

# Técnica Industrial 342

## Retos de la Inteligencia Artificial

# Ai

### DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO NO LINEAL

Basado en un modelo aplicado al seguimiento de trayectorias de vehículos autónomos

### VARIABILIDAD DE LA DECELERACIÓN DE UN PARACAÍDAS DE ACCIÓN PROGRESIVA

En un ascensor inclinado

### VALIDACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYO

con dispositivo de caracterización de superficie

### EFFECTO DEL REDONDEO DE LA ARISTA DE CORTE

en procesos de mecanizado de la aleación Ti6Al4V

### ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO VIBRATORIO DE VIGAS DAÑADAS

De material compuesto mediante redes neuronales artificiales

#### ARTÍCULO

La inteligencia artificial generativa en la Ingeniería Técnica Industrial: innovación, tendencias y el nuevo paradigma tecnológico

#### INNOVACIÓN

Deepfakes, ataques cuánticos y malware autónomo: el nuevo rostro de la ciberamenaza

#### ENTREVISTA

Carlos Torres, director de Industria y Consumo en Minsait (Indra Group)

Upro

Transforma tu desarrollo profesional

Te presentamos el primer  
**programa de formación  
digital** pensado por y  
para **Profesionales**.



La experiencia formativa que potencia tu impacto profesional

### Formación a tu ritmo

**Online+ presencial**, con  
webinars, materiales  
digitales y trabajo en grupo.

### Flexible y a tu medida





**150h** que puedes completar  
cuando quieras, a tu propio  
ritmo.

### Acompañamiento continuo





**Tutor/a siempre disponible**  
para dudas y apoyo  
personalizado.

## Impulsa tu carrera con Upro

### Eligiendo Upro obtienes:

-  Itinerario hecho por expertos
-  Plataforma flexible y adaptada a ti
-  Alineado con el Marco Europeo de Competencias
-  Digitales Sin coste para Profesionales

### Beneficios profesionales:

-  Domina herramientas digitales
-  Mejora tu empleabilidad y abre puertas
-  Mantente al día con nuevas tecnologías
-  Conecta con comunidades que lideran el cambio

Aprende lo  
esencial, domina  
lo específico



**EN PORTADA Retos de la Inteligencia Artificial****08 La inteligencia artificial generativa en la Ingeniería Técnica Industrial: innovación, tendencias y el nuevo paradigma tecnológico.**

La IA generativa no sustituye al ingeniero, pero amplía su capacidad cognitiva, liberándolo de tareas repetitivas y permitiéndole dedicar más tiempo al análisis, la decisión y la innovación.

**José María Felguera.**

**12 ENTREVISTA Carlos Torres Barroso.** Director de Industria y Consumo en Minsait (Indra Group): "La IA está redefiniendo el papel del ingeniero, potenciando su creatividad, su capacidad de innovación y su acceso a la información". **Mariana Morcillo.****18 Inteligencia Artificial y medicina: una alianza estratégica ante los retos del siglo XXI.**

La IA en medicina abarca una amplia gama de tecnologías, desde el machine learning (aprendizaje automático) y el procesamiento del lenguaje natural, hasta los modelos generativos, como los sistemas de diagnóstico por imagen basados en redes neuronales profundas.

**Mónica Ramírez.**

**20 Cómo la inteligencia artificial y las nuevas herramientas de automatización están transformando los procesos empresariales**

En un mercado cada vez más competitivo, la automatización de procesos mediante inteligencia artificial deja de ser una opción tecnológica para convertirse en un factor estratégico de competitividad.

**Pablo Horcajuelo.**

Foto de portada: Shutterstock

**ACTUALIDAD**

**04 Deepfakes, ataques cuánticos y malware autónomo: el nuevo rostro de la ciberamenaza.** El avance imparable de la inteligencia artificial está transformando el panorama de la ciberseguridad a una velocidad sin precedentes. Lejos de ser solo una aliada, la IA se convierte ahora en un arma de doble filo: alimenta nuevas generaciones de ataques mientras se perfila como herramienta clave para defenderse de ellos.  
**Mónica Ramírez.**

**ARTÍCULOS****22 ORIGINAL****Diseño y validación de un controlador predictivo no lineal basado en un modelo aplicado al seguimiento de trayectorias de vehículos autónomos**

Design and Validation of a Nonlinear Model-Based Predictive Controller Applied to Autonomous Vehicle Trajectory Tracking.

**Marc Sánchez-Mateu, Daniel S. Gamba, J Pérez-Fernández, JA Cabrera Carrillo, JJ Castillo-Aguilar**

**34 ORIGINAL****Validación de resultados de ensayo con dispositivo de caracterización de superficie**

Validation of test results with surface characterization device.

**I. Sánchez, J. Velasco, J. A. Cabrera, J. J. Castillo, M. Sánchez**

**44 ORIGINAL****Deceleration variability of a progressive action safety gear in an inclined elevator**

Variabilidad de la deceleración de un paracaídas de acción progresiva en un ascensor inclinado.

**Beatriz Valles Fernández, Enrique Alcalá Fazio, Ángel Martín López, David Rincón-Dávila y Joel Valenzuela Cuartero**

**52 ORIGINAL****Effect of the cutting-edge radius on machining processes of the Ti6Al4V alloy**

Efecto del redondeo de la arista de corte en procesos de mecanizado de la aleación Ti6Al4V.

**J. L. Cantero Guisández, A. Guerra Sancho, A. Sáez Álvarez y M. H. Miguélez Garrido**

**60 ORIGINAL****Estudio del comportamiento vibratorio de vigas dañadas de material compuesto mediante redes neuronales artificiales**

Study of the vibration behaviour of damaged composite beams using artificial neural networks.

**Patricia Rubio Herrero, Belén Muñoz-Abella, Inés Iváñez del Pozo, Lourdes Rubio Ruiz de Aguirre**

**INGENIERÍA Y HUMANIDADES**

**90 INGENIEROS EN LA HISTORIA Marc Isambard Brunel:** el ingeniero que venció al río Támesis y sentó las bases de la tunelación moderna.

