on straights. 2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC), Cancun, Mexico.
- McNamee, J.M., Pan, V.Y. (2013). Chapter 7 - Bisection and Interpolation Methods. Studies in Computational Mathematics 16, 1-138.
- Süli, E., Mayers, David F. (2003). An Introduction to Numerical Analysis. Cambridge University Press.

Acto de entrega del II Premio a la Innovación Tecnológica, Empresarial y Sostenibilidad, y celebración del 70 aniversario de la revista Técnica Industrial

El evento tuvo lugar, el pasado 22 de septiembre, en la sede del Colegio de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales de Madrid (COGITIM), en un formato híbrido (presencial y telemático, ya que fue retransmitido por streaming), y contó también con una conferencia sobre “El futuro de las fundaciones” y una mesa redonda acerca de los retos de sector industrial, con destacados ponentes, expertos en este ámbito.

El acto comenzó con las palabras de bienvenida por parte del presidente de la Fundación Técnica Industrial y del Consejo General de los Colegios de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales de España (COGITI), José Antonio Galdón Ruiz, y de agradecimiento a los invitados participantes en el evento.

En primer lugar, recordó los orígenes de la revista Técnica Industrial, creada en 1952 como órgano de la entonces denominada Asociación Nacional de Peritos Industriales. “Su historia va acompañada con lo que ha sido siempre la profesión, y nació para divulgar el conocimiento en torno al tejido industrial”, señaló. Desde entonces se ha publicado de forma ininterrumpida, con distinta periodicidad según el momento, “y el objetivo de transmisión y divulgación de esa generación de conocimiento con todos esos artículos técnicos, se ha conseguido. Muchas personas han tenido que dirigir y trabajar



José Antonio Galdón Ruiz, presidente de la Fundación Técnica Industrial y de COGITI, da la bienvenida a los asistentes al acto.

mucho para hacer que esta revista haya sido posible, por lo que quiero mostrar mi agradecimiento a todos ellos, y también a todas aquellas personas que colaboran en la publicación”, expresó el presidente.

Asimismo, recordó que este año se cumplen 25 años desde la creación de la Fundación Técnica Industrial, que edita actualmente la revista, y que nació con unos objetivos de promoción, desarrollo y protección de la investigación científica y técnica en el ámbito industrial. “Todos los que estamos aquí compartimos la importancia del sector industrial”, indicó.

A continuación, dio paso a la intervención de la presidenta de la Asociación Española de Fundaciones (AEF), Pilar García Ceballos-Zúñiga, para inaugurar oficialmente el acto. “Para mí, estar hoy aquí es una oportunidad para conocer mejor una de las grandes Fundaciones que tenemos en España”, manifestó.

La presidenta aportó algunos datos significativos, como que en la actualidad hay 10.511 fundaciones activas en España. “El impacto económico que tienen en este momento las fundaciones es de alre-



La presidenta de la Asociación Española de Fundaciones (AEF), Pilar García Ceballos-Zúñiga, inaugura el acto organizado por la FTI.

dedor de 27.000 millones de euros, en la economía nacional. De ellos, 8.500 millones son un impacto directo en la economía, y supone el 2,4% de PIB español. En términos de empleabilidad, las fundaciones emplean, en total, a casi 600.000 personas (240.000 son empleos directos)", detalló.

Conferencia sobre "El futuro de las fundaciones"

El acto contó también con una conferencia sobre "El futuro de las fundaciones", a cargo de Javier Nadal Ariño, ex presidente de la AEF. Tras dar la enhorabuena a la Fundación Técnica Industrial por el 70 aniversario de su revista, comenzó su ponencia, hablando sobre el tercer sector, que está formado por organizaciones privadas, sin ánimo de lucro, nacidas de la iniciativa ciudadana o por el interés de empresas que trabajan contra la pobreza y la exclusión social. Las fundaciones se encuentran en dicho tercer sector, y actúan por el interés general. "Allá donde hay problemas, hay una fundación", señaló. La AEF es la segunda asociación de este tipo más grande de Europa, por detrás de Alemania, por lo que ocupa un lugar sumamente importante en el ámbito fundacional. En la actualidad, la AEF agrupa a más de 900 fundaciones españolas de las más diversas dimensiones, finalidades y ámbitos de actuación.

Mesa redonda sobre "Retos del sector industrial"

En este día tan señalado para la Fundación Técnica Industrial, no se quiso dejar pasar la oportunidad de hablar sobre industria, y más concretamente sobre los retos del sector industrial. Para ello, se organizó una mesa redonda, moderada por Mónica Ramírez, directora de la revista Técnica Industrial, que contó con cuatro destacados ponentes: María José Muñoz Martínez, directora general de Industria y de la Pyme del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo; José Miguel Guerrero Sedano, presidente CONFEMETAL (Confederación Española de Organizaciones del Metal) y vicepresidente de CEPYME (Confederación Española



Javier Nadal Ariño, ex presidente de la AEF, pronuncia su conferencia «El futuro de las fundaciones».



Mesa redonda sobre los retos del sector industrial: José Antonio Galdón, María José Muñoz, Mónica Ramírez, José Miguel Guerrero, y Salvador Marín (de izda. a dcha.).

la de la Pequeña y Mediana Empresa); Salvador Marín Hernández, presidente de la European Federation of Accountants and Auditors for SMEs (Federación Europea de Contables y Auditores para Pequeñas y Medianas Empresas -EFPA-), y José Antonio Galdón Ruiz, Presidente de la Fundación Técnica Industrial y del Consejo General de la Ingeniería Técnica Industrial de España (COGITI).

En la mesa redonda se puso de manifiesto que la producción in-

dustrial española se contrajo en julio pasado un 1,8% con respecto al mismo mes de 2022, tres décimas más que en junio (1,5%), pero lastrada todavía por la caída del sector energético. El índice de producción industrial (IPI), que publica periódicamente el Instituto Nacional de Estadística (INE), acumula así cuatro meses consecutivos sin avances y registra su mayor descenso desde abril, cuando se desplomó un 4,2%.

Esta situación quedó reflejada

también en el informe “Una perspectiva económica de la situación de la industria en España: actualización 2022”, incluido en el último Barómetro Industrial del Consejo General de la Ingeniería Técnica Industrial de España (COGITI), que prepara ya su séptima edición, y en el que se cuenta, asimismo, con la inestimable colaboración del Consejo General de Economistas. Los ponentes opinaron sobre la situación de la industria en España y realizaron una serie de propuestas, cada uno desde su punto de vista, que se podrían llevar a cabo para mejorar la situación. También se habló sobre los fondos europeos Next Generation de la Unión Europea, y de los principales retos a los que se enfrentan las empresas en materia de transición energética.

Entre las principales conclusiones, destacan la necesidad de ser menos dependientes de terceros países en determinados recursos y productos, priorizar el sector industrial en todos sus términos, recuperar el anteproyecto de la Ley de Industria, desarrollar la industria para la descarbonización, y ayudar a las pymes del sector, que son las que menos capacidad tienen para acceder a las nuevas inversiones, tan necesarias para poder ser competitivas.

Entrega del II Premio a la Innovación Tecnológica Empresarial y Sostenibilidad

Para finalizar, y como colofón al acto, la Fundación Técnica Industrial entregó su II Premio a la Innovación Tecnológica Empresarial y Sostenibilidad, que ha recaído en la empresa mallorquina GeoCENmap, por haber desarrollado una tecnología disruptiva que permite detectar la presencia de contaminación por hidrocarburo en el subsuelo desde la superficie, de una forma no invasiva, rápida y fiable, lo que constituye una importante mejora con respecto a las técnicas de investigación actuales.

Como explicó el gerente de la Fundación Técnica Industrial, Santiago Crivillé Andreu, antes de la entrega del galardón, “el fundamento de este Premio es apoyar y fomentar la innovación industrial,



Santiago Crivillé, gerente de la Fundación Técnica Industrial, presenta a la empresa ganadora del II Premio a la Innovación Tecnológica Empresarial y Sostenibilidad.



El secretario de la Fundación Técnica Industrial y de COGITI, Jesús Eugenio García Gutiérrez, procede a leer el acta del Premio de la FTI.



La directora general de Industria y de la Pyme, María José Muñoz, entrega el galardón a José Martí, director de GeoCENmap.

dando a conocer el esfuerzo empresarial, que representa la innovación técnica aplicada a las mejoras de los procesos industriales y a la sostenibilidad. El premio va dirigido a proyectos desarrollados y aplicados en España por grandes, pequeñas y medianas empresas. La finalidad del mismo es la promoción, incentivación y divulgación de este esfuerzo, muchas veces ignorado, y que no es suficientemente valorado”.

Tras su intervención, el secretario de la Fundación Técnica Industrial y de COGITI, Jesús Eugenio García Gutiérrez, leyó el acta del Premio, cuyo jurado estuvo formado por José Luis Canito Lobo, presidente de la Conferencia de Directores de Escuelas de Ingeniería de Ámbito Industrial; José Manuel Prieto Barrio, subdirector general de Calidad y Seguridad Industrial del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo; y José Miguel Guerrero, presidente de Confemetal.

La directora general de Industria y de la Pyme, María José Muñoz Martínez, hizo entrega del galardón al director de GeoCENmap, José Martí, que agradeció a la Fundación Técnica Industrial la concesión de este “importante premio”.

A continuación, José Martí llevó a cabo la presentación del proyecto ante los asistentes al acto. De este modo, explicó que GeoCENmap ha desarrollado una nueva tecnología, que incluye una nueva generación de electrodos (electrodos de contacto) que permiten, por primera vez, la medición del CEN sobre pavimentos rígidos. Esto hace posible la realización de mapas de CEN en instalaciones industriales, como por ejemplo estaciones de servicio. Actualmente existe una evolución del electrodo de contacto desarrollado por GeoCENmap, que puede medir siendo arrastrado (CEN-drag), por lo que puede realizarse la medición del CEN en continuo. GeoCENmap ha desarrollado, además, un nuevo equipo de prospección geofísica, el CEMmapper, que incorpora el nuevo electrodo de arrastre y sistemas de adquisición y almacenamiento de datos, incluyendo los de posición (geoposicionamiento vía GPS y odometría). Por



José Martí, director de GeoCENmap, explica el proyecto ganador del premio.



María José Muñoz, directora general de Industria y de la Pyme, clausura el acto.

último, la tecnología incluye nuevos y exclusivos conocimientos sobre adquisición y postprocesado de datos. El mapa CEN es el resultado final de la nueva tecnología desarrollada.

“La tecnología se ha desarrollado a través de un acuerdo de colaboración con CEPESA, que durante cuatro años ha aportado todos sus conocimientos sobre la contaminación, a partir de los informes que ellos tienen de sus instalaciones, y es lo que nos ha permitido evolucionar la tecnología, comparando nuestros resultados con los resultados analíticos del suelo y, a partir de esta colaboración, hemos podido desarrollar la tecnología has-

ta el punto en el que se encuentra en la actualidad. Esta herramienta es importante para detectar si hay contaminación en el subsuelo, de una forma rápida, y centrar así los recursos en el lugar exacto donde haya un riesgo para el medioambiente”, explicó el director de GeoCENmap.