**Mónica Ramírez**

**96 Publicaciones**



**03 Editorial** Innovar en un mundo de oportunidades es avanzar y crecer  
**Santiago Crivillé Andreu**

## PROFESIÓN

**70 El I Congreso Nacional de Ingeniería INGEFUTUR25 reafirma el papel clave de la profesión en el desarrollo industrial de España**

La ciudad de Valencia se convirtió durante los días 12 y 13 de diciembre en el epicentro de la Ingeniería española, en un encuentro histórico que ha reunido a cerca de 400 congresistas, junto a los decanos de los Colegios de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales, y representantes institucionales, empresariales y del ámbito de la ingeniería, con el objetivo de analizar los grandes desafíos estratégicos que marcarán el futuro de la profesión y de la industria de nuestro país.

**73 INGITE presenta el III Informe sobre los estudios universitarios de Ingeniería en España**

**74 El presidente de COGITI presenta el proyecto de Ley de la Ingeniería a los estudiantes de la AERRAAITI**

**75 Jornada informativa «La profesión de Ingenieros Técnicos Industriales ante la entrada en vigor del sistema VERY\*FACTU»**

**75 Participación de COGITI en el acto de presentación de la Cátedra de Competencias Digitales impulsada por la UPM**

**76 Presentación del estudio sociológico «Percepción ciudadana sobre el riesgo de incendios en las fachadas de los edificios»**

**77 Los universitarios muestran su talento en la V edición de MotorMadridStudent**

**82 ENTREVISTA Roser Roca-Toha.** Directora General y CEO de Airbus GeoTech: «Un buen liderazgo tecnológico combina visión estratégica y profundidad técnica». **Mónica Ramírez.**

**86 Ferias y Congresos**

**94 UAITIE refuerza su compromiso con la sociedad a través de la divulgación, la visibilidad de la mujer ingeniera y los reconocimientos profesionales**



**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  
**Vicepresidente** Domingo Villero Carro  
**Secretario** Jesús E. García Gutiérrez  
**Tesorero** Alejandro Sotodosos Fernández  
**Interventor** Antonio Ruiz Saiz  
**Vocales** Diego Pérez Muñoz y Mar López Almagro  
**Gerente** Miquel Darnés Cirera

### 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** Francisco Avellaneda Carpena  
**Alicante** Antonio Martínez-Canales Murcia  
**Almería** Francisco Lores Llamas  
**Aragón** Enrique Zaro Giménez  
**Ávila** Samuel Gavilán López  
**Badajoz** Vicenta Gómez Garrido  
**Illes Balears** Sebastián Frongia  
**Barcelona** Ricard Nogués i Parra  
**Bizkaia** Alberto García Lizaranzu  
**Burgos** Antonio Ruiz Saiz  
**Cáceres** Fernando Doncel Blázquez  
**Cádiz** Domingo Villero Carro  
**Cantabria** Luis Miguel Muñoz 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** Valeriano Carballo Garrido  
**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** Antonio Campo Barrabés  
**Lugo** Jorge Rivera Gómez  
**Madrid** José Antonio Galdón Ruiz  
**Málaga** José B. Zayas López  
**Manresa** Jordi Valiente Prat  
**Región de Murcia** Miguel Ángel Sola Navarro  
**Navarra** Enrique Domínguez Peralta  
**Ourense** Santiago Gómez-Randulfe Álvarez  
**Palencia** Jesús de la Fuente Valtierra  
**Principado de Asturias** Diego Pérez Muñoz  
**Salamanca** José M<sup>a</sup> Collantes Hidalgo  
**S. C. Tenerife** Antonio M. Rodríguez Hernández  
**Segovia** Gabriel Vallejo Álvarez  
**Sevilla** José Joaquín Palma Chaves  
**Soria** Levy Garijo Tarancón  
**Tarragona** Joan Gabriel Talamí Maigí  
**Toledo** Ángel Carrero Romero  
**Valencia** Tomás Játiva Collados  
**Valladolid** Rafael Álvarez Palla  
**Vigo** Jorge Cerqueiro Pequeño  
**Zamora** Jose Luis Hernández Merchán



# Innovar en un mundo de oportunidades es avanzar y crecer

Se presenta el número 342 de la Revista Técnica Industrial a las puertas de un nuevo año, dándome la oportunidad para despedirme de la gerencia, de todos los lectores y compañeros de profesión, además de los equipos que hacen posible las finalidades por las que la Fundación Técnica Industrial trabaja, siendo ésta, la promoción, el desarrollo, la protección y el fomento de la investigación científica y técnica en el campo industrial, así como de la formación científica, académica y profesional de los ingenieros.

Hace cinco años empecé esta etapa, que no ha sido fácil, los momentos difíciles del COVID con el cambio en el modo de trabajar. Parecía que la sociedad colapsaba y todo se ralentizaba o paraba. Las consecuencias se hicieron sentir luego con el cambio de hábitos, aumento de precios en los servicios y dificultades en conseguir materiales básicos. Fue un hecho paradigmático impensable.

A pesar del momento, he de agradecer a la Comisión Ejecutiva, con su Presidente Sr. José Antonio Galdón, su apoyo para una reestructuración administrativa y en la innovación de procedimientos, así como con la visión de emprender actuaciones futuras que permitan avanzar y hacer crecer con mayor efectividad la Fundación.

Esta visión no hubiese sido posible plasmarla sin los grupos de trabajo, por una parte, la propia Comisión Ejecutiva y, por otro, el propio equipo de trabajo de la Fundación, que engloba el equipo económico, el de la Revista Técnica Industrial y el administrativo y de coordinación, equipos a los que he de agradecer su trabajo, colaboración y dedicación.

En este periodo se han de reseñar algunas de las actuaciones, como son las siguientes:

La adecuación de los Estatutos a la Ley de Fundaciones (BOE 2-10-2015), aprovechando para actualizarlos a las tecnologías de la información y comunicación.

La Revista Técnica Industrial se ha transformado en un referente técnico-científico, en el que nuestra publicación está en un buen momento de desarrollo, no solo debido al prestigio ganado, sino, además, porque concita interés y atención tanto en nuestro país como en el ámbito internacional de las revistas técnicas. Hay que agradecer este logro a su Directora la Sra. Mónica Ramírez y su equipo. A ello se une la celebración del 70 Aniversario de la Revista Técnica Industrial.