Por último, la directora general de Industria y de la Pyme, M^a José Muñoz, clausuró el acto, con la felicitación a GeoCENmap y a su director, José Martí, “por su carácter emprendedor” y por representar “un ejemplo muy bonito de colaboración con grandes empresas, en un modelo de innovación abierta, que consolida su buen hacer”.

GeoCENmap, empresa ganadora del II Premio a la Innovación Tecnológica, Empresarial y Sostenibilidad de la Fundación Técnica Industrial

La Tierra tiene un campo eléctrico natural que, al igual que el campo magnético, está presente en todo el planeta. Tiene su origen en procesos internos de la dinámica terrestre, y es bien conocido por geólogos y geofísicos, quienes lo han estudiado durante siglos. Pero aún quedaban cosas por conocer y, en el año 2015, la empresa Global CEN Technologies S.L. desarrolló una tecnología para medir y representar este parámetro ambiental que nos rodea, invisible pero omnipresente.

GeoCENmap S.L

Esta tecnología aporta nueva información sobre el campo eléctrico natural, al que se refieren como CEN por su acrónimo, información sobre la que basan el desarrollo de innumerables aplicaciones en muy diversos ámbitos. “Estamos teniendo acceso a una información de la que los geólogos y geofísicos no teníamos constancia, y que afecta a innumerables aspectos de la vida cotidiana. Es una oportunidad que no podemos desaprovechar”, señala José Martí, CEO de Global CEN Technologies S.L. “El campo eléctrico natural (CEN) afecta y es afectado por muchas cosas. Si entendemos esa relación, medir el CEN puede aportarnos muchísima información útil”, afirma José Martí.

Uno de los mejores ejemplos de lo que comenta el CEO de Global CEN es la aplicación que han desarrollado para la detección de contaminación por hidrocarburo en el subsuelo, a partir de la medición del CEN en superficie. La llegada de hidrocarburo al subsuelo altera las propiedades eléctricas del mismo, provocando a su vez un cambio en el CEN, cambio que puede medirse desde la superficie, lo que nos permite detectar la aparición de contaminación.

Para desarrollar esta línea de I+D, Global CEN Technologies S.L. creó, en el año 2022, la empresa GeoCENmap S.L., encargada de evolucionar esta tecnología y el negocio vinculado. Actualmente, GeoCENmap S.L. ya comercializa este innovador sistema, que permite determinar la probabilidad de que exista o no contaminación por hidrocarburos en el subsuelo, desde la superficie y de una forma rápida, segura, pasiva, completa y no intrusiva.

En este tiempo, la empresa ha diseñado un equipo de medición del CEN (CENmapper), que toma los datos de campo eléctrico de forma muy rápida. El CENmapper arrastra un electrodo que registra el potencial eléctrico sobre la superficie del terreno de manera continua. “Hemos desarrollado una nueva generación de electrodos que

permite medir el campo eléctrico sobre pavimentos rígidos, tales como hormigón o asfalto, mayoritarios en instalaciones industriales. Hasta la fecha no nos consta que fuese posible medir el CEN en este tipo de instalaciones, por lo que nuestros mapas CEN son los primeros mapas que permiten visualizar el campo eléctrico en un área pavimentada”, explica David Bosch, CEO de GeoCENmap.

El CENmapper, al desplazarse por el área a estudiar, registra el valor de CEN del suelo y la posición del electrodo, de manera que genera un archivo con la totalidad de los datos de CEN geoposicionados. GeoCENmap S.L. dispone de su propio software de procesado, cuyos criterios han sido definidos durante años conjuntamente con CEPSA, en el marco de un convenio de colaboración. “CEPSA ha sido un compañero de viaje imprescindible para el desarrollo de esta tecnología. Para la validación de los resultados de nuestros modelos, hemos podido utilizar información analítica real de los emplazamientos estudiados, en colaboración con CEPSA”, indica José Martí.

Ventajas de la tecnología

Hay que tener en cuenta que, actualmente, la práctica totalidad de las investigaciones que se llevan a cabo para determinar si un suelo está o no contaminado se realizan a partir de sondeos, un método directo, pero muy costoso, y con unos plazos de preparación y ejecución muy considerables. Consecuentemente, una técnica rápida y económica como la medición del campo eléctrico se está abriendo paso en el sector, como alternativa en fases preliminares de estudio de este tipo de instalaciones.

Pero además de ser mucho rápida y mucho más económica que los sondeos, la técnica tiene ventajas adicionales. Es muy segura, ya que no inyecta ningún tipo de energía al subsuelo en el momento de la toma de datos, algo a tener muy presente teniendo en cuenta que se trabaja en emplazamientos

en los que puede haber hidrocarburos, tanto en las instalaciones (tanques, tuberías, etc.), como libres (contaminación), en forma líquida, pero también gaseosa (vapores), lo que puede generar atmósferas explosivas que hacen especialmente peligrosas operaciones con maquinaria pesada. Por otro lado, es exhaustiva. Los sondeos constituyen puntos de información precisos, pero aislados, que además no pueden ubicarse próximos a los potenciales focos de contaminación (tanques subterráneos de almacenamiento o las tuberías de distribución), por razones de seguridad. Por el contrario, los mapas CEN cubren la totalidad de la instalación objeto de estudio, proporcionando información continua y en dos dimensiones (mapa) del estado del subsuelo.

Estas ventajas están dando sus frutos y la tecnología ya se está haciendo hueco en el sector. “Hemos duplicado nuestras ventas en 2023, y ya tenemos planificada la mitad de todo el año 2024. No sólo advertimos de la posible contaminación en el suelo, si no que proporcionamos seguridad a aquellos clientes que quieren estar tranquilos, y



Equipo CENmapper, de GeoCENmap, para medición del campo eléctrico a nivel de la superficie.

saber que todo está como tiene que estar. Con las fugas descontroladas, un pequeño problema se convierte en un desastre mañana. La vigilancia es trascendental para muchos gestores de instalaciones”, explica José Martí.

El mapa CEN

El resultado de la tecnología es el mapa CEN. GeoCENmap representa el mapa CEN en una escala propia de niveles CEN, en la que la probabilidad de que exista contaminación en el suelo es mayor según ascienden los niveles, estableciéndose el nivel 8 como umbral a partir del cual se interpreta la presencia de contaminación en el subsuelo.

La escala de niveles CEN, vinculada a una gama de colores muy intuitiva, permite una interpretación fácil y rápida. El mapa CEN de la figura 1 corresponde a una estación de servicio recién construida, aunque ya operativa, y en la que el mapa CEN corrobora que la estación está completamente limpia.

Sin embargo, el mapa CEN de la figura 2 corresponde a una estación de servicio en la que, por desgracia, los sondeos realizados muestran que los suelos y las aguas están contaminados, a causa de fugas accidentales en las instalaciones de almacenamiento y distribución.

Como puede verse, es muy fácil determinar si el emplazamiento está limpio, o por el contrario, sufre contaminación, así como las zonas en las que, en caso de haberla, se localiza principalmente.

Técnica geofísica, pero con resultados cuantitativos

Actualmente, GeoCENmap ha generado modelos que otorgan a su tecnología una capacidad predictiva del 80%, lo que signifi-

fica que es capaz de predecir, con un 80% de acierto, si en un punto determinado de una instalación, las muestras de un sondeo resultarían limpias o contaminadas por hidrocarburo (conforme a los límites legales actuales de la normativa española).

Cambio de paradigma en el estudio de la contaminación de suelos

Sólo en España existen más de 16.000 instalaciones del tipo estación de servicio, un porcentaje relevante del que no se dispone de investigación de sus suelos y, por tanto, son potenciales focos de contaminación por hidrocarburos de nuestros suelos y aguas, con el consiguiente riesgo para el medioambiente y la salud.

Adicionalmente, muchas de las investigaciones realizadas mediante sondeos, con elevados costes, acaban concluyendo que no existe contaminación en el subsuelo, puesto que todas las muestras analizadas resultan estar limpias, por lo que la inversión se ha realizado en vano, ya que no existía riesgo ambiental que investigar.

En este contexto, es dónde el mapa CEN de GeoCENmap se constituye en una herramienta con la máxima aplicabilidad. En pocos días, y de una forma económica y sencilla, es posible determinar si, por ejemplo, una estación de servicio puede constituir un riesgo para el medioambiente o no. Esta capacidad de clasificar el riesgo ambiental de cualquier industria que opera con hidrocarburos, este screening, es la oportunidad que ofrece la técnica a los gestores del riesgo ambiental de este tipo de emplazamientos. Gestores propios de las empresas, en el ámbito privado, pero también los gestores públicos, administraciones, que pueden recurrir a la técnica para disponer de información preliminar de un gran número de emplazamientos, que de otra manera no serán

investigados (por falta de recursos), hasta pasado mucho tiempo.

Los mapas CEN pueden identificar de una manera mucho más rápida aquellos emplazamientos que pueden constituir un riesgo para la salud de las personas. “Realizar sondeos cuyas analíticas demuestren la ausencia de contaminación en instalaciones en las que el mapa CEN podría haber advertido de que la probabilidad de contaminación es muy baja, supone desperdiciar recursos que podrían haber quedado disponibles para investigar instalaciones en las que el mapa CEN sí advierte de un posible riesgo ambiental”, explica José Martí.

I+D determinante y continuo

El desarrollo de una tecnología tan novedosa ha implicado una potente apuesta por el I+D. GeoCENmap S.L. ha construido un modelo a escala del subsuelo, una piscina experimental de 8 m x 4 m x 3 m (largo, ancho, profundo), dividida en dos subceldas de 4 m x 4 m x 3 m, rellenas de material de granulometría variable, simulando el terreno natural y con la posibilidad de variar el nivel de agua en su interior, pudiendo recrear el ascenso o descenso del nivel freático. En el interior de la piscina se monitoriza el campo eléctrico en tres dimensiones, con más de 400 electrodos enterrados y 8 kilómetros de cable.

Además de otras muchas, se han realizado pruebas elementales de concepto, como la infiltración controlada de gasóleo y gasolina, y se ha estudiado la reacción del CEN, determinando la relación causa/efecto de la llegada del hidrocarburo al subsuelo y la reacción del campo eléctrico.