La creación del Premio Fundación Técnica Industrial a la "Innovación Tecnológica Empresarial y Sostenibilidad" eleva el prestigio de la Fundación, potenciando el trabajo empresarial y su difusión.

Por primera vez se ha contratado personal fijo para la Fundación, hecho fundamental que repercute en la eficacia y logros de los objetivos de la Institución.



La celebración del 25 Aniversario de la Fundación Técnica Industrial, y la realización y edición del libro de "La historia de la Ingeniería", incluyendo la de todos los colegios.

Los cambios en las instituciones son necesarios, y los procesos de transición son fundamentales; por ello, al dejar el cargo en la Fundación Técnica Industrial he transmitido todo mi conocimiento adquirido estos años a mi sucesor, al que deseo muchos éxitos en este mundo de oportunidades.

Termino una etapa enriquecedora profesionalmente, además de ilusionada a nivel personal, reiterando mi agradecimiento por el apoyo recibido durante estos años, comprensión y amistad de todo el Patronato.

Gracias por haberme dado esta oportunidad.

Un deseo de paz y amor para esta próxima Navidad con la esperanza que en el 2026 consigamos un mundo mejor.

**Santiago Crivillé Andreu**

**"Los cambios en las instituciones son necesarios, y los procesos de transición son fundamentales; por ello, al dejar el cargo en la Fundación Técnica Industrial he transmitido todo mi conocimiento adquirido estos años a mi sucesor, al que deseo muchos éxitos en este mundo de oportunidades"**

# Deepfakes, ataques cuánticos y malware autónomo: el nuevo rostro de la ciberamenaza

**El avance imparable de la inteligencia artificial está transformando el panorama de la ciberseguridad a una velocidad sin precedentes. Lejos de ser solo una aliada, la IA se convierte ahora en un arma de doble filo: alimenta nuevas generaciones de ataques mientras se perfila como herramienta clave para defenderse de ellos. Empresas, expertos y gobiernos enfrentan los retos de una era en la que la inteligencia artificial no solo predice el futuro de la ciberseguridad, sino que lo ejecuta**

**Mónica Ramírez**

En un mundo cada vez más digitalizado, donde los datos fluyen sin fronteras y la infraestructura crítica depende de sistemas interconectados, la ciberseguridad ha dejado de ser un ámbito exclusivamente técnico para convertirse en una prioridad estratégica. Y en el epicentro de esta transformación se encuentra la inteligencia artificial (IA), protagonista indiscutible de un cambio de paradigma que afectará a gobiernos, empresas y ciudadanos por igual.

La firma Check Point Software ha sido clara en su diagnóstico: la convergencia entre IA autónoma, arquitecturas web avanzadas, amenazas cuánticas y entornos hiperconectados redefinirá la resiliencia de las organizaciones en 2026.

## **IA: aliada y amenaza al mismo tiempo**

“La prioridad hoy para las empresas no es solo usar la inteligencia artificial, sino también defenderse de ella”, sentenció Mario García, director general de Check Point para España y Portugal, durante un reciente encuentro con medios especializados. Según explicó, los atacantes ya se están aprovechando de modelos generativos para lanzar ofensivas más rápidas, más creativas y difíciles de rastrear. Sin embargo, recordó que los defensores también llevan años aplicando IA para anticiparse a los riesgos.

Uno de los casos que ilustra esta nueva era es el considerado “ataque del año”, documentado por Anthropic (empresa líder en IA): un ciberataque totalmente automatizado por inteli-

gencia artificial, capaz de ejecutar tareas de reconocimiento, explotación y movimientos laterales con autonomía completa. Este tipo de agresiones marcan un antes y un después en la forma en que entendemos la defensa digital.

## **El auge de los agentes autónomos**

Una de las predicciones más disruptivas del informe de Check Point es la llegada de la “IA agentiva”: sistemas autónomos que no solo asisten, sino que toman decisiones por sí mismos. En este nuevo entorno, agentes de IA podrán gestionar presupuestos, optimizar cadenas logísticas y tomar decisiones operativas sin intervención humana directa.

El principal riesgo en este supuesto es que se produzca una autonomía descontrolada que exija auditorías continuas y mecanismos de trazabilidad completos.

## **Web 4.0: nueva frontera de seguridad**

A esto se suma la irrupción de la llamada Web 4.0, un ecosistema digital basado en computación espacial, realidad extendida y gemelos digitales. Las organizaciones podrán simular plantas industriales, ciudades o campus en tiempo real, pero también deberán afrontar nuevos desafíos de interoperabilidad y seguridad entre los mundos físico y virtual.

## **Identidad en crisis: deepfakes y fraude conversacional**

Otro de los puntos críticos será la suplantación de identidad median-

te voz, vídeo o texto generados por IA. Según Check Point, en 2026 será técnicamente posible falsificar una videollamada o una orden por voz con tal realismo que podría engañar incluso a expertos en seguridad. Los casos no son hipotéticos: una empresa multinacional ya sufrió un fraude por 25 millones de dólares debido a una videollamada “deepfake” que suplantó a su CFO (director financiero).

Las empresas deberán incorporar autenticación conductual, validación de contexto y análisis de patrones para verificar interacciones que, a simple vista, parecen auténticas.

## **Nuevos vectores de ataque: modelos como objetivo**

El crecimiento de los grandes modelos de lenguaje (LLM) ha abierto un nuevo flanco: los propios modelos pueden ser atacados. A través de la inyección de “prompts” maliciosos o el envenenamiento de datos de entrenamiento, los ciberdelincuentes pueden modificar el comportamiento de una IA para obtener acceso privilegiado o sabotear decisiones críticas. En este escenario, el ciclo de vida del modelo (datos, entrenamiento, validación y despliegue) deberá estar gobernado con el mismo rigor que cualquier activo de misión crítica.

## **La carrera cuántica y el riesgo latente**

Aunque los ordenadores cuánticos aún no han alcanzado su pleno potencial, los atacantes ya operan bajo la estrategia “harvest now, decrypt later”: capturan datos cifrados hoy para descifrarlos mañana. Este ries-



Foto: Shutterstock.

go ha impulsado a organismos como el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE. UU (National Institute of Standards and Technology – NIST) a promover estándares de criptografía poscuántica, que ya comienzan a ser adoptados en organizaciones estratégicas de Europa y América.

España, por su parte, ha creado el Centro Nacional de Supercomputación Cuántica en Barcelona, reforzando su apuesta por estar en la primera línea de esta revolución tecnológica.

### ¿Están las empresas preparadas?

No del todo. Así lo revela un informe de Boston Consulting Group (BCG), según el cual solo el 7% de las empresas ha implementado herramientas de defensa impulsadas por IA, pese a que el 60% reconoce haber sufrido ataques con componentes de IA en el último año. El 88% planea adoptarlas próximamente, pero la brecha entre amenaza y reacción sigue siendo preocupante.

Entre los obstáculos figuran la falta de talento especializado, presupuestos limitados y marcos regulatorios aún inmaduros. En América Latina, por ejemplo, el desfase entre velocidad de

ataque y capacidad de respuesta es especialmente crítico.

En el ámbito de las empresas del sector industrial, según publicaba el Barómetro Industrial del Consejo General de la Ingeniería Técnica Industrial de España (COGITI), el 75% de los ingenieros que trabajan en ellas considera que es un tema importante a la hora de hacer frente a las amenazas de los avances tecnológicos, y casi la mitad de los encuestados (46,35%) sitúa el nivel de integración actual de la misma en este sector en una opción intermedia.

En cuanto a la inteligencia artificial, se percibe un interés creciente, aunque todavía muchas empresas no han iniciado su preparación para integrarla. El 46% afirma no haber dado pasos concretos en este sentido, si bien se reconoce de forma mayoritaria su potencial para transformar el modelo industrial, mejorar la eficiencia operativa y abrir nuevas oportunidades de negocio; frente al 24% de las empresas que aseguran estar preparadas en gran medida, según el citado Barómetro Industrial.

### Las amenazas que dominarán 2026

La encuesta global de BCG, por su

parte, indica que los riesgos que más inquietan a los ejecutivos son el fraude financiero potenciado por IA (43%), la Ingeniería social adaptativa (39%), el Malware que aprende y evade defensas (26%) y el “Prompt injection” y manipulación de modelos (22%).

La lista deja claro que la ciberseguridad ya no se limita a firewalls o antivirus: ahora exige inteligencia adaptativa, monitorización continua y marcos de gobernanza más estrictos.

### Sectores más afectados y ataques en evolución

Entre los sectores más golpeados por ciberataques con IA se encuentran la salud, con ataques que han paralizado sistemas hospitalarios y retrasado cirugías; los servicios financieros, blanco preferido del fraude conversacional y videollamadas deepfake; los gobiernos de los países, donde la ingeniería social con IA busca comprometer cuentas privilegiadas, y al ámbito de la manufactura, donde los agentes maliciosos interrumpen líneas de producción con malware adaptativo.

Por ubicación, los países más atacados han sido Estados Unidos y Corea del Sur, seguidos por economías europeas y mercados emergentes latinoamericanos.



### Cuantificación del impacto económico

Con relación al impacto económico de los ciberataques con IA, se estima que el coste global de los ciberataques alcanzó los 10,5 billones de dólares en 2025, con un crecimiento anual del 15%. Por su parte, los ataques de ransomware sin cifrado (solo extorsión por filtración) aumentaron un 32% en 2023, tendencia que seguirá en 2026, y el uso de IA en ataques acelera la velocidad de penetración en redes un 300%, según datos de Veeam.

### IA también para defender

Aunque los atacantes han abrazado la IA con rapidez, los defensores también cuentan con las siguientes herramientas:

- Motores de “machine learning” capaces de detectar zero-days con precisión superior al 90%. Zero-days o día cero se refiere a una vulnerabilidad de seguridad en software o hardware que es desconocida para el fabricante y los usuarios, lo que significa que no existe una solución o parche.
- Plataformas SOAR que automatizan la respuesta a incidentes y reducen el tiempo medio de contención.
- Algoritmos predictivos, como los usados por bancos españoles, que detectan movimientos sospechosos en milisegundos.
- Sistemas de análisis conductual

que monitorean patrones para detectar accesos anómalos, incluso si las credenciales son válidas.

### Gobernanza y responsabilidad

Sin embargo, el futuro de la ciberseguridad no puede apoyarse solo en la tecnología. Los expertos proponen la creación de Consejos de Gobernanza de IA, capaces de supervisar la adopción ética, segura y controlada de sistemas autónomos. También sugieren fortalecer la coordinación entre CEO y CISO (Chief Information Security Officer) para garantizar que la ciberseguridad se eleve al máximo nivel de decisión empresarial.

Además, un 72% de las organizaciones apoya ya la prohibición de pagos por “ransomware” (secuestro de archivos), conscientes de que perpetúan un ciclo de impunidad y financiación criminal.

### El nuevo estándar: resiliencia, cumplimiento y visibilidad

Los entornos multicloud, las plataformas SaaS y la proliferación de dispositivos IoT han reducido la visibilidad sobre la ubicación de los datos. Según Veeam, solo el 29% de los responsables de TI se sienten muy seguros de poder recuperar información crítica tras un ciberataque. Esta falta de confianza evidencia que la resiliencia debe ir más allá del plano técnico: debe abarcar cumplimiento normativo, gobernanza y control de terceros.

Los estándares emergentes incluyen

políticas legibles por máquina, análisis automatizados de riesgo y monitoreo continuo de la cadena de suministro.

### Hacia una defensa automatizada e inteligente

Las soluciones SOAR (Security Orchestration, Automation and Response) se perfilan como aliados estratégicos para la próxima generación de defensa digital. Estas plataformas integran herramientas diversas, automatizan respuestas y reducen tiempos críticos en plena crisis.

Paralelamente, los enfoques Zero Trust y la seguridad desde la fase de diseño están ganando tracción en sectores clave como finanzas, salud y administración pública. Incluir la seguridad desde el diseño del software no solo evita vulnerabilidades, sino que reduce costes y mejora tiempos de respuesta.