Buenos compañeros de viaje, buen destino

La tecnología se ha desarrollado bajo el pa-

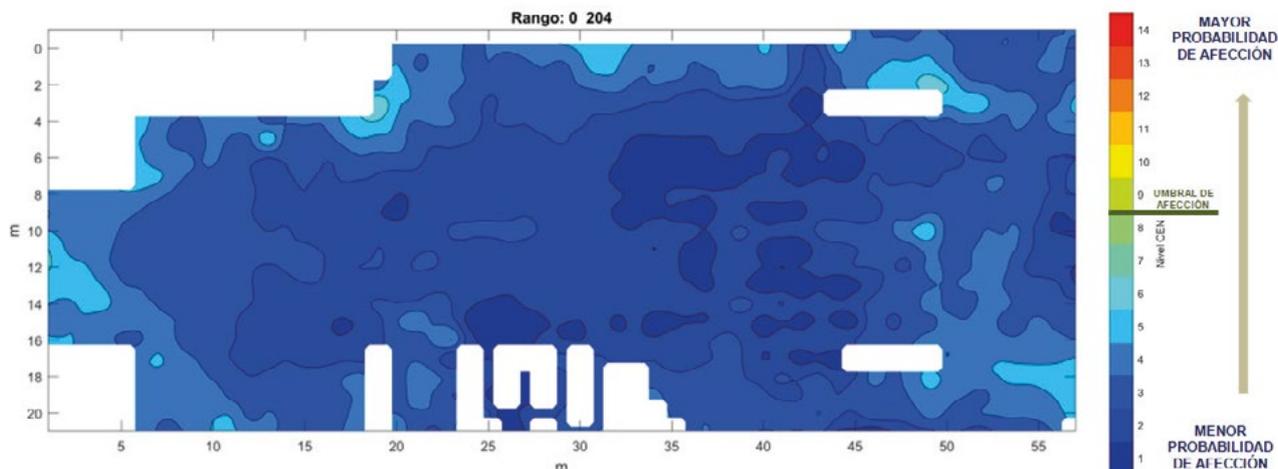


Figura 1. Mapa CEN de una estación de servicio completamente limpia.

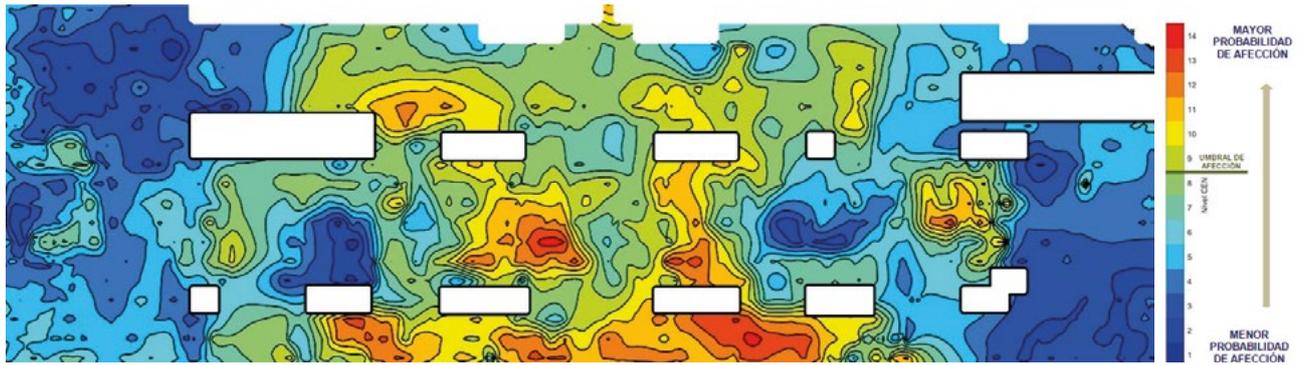


Figura 2. Mapa CEN de una estación de servicio, en la que los suelos y las aguas están contaminados.

raguas de convenios de colaboración con universidades públicas. En concreto, GeoCENmap mantiene un convenio con el Departamento de Geofísica de la Facultad de Geología, de la Universidad de Barcelona. “Las empresas y las universidades tenemos mecanismos de colaboración que multiplican las oportunidades, y ayudan a convertir las ideas en proyectos útiles para la sociedad. En nuestro caso, en la Universidad hemos encontrado el apoyo y asesoramiento necesarios para apuntalar nuestras iniciativas, y darles la excelencia necesaria para abrirse camino en un mundo tremendamente competitivo. Por otro lado, GeoCENmap no habría podido desarrollar su tecnología sin el acuerdo de colaboración, para cuatro años, con CEPSA, firmado en el año 2019.

Esta técnica necesitaba fuego real, es decir, validar los resultados en instalaciones operativas de las que se dispusiera de campañas de sondeos con multitud de muestras de suelos y aguas analizadas recientemente. CEPSA ha demostrado desde el principio de nuestra colaboración una voluntad inequívoca de avanzar por el camino de la innovación, en busca de herramientas que faciliten el estudio de los suelos y la detección precoz de la potencial contaminación. Para llegar a un buen destino tienes que elegir bien a los compañeros de viaje, aunque ellos también tienen que ver en ti a un compañero interesante”, destaca José Martí.

Reconocimientos

Desde el inicio de su actividad, en 2015, la iniciativa ha sido reconocida de diversas formas, mediante la concesión de proyectos por parte del Ministerio de Industria (proyecto Neotec), en el año 2017, o a través la concesión de premios como el Emprendedor XXI, promovido por ENISA y Caixabank en el año 2020, el Premio CAEB-Santander a la empresa tecnológica con mayor potencial de Baleares en 2021, o la última edición de los Premios a la Innovación Tecnológica, Empresarial y de la Fundación Técnica Industrial 2022. “También estamos muy agrade-

cidos a todas las entidades que han reconocido nuestra labor y nos han ayudado a visibilizar nuestro proyecto. Nos ayuda muchísimo a avanzar con nuestro objetivo, que no es otro si no conseguir el reconocimiento de la técnica, tanto por el sector privado como por las administraciones”, señala José Martí. Actualmente, ya han trabajado o tienen contrato vigente con las principales empresas del sector, como CEPSA, REPSOL o EXOLUM. Igualmente, han mantenido reuniones con las consejerías de Medioambiente de trece de las diecisiete comunidades autónomas. “En contra de lo que pueda pensar mucha gente, la Administración demuestra un gran olfato con este tipo de oportunidades que ofrece el avance de la tecnología. Son muy rigurosos en la evaluación de los resultados, pero una vez que certifican la eficacia, son los primeros que empujan para implantarla, porque entienden que es una herramienta buena para todos los actores, ya que las empresas tienen mucho más fácil investigar sus suelos y detectar posibles problemas ocultos, y desde la Administración pueden identificar los riesgos para la

salud de las personas de una forma mucho más rápida”, subraya.

Más aplicaciones

Por el momento, la tecnología desarrollada por Global CEN Technologies, en 2015, ha derivado en dos iniciativas empresariales que ya se están comercializando, pero el nuevo conocimiento sobre el Campo Eléctrico Natural (CEN) abre la puerta a muchas otras aplicaciones que Global CEN tiene previsto desarrollar en los próximos años, en ámbitos tan diferentes como la agricultura, la obra civil o la salud. “El CEN es una enorme fuente de conocimiento que todavía no somos capaces de tasar bien. En breve desarrollaremos nuevas aplicaciones que ayudarán a tener una mejor producción agrícola, y otras que nos ayudarán a descansar mejor por la noche. Hemos abierto un cofre del tesoro de la ciencia con aplicaciones concretas. Es una enorme oportunidad que poco a poco vamos materializando”, concluye José Martí.

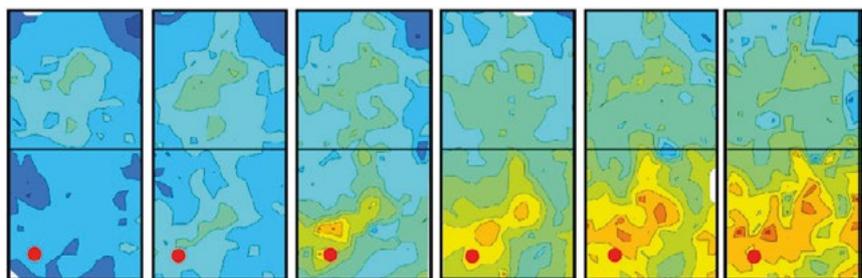


Figura 3. En esta secuencia quincenal de mapas CEN, realizados de la superficie de la piscina experimental, puede apreciarse el efecto que provoca la infiltración controlada de gasóleo en el punto rojo.

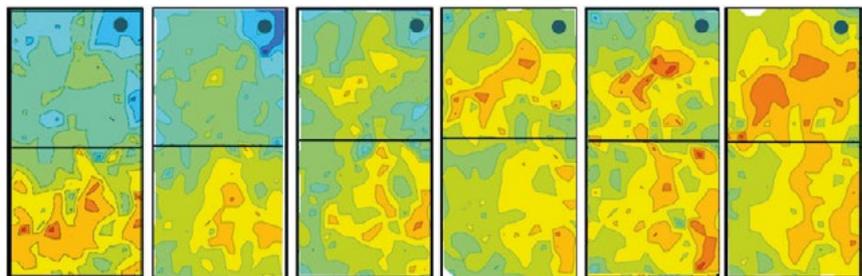


Figura 4. Estabilizado el efecto de la infiltración de gasóleo, se procedió a infiltrar gasolina en la esquina opuesta (punto azul), elevándose el CEN en esa zona progresivamente, al igual que ocurrió con el gasóleo.

Máster Universitario en Prevención de Riesgos Laborales

60
ECTS

100%
on line

Titulación
oficial por
**Universidad
Francisco
de Vitoria**

Institución
colaboradora:
LA LEY

 Duración: 9 meses

 Modalidad: *On line*

 Créditos: 60 ECTS

 Idioma: Español

 Prácticas en empresas: 200 horas

 **3 disciplinas técnicas preventivas:**
• Seguridad en el trabajo
• Higiene industrial
• Ergonomía y psicología aplicada

 Acceso a CISS LABORAL

**¿Qué pasaría si la
SEGURIDAD fuera
tan importante
como cumplir con
la LEY?**

La **Prevención de Riesgos Laborales** continúa siendo una materia imprescindible en todas las empresas. La seguridad y salud laboral, la inclusión, el envejecimiento poblacional, el teletrabajo y la diversidad serán la prioridad durante los próximos años. El futuro de la seguridad y salud en el trabajo implicará que los profesionales adopten un **enfoque multidisciplinar y humanístico** orientado al bienestar de los trabajadores.

Simultáneamente, surgen nuevos desafíos, como el impacto de la pandemia en el mantenimiento del sistema productivo que hace necesaria la **PRESENCIA DE TÉCNICOS EN PREVENCIÓN** altamente capacitados con dotes de liderazgo a todos los niveles.

Por tanto, nuestro Máster te brinda la formación que necesitas para poder trabajar como **TÉCNICO SUPERIOR EN PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES** ya sea en un servicio de prevención ajeno, como trabajador designado en una pequeña empresa o como técnico del servicio de prevención propio de grandes empresas y organizaciones.

CONTACTA CON NOSOTROS

Para más información así como para formalizar la matrícula, puedes ponerte en contacto y te orientaremos en el proceso de inscripción.



Alicia Calderón
Formación In Company | Gestión Educativa
Unidad de Grandes Cuentas, Universidades e Instituciones
669.814 158
alicia.calderon@aranzadilaley.es



El COGITI presenta en Zamora las Oficinas de Asesoramiento Industrial para promover la industrialización de zonas despobladas de España

El objetivo del COGITI, a través de sus Colegios Oficiales, es liderar la identificación de territorios clave para atraer e impulsar la ejecución de dichos proyectos, que permitan maximizar los recursos de los distintos territorios.

El pasado 25 de octubre se llevó a cabo presentación oficial de la Industrial Advisory Office -IAO- (Oficina de Asesoramiento Industrial) de Zamora, cuyo proyecto piloto será el punto de partida de la iniciativa impulsada por el Consejo General de la Ingeniería Técnica Industrial de España (COGITI), a través de sus Colegios Oficiales, para la creación de estas IAO con el fin de promover nuevos proyectos industriales en zonas despobladas de España.

El objetivo del COGITI, a través de sus Colegios Oficiales, es liderar la identificación de territorios clave para atraer e impulsar la ejecución de dichos proyectos, que permitan maximizar los recursos de los distintos territorios. Los colegios profesionales de ingeniería de la rama industrial pueden desempeñar un papel relevante en la solución del problema de la "España vaciada", ya que tienen la capacidad de reunir y liderar a los profesionales de ingeniería y coordinar sus esfuerzos para abordar desafíos específicos en el campo de la ingeniería.

El proyecto piloto, auspiciado por el Colegio de Ingenieros Técnicos Industriales de Zamora (COGITIZA), y que cuenta con el respaldo de la Junta de Castilla y León, entre otras entidades colaboradoras, surge como respuesta a la urgente problemática de la denominada "España vaciada, España de las oportunidades", que afecta a numerosas provincias de nuestro país, especialmente a las zonas rurales, donde la despoblación, la migración hacia áreas urbanas y el envejecimiento de la población han generado un desequilibrio demográfico y un impacto negativo tanto económico como social.

La falta de oportunidades laborales y servicios básicos exige abordar este desafío de manera sostenible y equilibrada. Por ello, se ha puesto en marcha el proyecto de creación de dichas Oficinas de Asesoramiento Industrial en diferentes territorios de España, con Zamora como proyecto piloto. Estas oficinas tienen como objetivo revitalizar las áreas afectadas por la despoblación y convertirlas en plataformas inclusivas.

La presentación de este proyecto se

ha llevado a cabo en una jornada, que ha contado con la participación de destacados representantes del ámbito político, institucional, social, universitario y empresarial.

El acto ha comenzado con la intervención de la delegada territorial de la Junta de Castilla y León en Zamora, Leticia García Sánchez: "Buscamos una economía más competitiva y con la financiación adecuada para que los proyectos puedan seguir adelante. Para ello, es fundamental no obstaculizar las inversiones y acortar en todo lo posible los tiempos de tramitación por parte de la Junta de Castilla y León", destacó. También se ha referido a las capacidades y potencialidades de Zamora para la implantación de proyectos relacionados con la gestión del agua y el hidrógeno verde, y se ha mostrado una gran "defensora" de los colegios profesionales, al considerar que "sois un eje vertebrador de la economía y un punto de apoyo para las Administraciones Públicas".

A continuación, ha tomado la palabra el presidente del Consejo General de la Ingeniería Técnica Industrial de España (COGITI), José Antonio Galdón Ruiz, que ha puesto el énfasis en "la dependencia energética" que tenemos en la actualidad, y que provoca una distorsión en los precios de la energía que, sin duda, afecta a la industria. En relación a los proyectos que se pondrán en marcha a través de estas IAO, señaló que "no son proyectos fáciles a corto plazo, pero sí muy ilusionantes, y con ellos se lograrán los objetivos de los colegios profesionales de servir a la sociedad, para generar empleo y riqueza". Y lanzó un deseo: conseguir entre todos el objetivo que se marcó la UE, para 2020, de lograr que el sector de la industria represente el 20% del PIB español.

Por su parte, José Luis Hernández Merchán, decano de COGITIZA, ha explicado cómo surgió este proyecto, en un grupo de trabajo, en el marco institucional de la Unión Europea, y teniendo como inspiración casos de éxito de proyectos anteriores que ya se han llevado a cabo, en los que el apoyo de la Administración es fundamental. También indicó

que, aunque el proyecto piloto arranca en Zamora, se trata de una iniciativa con proyección a nivel nacional, por lo que cuenta con el apoyo del COGITI para crear una importante red de Oficinas de Asesoramiento Industrial, y para lo que se contará con la colaboración de los Colegios de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales que sea necesaria.

Gerardo Arroyo Herranz, enlace del COGITI en la Unión Europea, señaló que, según las previsiones de los expertos, "en 2050, el 30% de la población mundial vivirá en zonas urbanas", con lo que ello supone para el detrimento de calidad de vida, para el medioambiente, o para la cadena de suministros, entre muchos otros aspectos. "Por ello, era necesario pararse a pensar y ser conscientes de la necesidad de industrializar las zonas rurales, con proyectos concretos y precisos, para los que hace falta inversión y ayudas para ponerlos en marcha", afirmó.

La jornada ha contado también con las intervenciones de Vicente Rodríguez Sáez (Comisión Europea – Senior Expert DG REGIO.2 – Portugal y España) y Fernando Ríaza Fernández (Policy Analyst Regional Development and Multi-level Division Centre for Entrepreneurship, SMEs, Regions and Cities – Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico, OCDE), que se han centrado en las ayudas europeas para el desarrollo local y casos de éxito en Europa.

A continuación, ha tenido lugar una mesa redonda sobre "Ventajas y oportunidades IAO", moderada por el decano COGITIZA, José Luis Hernández Merchán, en la que han participado el presidente de la Diputación de Zamora, Javier Faúndez Domínguez; el coordinador de la Dirección General de Energía y Minas de Castilla y León, Miguel Martínez de Paz; el secretario de Acción Sindical UGT en Castilla y León, Raúl Santa Eufemia Rodríguez, y finalmente no pudo asistir el vicepresidente de la GEOE en Castilla y León, Miguel Ángel Benavente Castro, pero participó una representante de la organización en su lugar.

El cierre de la jornada ha estado a cargo del vicerrector de Economía de la Universidad de Salamanca (USAL), Javier González Benito, quien ha manifestado el apoyo de la citada universidad a esta iniciativa, y ha destacado la importancia de contar, además de con los recursos necesarios para poner en marcha este proyecto, con el capital humano, y "en esto se puede hacer mucho desde el ámbito universitario", ya que es donde se forman los futuros profesionales. "Estas Oficinas de Asesoramiento Industrial darán el soporte estructural para poder llevar a cabo esta magnífica iniciativa, y en este sentido es necesaria la implicación de todos para conseguir los fondos europeos", manifestó, para que todos los territorios tengan oportunidades de desarrollo y progreso. Y terminó deseando "toda la suerte del mundo" a este proyecto.

Proyecto piloto en Zamora

La provincia de Zamora ha experimentado un problema de despoblación, como muchas otras áreas rurales de España, y por este motivo presenta un "escenario" apropiado para el lanzamiento del proyecto piloto.

En este sentido, el Colegio de Ingenieros Técnicos Industriales de Zamora (COGITIZA) actúa como líder pionero del proyecto, pues lleva años colaborando con la Administración, la sociedad civil y la universidad, de forma proactiva, en acciones encaminadas a mejorar la situación de la industria en la provincia.

El Decano de COGITIZA, José Luis Hernández Merchán, ha destacado, desde el primer momento, la importancia de poner en marcha esta iniciativa en la provincia, teniendo en cuenta el potencial que posee en materia de gestión del agua, pues la región cuenta

con una larga historia tanto en este aspecto como en el aprovechamiento sostenible de recursos hídricos y, por otro lado, en el hidrógeno verde como posible vector de desarrollo e industrialización.

De este modo, se utilizaría el agua como recurso para generar riqueza, con una ambiciosa estrategia de economía circular, y convertir así a Zamora en un referente europeo de conocimiento sobre la innovación referente a la gestión del agua en Europa (UE BLUE DEAL).

En lo que respecta al hidrógeno verde, Zamora puede convertirse en una pieza clave dentro del proyecto H2Med, una iniciativa que busca impulsar y abastecer de hidrógeno verde a Europa, como fuente de energía limpia; además Zamora se ubica, geográficamente, en el punto de unión entre España y Portugal.



Representantes institucionales y autoridades en el acto de presentación del proyecto piloto impulsado por el Colegio de Ingenieros Técnicos Industriales de la Provincia de Zamora, en colaboración con el COGITI, para promover la industrialización de zonas despobladas de España.º

El presidente de COGITI participó en el XVII Congreso Centroamericano de Ingeniería Industrial y Mecánica Industrial

Durante su participación, en un acto celebrado de forma telemática el pasado 28 de septiembre, el presidente de COGITI, José Antonio Galdón Ruiz, respondió a las preguntas de los alumnos de ingeniería sobre diversas materias, como sus comienzos en la profesión, los principales objetivos y actuaciones del

COGITI, la formación de los ingenieros a lo largo de la vida y su incorporación al mundo laboral, la transición energética o los retos de la industria 4.0, entre muchos otros.

La entrevista "El camino hacia la Ingeniería: Diálogo con el Sr. Galdón", suscitó un gran interés, al reunir a más

150 alumnos de Ingeniería Industrial y Mecánica Industrial de diversas universidades de Centroamérica, todos ellos participantes en el citado Congreso EMI 2023, y fue realizada, como portavoz de todos ellos, por Israel de Jesús Lutin Morales, estudiante de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala.

Manuela Delgado Cruz

Ingeniera Técnica Industrial y product manager de productos digitales

“La falta de referentes es la principal causa de la brecha de género en las áreas STEM”

Mónica Ramírez

Manuela Delgado es un referente en el sector industrial, del que forma parte desde hace más de veinte años, especialmente por su visión sobre cómo aplicar la tecnología al servicio de la sociedad, y por su enfoque hacia una digitalización inclusiva.

Actualmente trabaja como senior innovation leader en NTT Data, uno de los 10 principales proveedores de servicios informáticos del mundo, con sede en Tokio, y que opera en más de 50 países. Desde el inicio de su carrera, además de desarrollar su profesión como ingeniera, orienta su trabajo en la innovación, enfocada en que el sector industrial esté siempre actualizado en el ecosistema de las tecnologías, e impulsando la transformación digital.

En su afán por dar visibilidad al trabajo de las ingenieras en el tejido industrial, y por promover las denominadas vocaciones STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas), en 2020 impulsó la publicación, junto con otras diecisiete colegas ingenieras, del libro “10001 amigas ingenieras”. Este libro busca fomentar e incentivar la competencia científica en las niñas a través de historias de esfuerzo y curiosidad, que van acompañadas de experimentos, recetas especiales e interesantes datos.

Asimismo, es miembro de la Junta Directiva de la Asociación de Mujeres Investigadoras y Tecnólogas, una organización integrada por investigadoras y tecnólogas de diversas disciplinas, que pretende ser una red de apoyo para otras investigadoras y universitarias, y de la Asociación de Directivas de Aragón.

Además, forma parte del elenco de ingenieras que han sido elegidas para participar en la iniciativa “Mujeres ingenieras de éxito y su impacto en el desarrollo industrial”, el programa que hace varios años puso en marcha la Unión de Asociaciones de Ingenieros Técnicos Industriales y Graduados en Ingeniería de la rama industrial de España (UAITIE), y que incluye la exposición itinerante “Mujeres ingenieras de éxito”, que recorre los distintos Colegios Oficiales de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales de España.