La inteligencia artificial ya no es una promesa lejana. Está aquí, modelando amenazas y oportunidades en tiempo real. Las organizaciones que no adapten sus estrategias, talentos y herramientas a esta nueva realidad quedarán expuestas a un entorno más rápido, más complejo y menos predecible.

El año 2026 marcará un punto de inflexión: no solo se trata de resistir ataques, sino de construir resiliencia inteligente, basada en IA gobernada, transparencia, agilidad y responsabilidad compartida.



La IA puede proteger los sistemas de las amenazas cibernéticas a través del monitoreo automatizado, cortafuegos inteligentes y estrategias de defensa de asistentes virtuales. Foto: Shutterstock.

# ¡Infórmate!

➔ En tu Colegio  
Profesional

➔ [https://cogiti.es/  
colegiación](https://cogiti.es/colegiación)

# ¡COLÉGIATE!

Numerosas Ventajas,  
¡Conócelas!

## Ventajas de la Colegiación



1. Acceso a la **Bolsa de Empleo de Proempleo Ingenieros**.
2. **Plataforma de Formación del COGITI**.
3. **Acreditación Desarrollo profesional Continuo**.
4. **COGITI ToolBox**: Portal de gestión de licencias software.
5. **Portal de Licitaciones Europeas del COGITI** (<https://cogiti.es/licitaciones>).
6. **Portal La Ley Digital** (Contenidos de interés para la profesión y su ejercicio).
7. **Normativa técnica de UNE**.
8. **Visado de Proyectos, Visado electrónico, Libro de Incidencias Electrónico (LIE) y Libro de Órdenes Electrónico (LOE)**.
9. **Ventanilla única** (<https://cogiti.es/ventanilla-unica>).
10. **Portal de tramitación industrial telemática. Asesoría Jurídica, Técnica, Fiscal y Laboral**.

11. **MUPITI**, (Mutualidad de Previsión Social de Peritos e Ingenieros Técnicos Industriales) **Alternativa al RETA. Seguros de salud y Responsabilidad Civil y Profesional**.
12. **Prestaciones sociales** a través de la Mutualidad.
13. Servicio de **préstamo de equipos técnicos de medida**.
14. **Seguros de accidente y de invalidez**.
15. **Convenios de colaboración** con organizaciones y Convenios de Universidades: fomento de formación y empleo.
16. **Ejercicio Libre, ayudas, asesoramiento y defensa profesional**.
17. **Club COGITI** con descuentos en tecnología, ocio, alimentación, etc.
18. **Cuotas colegiales** reducidas en condiciones particulares y gratuitas para precolegiados.
19. **Ventajas fiscales**.
20. **Acreditación EURO INGENIEROS**, para reconocimiento en la UE.



**COGITI**

Consejo General de Colegios Oficiales  
de Graduados e Ingenieros Técnicos  
Industriales de España



# La inteligencia artificial generativa en la Ingeniería Técnica Industrial: innovación, tendencias y el nuevo paradigma tecnológico

**José María Felguera**

Partner strategy y manager en SCHUMPIT Only Innovation Drives Change. Co-fundador y profesor de IA aplicada a los negocios en Academ-ia. Especialista en la implantación de IA Generativa y creación de GPT's para el entorno de trabajo de las empresas.

## Un cambio de paradigma en la práctica ingenieril

Hace justo dos años llegó la novedad tecnológica de una plataforma que, mediante conversación, una máquina era capaz de contestarte con una sintaxis y léxico idéntico al humano. Luego esa misma interface era capaz de generar imágenes, luego videos, más tarde música, y hoy en día es capaz de generar un ecosistema de trabajo capaz de revolucionar la eficiencia de los profesionales y las organizaciones.

En estos dos años, la inteligencia artificial generativa ha pasado de ser un experimento de laboratorio y exclusivo de una comunidad técnica y científica que llevaba décadas dedicadas a conseguir la Inteligencia Artificial General, a convertirse en una herramienta cotidiana para millones de profesionales. La publicación a partir de octubre de 2023 de modelos como

ChatGPT, Gemini, Llama o Claude fueron y son capaces de generar textos técnicos, códigos de programación, diseños conceptuales, investigaciones de mercado o análisis de datos en cuestión de segundos, bien sean con datos públicos o con nuestras propias fuentes de datos.

Pero más allá de la fascinación inicial, lo que está ocurriendo es un cambio profundo en la forma en que los ingenieros concebimos, desarrollamos y comunicamos soluciones técnicas.

La ingeniería siempre se ha basado en el conocimiento acumulado y en la capacidad de resolver problemas con métodos rigurosos y deterministas, de manera que, en base al conocimiento técnico en ciencias, Tecnología, Ingeniería y matemáticas de sus profesionales, eran capaces de dar solución a problemáticas complejas en entornos no controlados. Ahora,

por el contrario, la aparición de sistemas que “aprenden” de millones de ejemplos y son capaces de producir resultados inéditos a partir de instrucciones humanas redefine el propio proceso creativo. Ya no se trata solo de automatizar cálculos o modelizar procesos, sino de colaborar con una inteligencia que genera alternativas, anticipa errores y propone caminos de diseño antes impensables o con una tasa de esfuerzo que los hacían inviables. Estamos, en definitiva, ante una ingeniería aumentada: una disciplina que combina la precisión del método científico con la flexibilidad de la generación algorítmica.

La IA generativa no sustituye al ingeniero, pero amplía su capacidad cognitiva, liberándolo de tareas repetitivas y permitiéndole dedicar más tiempo al análisis, la decisión y la innovación.



Foto: Shutterstock.



## Aplicaciones prácticas en la ingeniería industrial y de proyectos

Los ejemplos de aplicación de la IA generativa en la ingeniería industrial crecen de manera exponencial. En la actualidad, ya se está utilizando en cuatro grandes ámbitos de trabajo: diseño, mantenimiento, gestión documental y formación técnica.