Manuela Delgado Cruz

Comencemos hablando de su formación académica, como Ingeniera Técnica Industrial y postgrado en Ingeniería Medioambiental, ¿qué le hizo decidirse por estudiar una carrera de Ingeniería, y más concretamente de la rama industrial?

Desde pequeña me gustaba saber y entender cómo funcionaban las cosas. Se me daban bien las matemáticas y la física, y encontré, ya en el instituto, la ingeniería como fuente de conocimiento para explorar todo eso que siempre me había gustado saber.

Las fábricas me parecían sitios fascinantes, entraba materia prima y salía producto elaborado. Atraída por ese mundo industrial, me especialicé en mecánica y cálculo de máquinas. A la Ingeniería medioambiental llegué porque, de todo ese proceso de fabricación, me atraía la protección del medioambiente, la optimización de las materias primas, y poder minimizar los humos que salían por las chimeneas. Así que, nada más aprobar el proyecto, y ya trabajando, cursé el postgrado de Ingeniería Medioambiental.

¿Cómo fueron sus comienzos en el mundo laboral y su evolución hacia el área de la innovación?

Comencé a trabajar nada más entregar mi Proyecto Fin de Carrera, que realicé en el Instituto Tecnológico de Aragón (Itainnova), en una

empresa de ascensores (MP Ascensores), que estaba ofreciendo un puesto para el departamento de Medioambiente, al que apliqué y en la que he permanecido durante 21 años.

A los pocos meses de entrar en la empresa, me ofrecieron dirigir proyectos de ascensores especiales. Una nueva línea que ponía en marcha la empresa. Recuerdo con mucho cariño esa época porque viajaba por todo el mundo.

Después me convertí en “product manager”. Esta función me dio una visión holística de la empresa, y fue la que me fue abriendo la mente hacia la innovación. Durante los años en los que trabajaba en el lanzamiento de productos al mercado, veía cómo iba cambiando el mercado, la comunicación, los procesos, y la trazabilidad como consecuencia de las emergentes “nuevas tecnologías”, lo que me llevó a formarme, en 2017, en Transformación Digital.

Esa formación fue clave para mí. Encontré en la tecnología la forma de dar cabida a mis pensamientos más divergentes o de entender los procesos de otra manera. Seguí formándome en Innovación, y aplicándolo en mi trabajo. También comencé a mentorizar StartUps que ofrecían soluciones innovadoras aplicando la tecnología, y comencé a experimentar el mundo “Agile”, las herramientas colaborativas, y a diseñar los productos con el cliente en el centro. En MP comenzábamos a desarrollar productos digitales muy innovadores, como la plataforma de telemantenimiento para ascensoristas.

Cuando llegó la pandemia, en 2020, decidí focalizarme en los datos. Entendía que serían la base de todas las innovaciones futuras, y me formé en Big Data e Inteligencia Artificial. Tengo que reconocer que es lo más difícil y complejo que he estudiado nunca, pero una vez que lo entiendes, es como abrir una puerta que ya no creo que pueda cerrar.

Una vez hecha esta formación, quise seguir explorando el lado más social de la tecnología, por lo que decidí reinventarme y probar suerte en el sector tecnológico. Y ciertamente, tuve la suerte de que NTT Data, con su sede de innovación en Zaragoza, me diera una oportunidad para entrar a formar parte de la compañía en 2021.

En la actualidad, es “product manager” en NTT Data Europe & Emeal, uno de los 10 principales proveedores de servicios informáticos del mundo. ¿Qué funciones desempeña? ¿Cómo es su día a día?

Con mi expertise como product manager, podría decir que realizo las mismas funciones que he desarrollado durante más de 15 años. Lo que cambia es el entorno. La velocidad a la que trabajamos es de vértigo. Se trabaja con metodología (mentalidad) “Agile”, y al estar en el área de innovación, desarrollamos productos que no serán asumidos por la sociedad hasta dentro de unos años. Se puede decir que vivimos en el futuro.

Los aspectos más diferentes entre ambos sectores, el industrial y tecnológico, en mi experiencia son los siguientes: la fábrica es el software (yo digo que se construye con ceros y unos). Esto da una agilidad que permite trabajar con “Pruebas de Concepto” y “Producto Mínimo Viable” (MVP), para seguir creciendo con iteraciones a partir del feed back del usuario final. El centro es el cliente: se estudia la necesidad y el usuario con mucha profundidad antes de comenzar a construir. El sector industrial profundiza más en qué producto puede fabricar.

Estos dos conceptos deberían adoptarse más por el sector industrial. Me ha sorprendido el gran número de personas con Ingeniería Industrial que hay en el sector tecnológico. Yo creo que la ingeniería industrial es la bisagra entre los dos sectores. Ambos sectores se necesitan.

¿Qué es lo que más le gusta de su trabajo?

Que puedo explotar al máximo mi mentalidad divergente y mi creatividad. La innovación lo permite y lo necesita.

En su faceta de emprendedora, es fundadora de “El curioso caso del sesgo de la croqueta”, un proyecto de divulgación científica y tecnológica que tiene el propósito de acercar a las personas la Inteligencia Artificial, ¿en qué consiste exactamente este proyecto?

Sí, este proyecto es una consecuencia de todo lo aprendido hasta ahora. La divulgación es otra de mis pasiones. “El curioso caso del sesgo de la croqueta” es un proyecto de divulgación tecnológica y ciencia ciudadana, que tiene el propósito de acercar cómo funciona la Inteligencia Artificial a todas las personas, y cómo podemos impactar con nuestra herramienta más potente, la inteligencia emocional.

En febrero de 2023, puse en marcha este proyecto con una excompañera de MP Ascensores. Ella se fue de la compañía años antes

que yo, pero seguíamos en contacto. En los últimos años, ella se había especializado en Inteligencia Emocional (IE) y yo en Inteligencia Artificial (IA). Chus, además, tiene un bar referente por sus sabrosas croquetas, así que sumamos IA + IE + croquetas y salió el proyecto.

¿En qué consiste? El proceso en el que se recogen los datos en un proyecto de Inteligencia Artificial se llama “Ingesta de datos”. En este proyecto hacemos una “ingesta literal”, porque nos comemos los datos de entrada, croquetas.

El evento consiste en una “ingesta literal”. Les pedimos a las personas que asisten que, al comer la croqueta, asocien su sabor a la emoción que sienten en ese momento. Lo trasladan a un formulario. Nosotras les vamos contando qué se pone en marcha en ese momento, y después mostramos los resultados, que también nos los comemos. Lo mejor es experimentarlo, porque este proyecto no se puede etiquetar. Es algo innovador, eso sí.

Lo relevante es que esas personas experimentan cómo se entrena un modelo de IA y, además, nos lo pasamos muy bien. Hemos hecho dos eventos y estamos organizando el próximo para enero. En junio nos dieron el Premio al Producto Digital 2023, y quedamos finalistas en el concurso de croquetas de Zaragoza y provincia con “la croqueta del miedo”.

En 2020 impulsó la publicación, junto con otras diecisiete colegas ingenieras, del libro “10001 amigas ingenieras”, ¿qué podemos encontrar en este libro y a qué público se dirige fundamentalmente?

Formo parte de Junta Directiva de la Asociación de Mujeres Investigadoras y Tecnólogas (AMIT-Aragón) desde 2018 y, en 2020, coordinaba el proyecto “una ingeniera en cada cole”, en el que más de 200 voluntarias, ingenieras o tecnólogas, van a los colegios de primera para dar visibilidad a su profesión.

En marzo de 2020, de pronto nos quedamos sin colegios por la pandemia y decidimos convertir el proyecto en libro. Las 17 ingenieras más involucradas escribimos, cada una en un capítulo, en el que narramos qué hacemos en nuestro día a día, hablamos de otra mujer en la ciencia, y proponemos un taller en el que aprender.

Los talleres también los contamos en el canal de Youtube: “Una ingeniera en cada cole”. Está dirigido a niños y niñas de primaria, y también al profesorado. Pueden encontrar en el libro un repositorio de mujeres referentes y de talleres para realizar en clase o en casa. Vamos por la segunda edición, y pronto habrá que preparar la segunda parte con otras 17 ingenieras que tengan trabajos que hasta ahora no existían.

Su compromiso con la diversidad de género y la inspiración de vocaciones científico-tecnológicas, se ve reflejado en su reconocimiento como una de las “TOP 100 Líderes de España”, así como en la participación en diversas asociaciones, como la Asociación de Mujeres Investigadoras y Tecnólogas (AMIT) y Directivas de Aragón. ¿Es necesario dar una mayor visibilidad al trabajo que realizan las ingenieras en el tejido industrial?

Sí, es necesario. La falta de referentes es la principal causa de la brecha de género en las áreas STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics). Hacen falta estas acciones para mostrar el trabajo de mujeres, para que otras se inspiren y fomenten vocaciones. Quiero incidir en que este trabajo no es un trabajo de mujeres para mujeres. La reducción de la brecha de género es un propósito general que afecta a la sociedad, por lo que tiene que estar promovido por mujeres y hombres. Las empresas tienen la responsabilidad social de involucrarse para conseguir este propósito.

¿Qué actuaciones se pueden llevar a cabo para aumentar las vocaciones por los estudios de carreras técnicas, las denominadas STEM, que tan alta demanda tienen en la actualidad por parte de las empresas?

Sobre todo, dar a conocer qué se hace en la ingeniería con casos reales. La ingeniería está muy estereotipada y se desconoce la gran capacidad de creación que tiene. Pongamos el foco en contarla. Hagamos divulgación a la sociedad.

Se puede conseguir con acciones sencillas desde las empresas, como permitir que las mujeres hagan divulgación de su trabajo en colegios, buscar a la candidata para que asista a paneles del sector. Desde los centros educativos, mostrar la profesión de la ingeniería de la mano de mujeres que cuenten con pasión lo que hacen.

Desde los Colegios Oficiales, lo mismo, dar visibilidad. Quiero resaltar la exposición de “Mujeres ingenieras referentes y su aportación al tejido industrial”, que ha puesto en marcha mi Colegio (COGITIAR) con este propósito. En definitiva, dar visibilidad y no normalizar la falta de mujeres en estas áreas.

¿Cuáles son sus próximos proyectos?

Quiero seguir dando vida a “El curioso caso del sesgo de la croqueta”, sé que voy a hacer algo con IA generativa en 2024, que aún estoy aterrizando, y terminar el libro que llevo escribiendo desde hace años, y que tiene mucho que ver con lo que he contado en esta entrevista.

MADRID

>> La “Protección contra incendios” expone en Madrid los últimos avances del sector



El Pabellón de Convenciones Madrid Destino, en la Casa de Campo, fue el escenario elegido para el II Congreso Técnico Nacional de Protección Contra Incendios, que tuvo lugar el pasado mes de septiembre, los días 28, 29 y 30.

El principal objetivo de esta gran cita ha sido el de acercar, a las empresas que dedican su labor en el sector, la protección y la seguridad, además de dar a conocer los últimos avances y estudios realizados sobre esta materia tan importante para la sociedad.

El público asistente ha podido disfrutar de interesantes mesas redondas, donde se ha escuchado a los especialistas del sector, y conocer los últimos avances del sector, en la zona de exposición, que ha contado con la participación de más de 30 empresas punteras.

El Consejo General de la Ingeniería Técnica de España (COGITI), como “patrono” de la Fundación Técnica Industrial, editora de esta revista Técnica Industrial, participó en esta gran cita, en lo que a protección contra incendios se refiere. Durante las tres jornadas que se desarrollaron en la capital, COGITI ha participado en el desarrollo del evento en tres mesas redondas: “Instalación de sistemas de protección contra incendios. Mejores prácticas y desafíos en la instalación de sistemas de protección contra incendios”, “Modificaciones RIPCI y RSCIEI”, e “Ingeniería de protección contra incendios y diseño seguro, la importancia de la intervención de los bomberos”.

De igual forma, también se ha celebrado la reunión de su Grupo de Trabajo de Ejercicio Libre, en la mañana del viernes 29 de septiembre. Un gran éxito de participación y asistencia en estos tres días de feria.

En esta gran cita participaron, además de COGITI, otras asociaciones destacadas a nivel nacional. Tal es el caso de AERME (Asociación Española de Empresas Instaladoras y Mantenedoras de Equipos y Sistemas Contra Incendios), AES (Asociación Española de Empresas de Seguridad), APICI (Asociación Profesional de Ingeniería de Protección Contra Incendios), APTB (Asociación Profesional de Técnicos de Bomberos), CGATE (Consejo General de Colegios Oficiales de Aparejadores y Arquitectos Técnicos), CONAIF (Confederación Nacional de Asociaciones de Empresas Instaladoras y Mantenedoras de Energía y Fluidos), FE-DAOC (Federación Española de Asociaciones de Organismos de

Control) y Fundación Fuego.

Gracias a ello, ha quedado de manifiesto una perspectiva transversal, con una gran repercusión que se ha traducido en una importante afluencia de visitantes interesados en temas relacionados con la protección y la prevención de incendios.

MADRID

>> TRAFIC, el evento internacional de movilidad sostenible que conecta todas las industrias



El Salón Internacional de la Movilidad Segura y Sostenible, TRAFIC, se celebró del 24 al 16 de octubre, en el marco de la segunda edición de Global Mobility Call (GMC), ambos en el mismo pabellón, y localizados en el madrileño Recinto Ferial de IFEMA.

Se trataba de su edición número 18, y de nuevo fue el punto de encuentro de los profesionales de la movilidad segura y sostenible, donde se pueden encontrar todas las soluciones sostenibles e innovadoras de movilidad. Asimismo, TRAFIC cuenta con una larga trayectoria que, sin duda, le han consolidado como la feria de referencia en lo que a movilidad segura y sostenible del sur de Europa se refiere.

Con la incorporación de Global Mobility Call, se suma así el éxito de esta última que, en su pasada y primera edición, fue todo un éxito, que se ha repetido en este año.

Dentro de la agenda de esta gran cita, su amplia programación ha permitido albergar jornadas Técnicas de GMC, del FORO TRAFIC, donde se han abordado, de la mano de expertos, las cuestiones específicas más directamente relacionadas con la seguridad vial. De igual forma, conferencias, foros de debate, networking, y encuentros B2B, así como workshops y webinars han tenido cabida dentro de esta gran cita, donde se han tratado y gestionado las nuevas soluciones que se proponen dentro del sector.

Todo esto ha sido posible gracias a la implicación de las principales asociaciones nacionales e internacionales del sector de la movilidad; de la Federación Española de Municipios y Provincias, FEMP, y del Gobierno de España; así como la coincidencia de la Presidencia española de la UE, lo que ha supuesto una nutrida participación empresarial nacional e internacional, con una fuerte presencia de ciudades españolas, iberoamericanas y europeas.

Todas estas actividades han reunido en Madrid a los principales actores de la movilidad que, bajo esta iniciativa, persigan fomentar y apoyar, entre los profesionales del sector, el uso de nuevos modelos de transporte eficiente y sostenible, de cara a encontrar soluciones para la protección de usuarios vulnerables (peatones, ciclistas, motoristas, etc.) y, sobre todo, afrontar los nuevos retos en el camino de la transformación energética, el internet de las cosas (IoT), la digitalización y la intermodalidad. Reto por la sostenibilidad ha marcado el retorno de Construmat. Por su parte, la próxima edición de este salón se celebrará del 21 al 23 de mayo de 2024 en el recinto de Gran Vía de Fira de Barcelona.

TOLEDO

>> Expertos del sector nuclear, en España y Europa, analizan el papel de la seguridad nuclear



Presentación de la 48 edición de la Reunión Anual de la SNE.

La 48ª Reunión Anual de la Sociedad Nuclear (SNE), celebrada en Toledo los pasados 4, 5 y 6 de octubre, ha congregado a casi 700 expertos del sector nuclear. Concretamente, el Palacio de Congresos "El Greco" ha acogido, este pasado mes de octubre, esta cita del sector nuclear, considerado como el encuentro más importante para profesionales y empresas del sector, y que ha contado con la participación de Naturgy como empresa anfitriona.

A través de 300 ponencias técnicas, completadas con sesiones plenarias y monográficas, en las que se ha analizado el papel del sector nuclear en España y también en Europa, donde muchos países apuestan por esta energía ante el nuevo paradigma energético que se plantea, los profesionales nacionales e internacionales han podido compartir conocimiento. También se han presentado proyectos, productos y servicios más actuales e innovadores, relacionados con las diferentes aplicaciones de la energía nuclear, lo que supone una oportunidad única para los profesionales del sector a la hora de presentar sus empresas.

El presidente de la SNE, Emilio Mínguez, ha subrayado el importante activo que suponen las centrales nucleares, y ha pedido su valoración como objetivo estratégico "al margen de consideraciones políticas". En la rueda de prensa previa a la celebración del evento, Mínguez señaló que "esta reunión anual permitirá compartir conocimientos entre los profesionales del sector, y divulgar sobre la tecnología nuclear, con mensajes objetivos y de una manera independiente". De igual modo, ha destacado el "importante activo" que son las centrales nucleares españolas.

Para la presidenta del Comité Organizador de esta Reunión Anual, Rosa González Gandal, el amplio programa es un punto a destacar, con numerosas sesiones plenarias, sesiones monográficas, encuentros técnicos, talleres, sesión póster o networking, entre otros alicientes. "Esta reunión es un congreso científico-técnico y un punto de encuentro para los profesionales del sector nuclear. En él se comparten experiencias, proyectos innovadores y retos de futuro", indicando también que "las sesiones estarán dedicadas a temas estratégicos, como el paradigma energético en Europa, o el papel de la energía nuclear en el diseño de la estrategia energética de futuro para este país".

En definitiva, "se trata de un evento importante, que mueve a un número relevante de personas, y cuyo impacto económico se estima en un millón de euros para la ciudad", ha concluido Gandal.

MADRID

>> Madrid Tech Show, el evento tecnológico del año en Madrid



Durante los días 30 y 31 de octubre ha tenido lugar, en el Recinto Ferial de IFEMA, en Madrid, la gran feria del sector de la ciberseguridad, Big Data, la Inteligencia Artificial (IA) o el comercio electrónico. España destaca como el motor europeo del auge de la digitalización. De igual forma, esta cita cuenta con el respaldo del Ayuntamiento y la Cámara de Comercio de la ciudad.

Más de 300 empresas se han dado cita en la tercera edición de la mayor feria tecnológica profesional de España celebrada en IFEMA, lo que supone un 30 por ciento más de expositores y un 25 por ciento más de espacio, al ocupar dos pabellones dentro del recinto ferial madrileño. En número de cifras globales, es necesario destacar los 18.000 visitantes profesionales, un 41% más que en la edición anterior, que han podido acudir a las conferencias y espacios en los que han descubierto las soluciones y estrategias propuestas por las empresas expositoras, donde los directivos, expertos e influencers del mundo IT han debatido sobre casos reales y de estudio. En detalle, los asistentes han podido disfrutar de 350 ponentes nacionales e internacionales, distribuidas en hasta 18 teatros, con más de 80 horas de contenido.

Si nos referimos a los contenidos tratados en Madrid Tech Show, ha destacado la sostenibilidad y la reducción de emisiones en el ecosistema tecnológico, sin olvidarnos de los nuevos riesgos en ciberseguridad, la extensión del cloud a toda la infraestructura de una organización, el impacto de la IA, la ética del dato y la eficiencia de Chat GPT en las campañas publicitarias.

Durante dos días, se han mostrado las novedades de empresas líderes en tecnología como IBM, AWS, Huawei, Red Hat, Oracle, Hewlett Packard Enterprise, Schneider Electric, Synack, Cloudera, Evolutio, Suse, Amazon, eBay, Alibaba, Shopify, BigCommerce, Prestashop, Publicis Media, Correos, o DHL, entre otras.

Por su parte, las novedades de este año han venido de la mano de la instalación de un nuevo espacio, Connectivity World, dedicado a las telecomunicaciones, la fibra óptica y el 5G. Asimismo, se ha incorporado la recreación de un centro de datos a escala real, en un espacio que se ha denominado "Data Center del Futuro" y que, según ha indicado la organización, ha sido una de las principales atracciones de la feria. Un sinfín de novedades a la altura de un sector que no deja de evolucionar, y en el que es imprescindible conocer las últimas tendencias.

Hideo Shima, el ingeniero mecánico impulsor del “tren bala”

Ingeniero mecánico nacido a comienzos del siglo XX, conocido por participar en el diseño y desarrollo de las locomotoras de vapor para trenes expresos de pasajeros y trenes de carga de servicio pesado. Así fue Hideo Shima, un avanzado de su época, que llegó a ser el primer oficial de la agencia espacial japonesa NASDA, la cual fue creada en 1969 para desarrollar satélites de aplicación y lanzadores de alta potencia.

Laura Álvaro

La alta velocidad supuso un gran adelanto y descubrimiento para la sociedad del momento y para la actual, al revolucionar el turismo cultural y de los negocios. Asimismo, el tren de alta velocidad está considerado como uno de los medios de transporte más seguros del mundo, a la par que lo puede ser el avión. Ha transformado las infraestructuras de las estaciones ferroviarias y, por supuesto, el trazado urbano de las ciudades. Todo ello, a pesar de que en España no se comenzó a hablar de ello hasta 1960, y no se concretó hasta la década de los años 80.

En todo este invento y posterior desarrollo, mucho tienen que ver los japoneses, en general, e Hideo Shima, en particular, ya que fueron los pioneros de la alta velocidad ferroviaria en el mundo con sus “trenes bala”, que recorrían la línea troncal en la década de 1960.

Infancia y primer contacto con la ingeniería

Nacido en la ciudad japonesa de Osaka, el 20 de mayo en el año 1901, Hideo Shima fue un ingeniero japonés considerado como la fuerza impulsora detrás de la construcción del primer “tren bala” de la historia, el llamado Shinkansen. Shima estudió Ingeniería Mecánica en la Universidad Imperial de Tokio, denominada así entre 1886 y 1947, y considerada como la universidad más célebre de Japón y una de las más prestigiosas del mundo.