### Diseño y simulación

Las herramientas de diseño asistido por inteligencia artificial, como Autodesk o Aveva con módulos generativos, son un ejemplo de herramientas que permiten crear geometrías optimizadas a partir de restricciones mecánicas, térmicas o de materiales. En la actualidad, para modelar diferentes escenarios se requiere de un trabajo profundo por parte del ingeniero. Gracias a las posibilidades que genera la IA se puede llegar a explorar múltiples combinaciones posibles hasta encontrar las configuraciones más eficientes con tan sólo dictarle las instrucciones de lo que queremos modelar. Este enfoque, conocido como generative design, ha permitido a empresas como AIRBUS reducir pesos estructurales en componentes aeronáuticos y optimizar los tiempos de diseño y prototipaje.

### Mantenimiento predictivo e inteligente

En plantas industriales, donde en la actualidad están mayoritariamente implementados los sistemas MES de control de la producción, la IA generativa se emplea para redactar informes automáticos de mantenimiento, explicar anomalías a partir de datos de sensores y generar instrucciones personalizadas para técnicos de campo. Algunos integran incluso chatbots entrenados con manuales técnicos que responden preguntas complejas en



Fuente: Istock.

lenguaje natural. El resultado es una reducción del tiempo de diagnóstico, proponer soluciones de mejora y una mejora significativa en la trazabilidad de incidencias.

### Gestión de proyectos y documentación técnica

Una de las tareas más tediosas en ingeniería es la elaboración de memorias, pliegos, presupuestos o justificaciones normativas. Hoy, los modelos especializados han avanzado tanto que pueden generar borradores completos de documentos a partir de especificaciones básicas, ahorrando horas de redacción. Herramientas como ChatGPT, COPILOT O GOOGLE STUDIO, cuando se combinan con bases de datos propias y se construyen flujos automatizados, permiten acceder a toda nuestra fuente de conocimiento, catálogos normativos e incluso a fuentes de datos externas a nuestra organización para elaborar los borradores de los redactados de nuestros proyectos.

Además, en entornos de dirección de proyectos, la IA generativa puede simular escenarios de planificación, analizar desviaciones y sugerir estrategias de mitigación basadas en

proyectos anteriores. Su integración con entornos BIM como REVIT y ERP como SAP comienza a ser una realidad en muchas ingenierías industriales europeas, que permite obtener datos relevantes de proyectos de manera conversacional sin necesidad de realizar tablas o pedir la información a los responsables.

### Formación y transferencia de conocimiento

Otra aplicación emergente es la creación de tutores virtuales técnicos. Estos asistentes, entrenados con información corporativa y normativa, facilitan la formación interna de equipos y la actualización de procedimientos. En las Pymes donde el relevo generacional es un desafío, esta capacidad resulta estratégica para conservar y transferir conocimiento, y plantear planes de formación sobre conocimientos concretos de la compañía, en entornos reales y a demanda del grado de capacitación del empleado.

### Tendencias y tecnologías emergentes

Las tendencias actuales apuntan hacia una integración profunda entre IA generativa, sistemas industriales inteligentes y plataformas de gestión de la información. Tres líneas destacan especialmente:

#### Modelos multimodales

La nueva generación de modelos combina texto, imagen, código e incluso señales físicas. Plataformas como OpenAI, Copilot y Anthropic permiten realizar en una misma secuencia multitareas complejas que anteriormente requería trabajar con varias plataformas para obtener un anteproyecto.



Ejemplo de flujo automatizado de asistente de consultas técnicas. Fuente: SCHUMPTIT.

Esto significa que un ingeniero podrá describir en lenguaje natural un sistema hidráulico y obtener su diagrama esquemático, su simulación y el código de control correspondiente. Esta convergencia entre dominios reducirá drásticamente los tiempos de desarrollo de prototipos y permitirá un flujo continuo entre idea, simulación y producción.

NOTA: En la actualidad tan sólo queda automatizar su simulación visual, porque ya se consiguen simulaciones numéricas de comportamientos de instalaciones en diferentes escenarios.

### Software de ingeniería con IA integrada

Los principales fabricantes ya están incorporando capacidades generativas directamente en sus entornos de trabajo. AutoDesk, Dassault Systèmes, Siemens y MathWorks están implementando COPILOTS capaces de generar scripts, modelos de simulación o piezas parametrizadas. El ingeniero no tendrá que “salir” de su entorno CAD o MATLAB para utilizar IA; la inteligencia estará embebida en la propia herramienta o bien le permitirá poder trabajar en entornos que no son de su dominio tan sólo “conversando” con la plataforma.

### Interoperabilidad y normativa

Otra tendencia relevante es la armonización de la IA con los sistemas industriales existentes: PLM, ERP, MES o plataformas IoT. La interoperabilidad permitirá que la IA no solo genere contenido, sino que también actúe sobre los datos reales de producción y mantenimiento, de manera que pueda consultar estados de producción u obtener información concreta de funcionamiento de equipos sin necesidad de acceder a los terminales o pedir informes a los técnicos de planta.

### Retos éticos, legales y profesionales

El despliegue de la IA generativa no está exento de riesgos. El primero de ellos es la fiabilidad de la información generada. Los modelos pueden producir respuestas verosímiles pero incorrectas —lo que se conoce como “alucinaciones”—, y esto en un contexto técnico puede tener consecuencias graves. Por ello, Los ingenieros e ingenieras deberán establecer protocolos de validación

y revisión humana obligatoria antes de incorporar resultados generados por IA a documentación oficial o de proyectos.

Otro desafío crucial es la autoría y responsabilidad técnica. ¿Quién firma un diseño generado parcialmente por una IA? La legislación actual mantiene que la responsabilidad recae en la persona o entidad que emplea la herramienta, lo que refuerza el papel del ingeniero como garante del rigor y la seguridad. En este sentido, la IA debe entenderse como un asistente, no como un sustituto del juicio profesional.

También emerge la cuestión de la confidencialidad y protección de datos industriales. Los sistemas generativos requieren entrenamiento con grandes volúmenes de información, y en muchos casos esos datos son sensibles: planos, procesos, especificaciones o contratos. De ahí la importancia de emplear entornos privados o modelos locales, especialmente en proyectos con propiedad intelectual o seguridad crítica.

En este sentido, Europa está impulsando la regulación mediante el AI Act, que exigirá trazabilidad, claridad de qué algoritmos se utilizan y cómo utilizan los datos base y una certificación de las aplicaciones de IA para entornos críticos como estudios de datos demográficos, médicos o cualquier otro que pudiera suponer un sesgo en su uso.

También la norma ISO/IEC 42001, actualmente en adopción, establece sistemas de gestión para organizaciones que desarrollan o utilizan inteligencia artificial de forma responsable que garanticen un uso adecuado a la normativa europea.

El hecho de que Europa regule esta tecnología con una rapidez y consenso que nunca, y digo nunca de forma categórica, se había conseguido en la promulgación de cualquier otro marco regulatorio, pone de manifiesto la disrupción que la IA generará en el ecosistema social, político y empresarial de todo el mundo.

En nuestro ámbito concreto, se inicia el paso hacia una ingeniería cognitiva, en la que el ingeniero deja de ser únicamente un operador de software y gestor de conocimiento para convertirse en diseñador de sistemas inteligentes.

Por supuesto, aparejado se genera un reto menos visible pero igualmente

importante: el riesgo de dependencia cognitiva. A medida que las herramientas se vuelven más potentes, puede surgir la tentación de aceptar sus resultados sin el análisis crítico necesario, sobre todo en etapas tempranas donde la recurrencia de respuestas aceptables rompen los criterios de validación de cada una. Preservar la competencia técnica y el criterio ingenieril será esencial para evitar que la IA erosione la calidad del razonamiento humano.

En conjunto, estos retos delinean el nuevo perfil del ingeniero contemporáneo: un profesional que combina conocimiento técnico, competencias digitales y pensamiento ético.

### El Futuro. Hacia una ingeniería generativa y humanista

La inteligencia artificial generativa no representa solo una herramienta más en el arsenal tecnológico de la ingeniería; simboliza un nuevo modo de pensar. Supone pasar de la lógica determinista del cálculo a una lógica probabilística y creativa, donde el ingeniero colabora con sistemas que aprenden y proponen. Esta relación, si se gestiona con madurez, puede multiplicar la capacidad de innovación de las organizaciones industriales.

El futuro de la ingeniería industrial dependerá, en gran medida, de la capacidad de sus profesionales para integrar la IA sin perder la esencia del oficio: el compromiso con la precisión, la seguridad y el beneficio social. Formar a los nuevos ingenieros en el uso ético y eficaz de estas herramientas será una prioridad para universidades, colegios profesionales y empresas.

La IA generativa está cambiando la forma en que concebimos proyectos, pero también la forma en que aprendemos, colaboramos y tomamos decisiones. En última instancia, nos obliga a reflexionar sobre qué significa “crear” en una época en que las máquinas también pueden “imaginar”.

La ingeniería siempre ha sido el arte de convertir el conocimiento en progreso. Hoy, ese progreso se multiplica gracias a la inteligencia artificial generativa. Pero el verdadero valor seguirá residiendo en el ingeniero que sepa usar la tecnología con criterio, con ética y con propósito, pero usándola sin excepción.



<https://toolbox.cogiti.es/>

# COGITI TOOLBOX

El portal de gestión de licencias de software para colegiados

Software  
técnico  
para  
Ingenieros

## Consulta nuestro catálogo 2026

**Oferta Exclusiva COGITI**

Haz que **factuone** trabaje por ti  
Gestiona, simplifica y ahorra

**20% de descuento**

**Plan Básico**  
~~14,99€~~ **11,99€/Mes**  
~~179,88€~~ **143,88€/Año**  
1 usuario, 2 GB de almacenamiento, sistema verifactu.

**Plan Plus**  
~~29,99€~~ **23,99€/Mes**  
~~359,88€~~ **287,88€/Año**  
10 usuarios, 4 GB de almacenamiento, 200 escaneos OCR y Gestión contable.

**Evolk** Pruébalo **gratis** durante 14 días

**progeCAD Professional**

**LA ALTERNATIVA CAD ¡Oferta!**

El Consejo General de Graduados en Ingeniería rama Industrial e Ingenieros Técnicos Industriales de España (COGITI) ya confía en progeCAD.

**¿A QUÉ ESPERA PARA PROBARLO?**  
INICIE LA PRUEBA GRATUITA DE 30 DÍAS.

**10% Desde 351€\***

\*Precio sin impuestos

**PACK COMPLETO dmELECT**

**67%**

Instalaciones  
- en Edificación  
- en Urbanización  
- Térmicas

P.V. ~~2.100€+IVA~~

**690€ + IVA**

**PROMOCION especial dmELECT**

**¡No esperes más!**  
Esta Oferta es Por Tiempo Limitado!

**GEATECH soft**

**-30%**

**PACK PROFESIONAL 11**

**3.906€ + IVA**  
~~P.V.P. 5.500€ + IVA~~

**Metalpla**

Metalpla XE11

**¡Oferta!**

**-15%**

~~1850€~~

**¡Ahora! 1572.50€**  
I.V.A no incluido

**Cálculo de estructuras metálicas**

**RIB Presto**

**¡Oferta!**

**Proyecto y dirección de obra Paquete 1**

**-10%**

~~1074€~~

**¡Ahora! 966,60€**  
I.V.A no incluido

**etap**

**AUTOCAD OEM**

**¡Oferta exclusiva! - 36%**

**342 € + IVA**

Incluye gratis un curso Caneco eLearning

<https://toolbox.cogiti.es/>

**COGITI**

**A AutoCAD**

AutoCAD® OEM es una versión personalizada y a medida de AutoCAD® que permite integrar herramientas de diseño brindando funcionalidades de CAD, a través del plugin Caneco Implantation.

**20% Descuento Normas UNE**

**UNE AENOR**

<https://toolbox.cogiti.es/>

**COGITI**  
Consejo General de Colegios Oficiales de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales de España



# Carlos Torres Barroso

Director de Industria y Consumo en Minsait (Indra Group)

## “La IA está redefiniendo el papel del ingeniero, potenciando su creatividad, su capacidad de innovación y su acceso a la información”

**Mariana Morcillo**

La inteligencia artificial se ha convertido en un recurso cotidiano en la industria, aportando rigor, eficiencia y capacidad de anticipación a procesos complejos. Desde Minsait, filial digital de Indra, Carlos Torres Barroso analiza cómo la integración de datos, ingeniería y tecnología está abriendo paso a un nuevo modelo productivo más preciso y sostenible. En su visión, la IA refuerza el trabajo del ingeniero, permitiendo decisiones mejor fundamentadas y operaciones más fiables. Es un avance que no elimina la experiencia humana, sino que la complementa en un entorno industrial que evoluciona con rapidez y con crecientes exigencias técnicas.