Desde muy pequeño tuvo una estrecha relación con el mundo ferroviario, dado que su padre, según diversas fuentes consultadas, era un destacado ingeniero ferroviario que, además, formaba parte de un grupo de funcionarios que habían desarrollado la emergente y pionera industria ferroviaria de Japón. En el año 1925, Shima se incorporó al



Tren bala Shinkansen Serie 500, en una estación de Japón, en enero de 2009.

Ministerio de Ferrocarriles (Ferrocarriles del Gobierno Japonés), donde ya como ingeniero de material rodante diseñó locomotoras de vapor.

Gracias a la utilización de nuevas técnicas para equilibrar las ruedas motrices y los nuevos diseños de engranajes de válvula, ayudó a diseñar la primera locomotora de tres cilindros de Japón, la clase C53, la cual estaba basada en la clase C52 importada de Estados Unidos. Asimismo, y según fue ganando destreza, participó en el diseño y desarrollo de las locomotoras de vapor de clase C62 y clase D62 para trenes expresos de pasajeros y trenes de carga de servicio pesado, respectivamente.

Inicios en el mundo ferroviario

De igual forma, estuvo involucrado en el diseño y la fabricación de un automóvil estándar producido ampliamente cuando se produjo el estallido de la Segunda Guerra Mundial. Se puede decir que

esta experiencia ayudó y benefició el desarrollo de la industria automotriz, aquella que está relacionada con las áreas de diseño, desarrollo, manufactura, marketing y ventas de automóviles, considerado uno de los sectores económicos más importantes en el mundo por ingresos. También, trabajó durante un breve tiempo para Sumitomo Metal Industries, junto a Shinji Sog, el presidente de JNR, con el que más adelante volvería a cruzar su camino, en la que se considera la hazaña más importante de Shima.

Pero sin duda, si por algo ha pasado a la historia este ingeniero mecánico ha sido por su gran contribución a la alta velocidad. Importante y necesario es diferenciar, y contextualizar la esfera del ferrocarril en el país nipón. En cuanto a este ámbito se refiere, en Japón hasta 1949 existió la JGR, Japanese Government Railway, el sistema de ferrocarriles que fue operado por el Gobierno del país, traducéndolo al español como



Tren original Shinkansen Serie 0 (Fuente: Wikimedia Commons).

“Ferrocarriles del Gobierno japonés”. A partir de este año 1949 y hasta 1987, el órgano que operó la red nacional ferroviaria de Japón fue la conocida como JNR, Japanese National Railways, cuya traducción hace referencia a los Ferrocarriles Nacionales Japoneses. En 1987 se privatizó y se sustituyó por el grupo Japan Railway, que continúa operando en la actualidad.

Conforme iba adquiriendo experiencia y nuevos conocimientos del ámbito ferroviario, fue tomando más responsabilidades, y a medida que avanzaba su carrera, Shima llegó a convertirse en el jefe del departamento de material rodante del ferrocarril nacional en el año 1948. Poco después de que llegara la JNR en 1949, se produjo un incendio en un tren en una estación de Yokohama, que acabó con la vida de 106 personas e hirió a otras 92.

Shima también trabajó, aunque de forma breve, para Sumitomo Metal Industries, el fabricante de acero con sede en Osaka, pero el ya mencionado presidente de Japanese National Railways de esa época, Shinji Sog, el cuarto que tuvo la JNR, le solicitó que regresara para poder supervisar la construcción de la primera línea de Shinkansen, en el año 1955, la primera línea del tren bala o de alta velocidad.

Definición del tren bala

El llamado tren bala, en algunos países, y tren de alta velocidad en muchos otros, es utilizado para referirse a aque-

llos convoyes que alcanzan grandes velocidades, iguales o superiores a los 200 km/h sobre líneas existentes actualizadas, y 250 km/h sobre líneas específicamente diseñadas para esto, según indica la Unión Internacional de Ferrocarril (UIC).

En lo que concierne al protagonista de nuestro reportaje, Shima, empleó para los trenes bala una innovación que ya se le había ocurrido cuando participó en el diseño y desarrollo de las locomotoras de vapor de clase C62 y clase D62, ya explicado en los párrafos anteriores. Se trataba del uso de trenes impulsados por motores eléctricos en los vagones individuales, en lugar de utilizar un motor en la parte delantera, “potencia distribuida múltiple - sistemas de control de unidades”, según datos consultados.

El desarrollo de Shinkansen

La idea de un tren de alta velocidad surgió en la década de 1950, cuando se dieron cuenta de la necesidad de construir una nueva línea ferroviaria entre las ciudades de Tokio y Osaka, las dos poblaciones más importantes del país japonés, para resolver así la saturación de la línea existente y al mismo tiempo realizar una mejora sustancial de los tiempos empleados en el recorrido.

Este gran trabajo no fue, ni mucho menos, un camino fácil, y a Shima le supuso un gran esfuerzo y dedicación. La primera línea necesitaba de 3.000 puentes y 67 túneles que pudieran permitir un camino despejado, y que fuera

en mayor medida recto, lo que llevó a un elevado coste. Para que los trenes de alta velocidad japoneses pudieran unir las principales ciudades del país, en 1964 se unieron empresas de renombre como Mitsubishi, Kawasaki, Hitachi y Sumitomo para hacerlo posible, y con convoyes que llegaban a velocidades de hasta 300 km/h para que, finalmente, y según las fuentes consultadas, en ese mismo año, 1964, el emperador Hirohito inaugurara el tren bala.

Shima, el jefe del proyecto

Según diversas fuentes consultadas, se dice que esta construcción le costó a Shima su trabajo, ya que el coste era demasiado elevado y, en 1963, Shima renunció a su puesto, junto con Shinji Sog, dado que este último había respaldado las ideas de Hideo, a pesar de que dicha línea obtuvo una gran popularidad. Era Shima el ingeniero jefe del proyecto del Shinkansen, designado por el propio Sog. Precisamente fueron ambos, Shima y Sog, los que estuvieron detrás de la decisión de construir un tren bala de calibre estándar a finales de los años 1950, por lo que eran sus máximos responsables.

No obstante, el Shinkansen o tren bala japonés introdujo un innovador sistema de propulsión, así como una serie de características tan importantes y fundamentales como la suspensión neumática y el aire acondicionado. Shima y su equipo diseñaron el elegante tren en forma de cono, por el que el tren bala recibió su denominación.

Después de Ferrocarriles Nacionales Japoneses, JNR

Tras su renuncia, Shima continuó vinculado al mundo ferroviario, asesorando a los funcionarios de este ámbito, sobre todo, en lo concerniente a la seguridad.

De igual forma, a partir del año 1969, comenzó una nueva aventura en el puesto de jefe de la Agencia Nacional de Desarrollo Espacial (NASDA), cargo máximo que ostentó hasta el año 1977, en que decidió retirarse de su vida más profesional. En la Agencia Nacional de Desarrollo Espacial impulsó el desarrollo de motores de hidrógeno para propulsar cohetes.

Reconocimientos

A lo largo de su longeva vida, murió a los 96 años de edad, Shima ha sido considerado como uno de los ingenieros más

destacados de la época de la posguerra de su país de origen. Es por ello que numerosos han sido los premios y reconocimientos que ha recibido incluso en el ámbito internacional.

En el año 1969, a los 68 años de edad, a la vez que iniciaba una nueva carrera en la Agencia Nacional de Desarrollo Espacial, se convirtió en la primera persona no occidental en recibir la Medalla Internacional "James Watt", por parte de la Institución de Ingenieros Mecánicos del Reino Unido. Se trata de una medalla de oro que se otorga con carácter bianual. También recibió el Premio Elmer A. Sperry de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.

En su país de nacimiento recibió numerosos reconocimientos a toda una vida dedicada al ferrocarril. En 1994, cuatro años antes de morir, recibió la Orden del Mérito Cultural, reconocimiento por parte del Gobierno del país nipón y presentado por el Emperador Hirohito.

Actualidad de la alta velocidad y nuevos avances

Sin duda, para Japón, el tren bala es uno de sus mayores iconos. Tanto es así que

la imagen de un Shinkansen circulando a elevada velocidad por delante del monte Fuji es conocida como una de las imágenes más turísticas del país.

En la actualidad, los principales núcleos de población de Japón están conectados mediante la red de alta velocidad, que llega a ser de más de 2.700 kilómetros. Del mismo modo sucede en infinidad de países, donde la alta velocidad es la reina indiscutible en los grandes desplazamientos.

Aun así, se prevé que, en el futuro, se puedan alcanzar velocidades mucho más elevadas que la que utiliza Japón actualmente, con una velocidad operativa de 320 km/h y un pico de velocidad máxima de 400 km/h. De igual forma se están construyendo extensiones de la red que permitirán llegar a cada vez más ciudades en los próximos años. En el país nipón, para ser más exactos, y según las fuentes consultadas, se espera que exista el llamado tren maglev de levitación magnética, que unirá Tokio con Nagoya y más tarde con Osaka. Este tren incluye la suspensión, guía y propulsión, utilizando un gran número de imanes para la sustentación y la propulsión a base de la

levitación magnética. Ya en su desarrollo estuvo implicado el también ingeniero británico, en este caso eléctrico, Eric Laithwaite, que era también profesor del Imperial College de Londres, y que desarrolló el primer modelo funcional a tamaño real de un motor de inducción lineal.

Más conocido y más reciente es el Hyperloop One XP-1, el segundo ensayo de la levitación magnética en el tren de alta velocidad a manos de la empresa estadounidense Hyperloop One. En los últimos años se han realizado numerosos ensayos, en los que los ingenieros han ido probando y vaticinando las velocidades que podrán alcanzar. Más concretamente y según las diversas fuentes consultadas, en estas pruebas se alcanzaron velocidades de más de 300km/h, aunque los ingenieros a cargo del proyecto estimaron que podría llegar en poco tiempo a 1.000 km/h e incluso superarla.

Lo que no cabe duda es que el tren bala sigue mejorando e innovando como lo hizo para su invención y desarrollo. Es por ello que el futuro de la alta velocidad es ya un hecho e Hideo Shima tuvo mucho protagonismo en ella, gracias a sus innovaciones y descubrimientos.

EL INGENIOSO INGENIERO/Pablo Saorín



Premio Nacional de Iniciación a la Investigación Tecnológica 2024

La Unión de Asociaciones de Ingenieros Técnicos Industriales y Graduados en Ingeniería de la rama industrial de España (UAIITIE) lanza la convocatoria 2024 (novena edición) del concurso juvenil de ciencia y tecnología más prestigioso de todo el país. Reúne a estudiantes preuniversitarios con el propósito de fomentar la cultura tecnológica, de la innovación y las vocaciones ingenieriles y científicas desde edades tempranas. Está dirigido a estudiantes de 3º y 4º de ESO; 1º y 2º de Bachillerato; y 1º y 2º cursos de Ciclos Formativos de Grado Superior de todo el territorio nacional.

Exposición “Mujeres Ingenieras de éxito”

La Exposición “Mujeres Ingenieras de éxito y su impacto en el desarrollo industrial”, de la UAIITIE, es una iniciativa para poner en valor el impulso del desarrollo profesional de las mujeres, fomentando el interés de los más jóvenes por las disciplinas STEM. Su objetivo es inspirar a las nuevas generaciones a elegir carreras profesionales basadas en su pasión y talento, sin limitaciones ni estereotipos, y fomentando una mayor inclusión e igualdad de género en la ingeniería motivada ante la inquietud por la escasez de mujeres dentro de las disciplinas STEM.

Su patrimonio atesora cerca de 30 referentes femeninos, que nos muestran el camino de ingenieras desde el siglo XIX hasta nuestros tiempos, las denominadas “pioneras”. Mujeres increíbles que marcaron tendencia y consiguieron grandes logros en el mundo de la ingeniería en el ámbito espacial, en el mundo de la imprenta, optimizando procesos o inventoras con más de 20 patentes y 90 inventos. A continuación, también muestra los paneles de las mujeres ingenieras de éxito denominadas “contemporáneas”, mujeres de la actualidad que, a base de trabajo, esfuerzo y vocación, han conseguido el éxito en el mundo y en distintos campos de la ingeniería.

La exposición ha continuado su andadura y ha agrandado los lugares donde ha estado visible. En su recorrido en Huesca, ha estado alojada, durante el pasado mes de octubre, en el Instituto de Enseñanza Secundaria IES Pirámide, siendo visitada por alumnos de enseñanzas medias (ESO y Bachillerato), creando modelos y cumpliendo los objetivos marcados. Contextualizando este recorrido, señalamos que se trata de una de las acciones que se dinamizan por el Ayuntamiento local, dentro del programa “Científicas para la ciudad”, y que cumple ya 7 ediciones. En este sistema, implican a distintos centros educativos en cada curso escolar,



Imagen del cartel publicitario de los Premios.



La Puerta del Ingenio

Proyecto de “La Puerta del Ingenio”.

siendo el motivo del presente curso “MUJERES INGENIERAS”, y eligiendo nuestra exposición como un detonante para principio de este año académico.

Seguidamente, la exposición ha viajado a Santander, donde permanecerá durante todo el mes de noviembre. La Escuela Superior de Ingeniería Industrial y de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria (ETSIIT) y el Centro Cívico Tabacalera han sido los escenarios elegidos por el colectivo cántabro para el recorrido. Esta réplica alberga en su galería una nueva panelista contemporánea, Elena García Armada, Doctora Ingeniera Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid, CEO de Marsi Bionics. Entre sus galardones internacionales están el “Premio Inventora Europea del Año de la Oficina de Patentes, Europea Patentes (2022)”; “Premio Nacional de Discapacidad Reina Letizia”; “Medalla de Oro de Cruz Roja”; e investida “Doctora Honoris Causa por la Universidad Europea Miguel de Cervantes”.



La exposición se exhibe en el IES Pirámide de Huesca.



Mesa redonda organizada en la ETSIIT, Universidad de Cantabria.

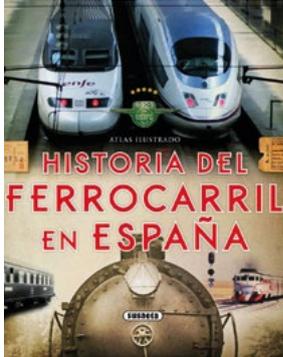
“Madrid mirando a la ciencia; del juego al ingenio en la Escuela”

Se trata de un nuevo campo en los que la Institución trabaja para seguir impulsando las vocaciones STEM en el ámbito de la educación primaria, fomentando la cultura científica, las vocaciones ingenieriles y científicas, trabajando la educación para el consumo responsable y el desarrollo sostenible, el fomento de la creatividad, del espíritu científico y la igualdad de género. El proyecto cuenta con el respaldo del Ayuntamiento de Madrid, dando continuidad a “La Puerta del ingenio”, para conferir de nuevos contenidos a los dotados en 2022. A través de una tecnología de Realidad Aumentada en distintas temáticas, los niños y niñas más pequeños pueden descubrir que en todo lo que nos rodea hay Ingeniería. Desde un aprendizaje adaptado concebido de forma digital, se pretende hacer cantera de futuras generaciones de ingenieros/as, a través de estas técnicas virtuales y medios de digitalización. La propuesta será ampliable también a otras administraciones y comunidades de la geografía española.

Historia del ferrocarril en España

Mar Piquer.

Editorial Susaeta Ediciones S.A. 256 pág.
ISBN 978-8467737653

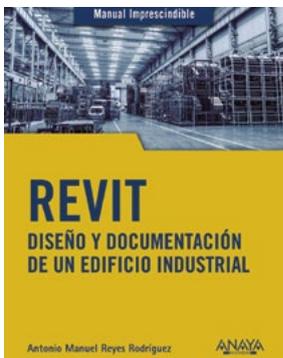


Si tiene los conocimientos básicos sobre el cálculo matemático, incluyendo las ecuaciones diferenciales elementales y derivadas, y quiere saber más acerca de la electrotecnia y conocer el origen del comportamiento de la electricidad en los circuitos eléctricos, ha dado con el libro indicado.

En este atlas ilustrado se detalla la implantación del ferrocarril en nuestro país y su desarrollo, recorriendo su historia, desde el primer camino de hierro en la Cuba colonial hasta las grandes estaciones de alta velocidad. Se complementa con paradas documentales que incluyen anécdotas y curiosidades, semblanzas de los protagonistas de esta aventura o textos literarios de grandes autores de nuestra lengua que homenajearon al ferrocarril.

REVIT. Diseño y documentación de un edificio industrial

Antonio Manuel Reyes Rodríguez
Editorial Anaya. 432 págs.
ISBN 978-8441542990



Antonio Manuel Reyes Rodríguez es profesor titular en el Departamento de Expresión Gráfica en la Universidad de Extremadura. Autor de más de trescientos proyectos y direcciones de obra de ingeniería, ha colaborado con

multitud de empresas y organismos oficiales. Este libro se propone cohesionar los conocimientos de BIM y de Revit con el objeto de dar el salto definitivo a proyectar una obra en BIM. Sin necesidad de conocimientos previos aprenderá, paso a paso, cómo modelar la estructura, la arquitectura y las instalaciones de un edificio industrial compuesto por cuatro módulos de naves y uno de oficina con vestuarios incluidos. Un volumen útil tanto para ingenieros de cualquier especialidad y nivel, como para arquitectos y aparejadores, pues el modelado de las oficinas resulta muy similar al de edificios residenciales. A lo largo de este manual se simula un proceso colaborativo propio de un proyecto BIM. Es decir, no se limita a enseñar las técnicas del modelado con Revit, sino que aborda la metodología BIM, donde Revit es la tecnología principal. Aprenda mediante la realización detallada de un caso concreto, un proyecto real de una empresa de transformados metálicos aplicando conocimientos ordenados de BIM y de Revit.

El futuro de las profesiones: Cómo la tecnología transformará el trabajo de los expertos humanos

Richard Susskind y Daniel Susskind
Editorial Teell Editorial, S.L. 352 págs.
ISBN 978-8416511112

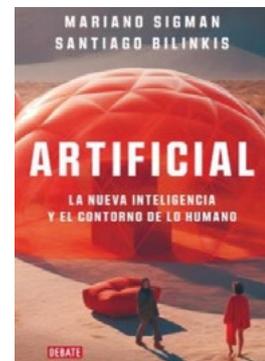


Este libro predice el declive de las profesiones actuales, y explica las personas y los sistemas que las sustituirán. En una sociedad caracterizada por la presencia de Internet, según Richard Susskind y Daniel Susskind, no necesitaremos que los médicos, profesores, contables, arquitectos, sacerdotes, consultores, abogados y muchos otros, trabajen como lo hacían en el siglo XX. El futuro de las profesiones explica cómo sistemas cada vez más capaces, desde la telepresencia hasta la inteligencia artificial, conllevarán cambios fundamentales en la forma en que el conocimiento práctico de los especialistas se pone a disposición de la sociedad. Los autores ponen

en cuestión el gran trato, el acuerdo que garantiza diversos monopolios a los profesionales actuales. Defienden que nuestras profesiones actuales están anticuadas, son opacas y difícilmente asequibles, y que el conocimiento de los mejores pueden disfrutarlo sólo unos pocos. En su lugar, proponen seis nuevos modelos de producción y distribución del conocimiento. El libro plantea importantes cuestiones morales y prácticas. En una era en que las máquinas pueden superar a los seres humanos en la mayoría de tareas, ¿cuáles son las perspectivas para el empleo?, ¿quién debe poseer y controlar el conocimiento por Internet?, ¿y qué tareas deben reservarse únicamente a las personas? Basada en la profunda investigación de más de diez profesiones, e ilustrado por numerosos ejemplos de cada una, éste es el primer libro que evalúa y se pregunta por la relevancia de las profesiones en el siglo XXI.

Artificial "La nueva inteligencia y el contorno de lo humano"

Santiago Bilinkis y Mariano Sigman
Debate Editorial. 230 págs.
ISBN 978-8419642677



Este no es un libro de oráculos o vaticinios, sino las reflexiones de dos autores que consideran que estar informados es la mejor forma de navegar la indefectible ola de la inteligencia artificial. En una conversación tan lúcida como estimulante, el neurocientífico superaventuras Mariano Sigman y el emprendedor Santiago Bilinkis repasan el origen, las utilidades y los riesgos de esta tecnología. ¿Será una lámpara de Aladino o una caja de Pandora? ¿Cómo acercarnos al mejor escenario? ¿Estamos caminando al borde del precipicio? ¿Qué ocurrirá si la inteligencia artificial encuentra aquello en lo que somos más débiles? Si bien exponen las razones por las que debemos ser cautos y responsables, huyen del pesimismo y nos invitan a pensar que de este desafío podemos sacar nuestra mejor versión.

Exclusivo para autónomos en el RETA o en MUPITI

Incrementa tus aportaciones y
aumenta la desgravación fiscal con el
Plan de Ahorro para Autónomos de Mupiti



Mejora ya tu
futura jubilación

Atractivo fiscal:

Puedes aportar y desgravar hasta 4.250 €*

*Adicionales a los 1.500 €/anuales establecidos en los sistemas de previsión social complementarios individuales.

Flexibilidad:

Haz aportaciones mensuales o en el momento que quieras.

Rentabilidad:

Tendrás garantizado el tipo de interés y participación en los beneficios.

INDICADOR DE RIESGO Y ALERTAS DE LIQUIDEZ	
Indicador de Riesgo	Alertas de Liquidez
1 / 6	 El reembolso, rescate o la devolución anticipada de una parte o de todo el principal invertido está sujetos a comisiones o penalizaciones.
<small>Este número es indicativo del riesgo del producto, siendo 1/6 indicativo de menor riesgo y 6/6 de mayor riesgo.</small>	

Más Info:
Virginia Postiguillo
virginia@mupiti.com
📞 900 820 720



¿Cómo tener un **ERP fuerte** especializado en industrias de proyectos?

Estructuras metálicas

Calderería

Maquinaria

Mecanizado y Transformación metálica



SIDDEX ERP Industrial

Juan Mambrilla, 12 - 47003 Valladolid

983 218 360 - info@siddex.com

www.siddex.com