**Minsait se ha consolidado como una de las compañías de referencia en la aplicación de inteligencia artificial al ámbito industrial. ¿Cómo describiría la estrategia actual de la empresa para integrar la IA en los procesos productivos y en la cadena de valor de la industria?**

Para Minsait, la IA no es una digitalización más: es un eje que vertebra gran parte de nuestra propuesta de valor para la industria. Nuestra estrategia se basa en una visión integral que combina capacidades tecnológicas avanzadas con un profundo conocimiento sectorial, y se articula en torno a tres grandes pilares.

En primer lugar, la transformación de extremo a extremo: integramos la IA en toda la cadena de valor industrial, desde la planificación y la producción hasta la logística y el mantenimiento. Esto nos permite optimizar procesos, anticipar fallos, reducir costes y mejorar la calidad y la seguridad de las plantas y procedimientos industriales.

En segundo lugar, la IA ética, regulada y escalable: hemos desarrollado



Carlos Torres Barroso

**“Hoy en día, más de 10.000 empresas se encuentran conectadas a iniciativas de innovación en industria inteligente de Minsait”**

en la corporación un marco propio, IA ACTion, que garantiza la aplicación de la IA bajo criterios éticos, responsables y alineados con la nueva legislación europea (AI Act). Este enfoque nos posiciona como referentes en el despliegue de soluciones de IA confiables, tanto en el ámbito privado como en el público. Además, nos posiciona como compañía de referencia para evoluciones procesos y operaciones bajo la normativa con resultados tangibles y rentables.

En tercer lugar, casos de uso reales y medibles: nuestra estrategia se traduce en resultados tangibles. Según los datos de nuestro último informe Ascendant sobre IA, el 67% de las empresas industriales ya utilizaba la IA para optimizar la producción, mejorar la calidad y reforzar la seguridad de sus empleados. Obviamente, la eclosión de casos de uso de IA Generativa en muchas organizaciones, y en etapas mucho más tempranas que otras tecnologías emergentes, ya ha dejado constancia de su enorme potencial de crecimiento. Se trata de casos que abarcan desde la mejora de la eficiencia energética hasta la automatización de tareas repetitivas o la predicción de la demanda, procesos que, en el ámbito de la industrialización, son claves para escalar en competitividad.

Por otra parte, no podemos olvidar las alianzas. En nuestro caso, también escalamos la IA a través de colaboraciones estratégicas con los principales hiperescaladores —Google Cloud, AWS y Microsoft—, así como con socios tecnológicos de referencia como SAP, Salesforce, Siemens, Aveva, IBM o Appian. Las empresas no pueden ir sin ellos. Tengamos en cuenta que muchas de estas grandes firmas ya han acometido unas inversiones económicas inasumibles para la mayoría de las empresas, mucho más en el ámbito de la industria. Y cuentan con unos ecosistemas en la nube necesarios.

Este tipo de alianzas, el apoyo a nuevos socios o la colaboración con centros educativos son muy importantes para Minsait también, ya que nos permiten ofrecer un ecosistema digital con capacidades diferenciales, que permiten acelerar la modernización de sistemas, impulsar la inteligencia artificial aplicada y reforzar la ciberseguridad.

ridad, todo ello con una visión transversal y sectorializada que responde a las necesidades específicas de cada industria.

**En los últimos años se ha producido una convergencia entre la ingeniería tradicional y las tecnologías digitales. Desde Minsait, ¿cómo se articulan las sinergias entre los ingenieros de áreas técnicas y los equipos de ciencia de datos o inteligencia artificial?**

A nivel de contexto, la industria se encuentra con una dificultad operativa de origen, que es la falta de convergencia entre las tecnologías IT/OT. No obstante, esa tendencia se empieza a revertir gracias en parte a nuevas arquitecturas- como puede ser la UNS-, haciendo que IT & OT ya empiecen a “hablar entre sí”, aunque aún queda mucho por hacer. Desde Minsait nos hemos encontrado con muchos procesos de digitalización industrial que afrontan ese escenario al que es importante dar respuesta. De hecho, en 2023, viendo esta problemática, adquirimos la compañía Deuser para ofrecer servicios completos de digitalización de las operaciones, acelerando una convergencia real de los sistemas de tecnología de la información (IT) y los sistemas de tecnología operativa (OT) en la mayoría de sectores industriales.

Esta convergencia IT/OT es paso ineludible en ámbitos como la seguridad industrial, el uso de la computación en la nube y la aceleración de la entrada de herramientas de inteligencia artificial en fábrica para detectar patrones de fallos, contribuir a la eficiencia energética, incrementar la calidad o mejorar la productividad.

A nivel operativo, esta integración la articulamos a través de nuestro conocimiento sectorial, nuestras capacidades tecnológicas avanzadas y una cultura de colaboración multidisciplinar. Por ejemplo, hemos conformado equipos que integran perfiles de ingeniería, expertos en procesos productivos, científicos de datos y especialistas en inteligencia artificial. Esta combinación permite abordar los retos de nuestros clientes desde una doble perspectiva: la operativa y la digital. El conocimiento profundo del terreno que aportan los ingenieros se complementa con la



capacidad de modelado, predicción y automatización de los equipos de IA.

La transformación digital, cuando es completa y estratégica, no puede asumirse por silos. Por el contrario, entendemos que el futuro de la industria pasa por la colaboración entre el conocimiento técnico y el poder transformador de la inteligencia artificial. Nuestra misión es ser el puente entre ambos mundos, para que la tecnología potencie el talento y la experiencia de los ingenieros, y juntos, impulsemos una industria más competitiva e inteligente, pero también resiliente y humana.

**Minsait ha liderado proyectos en sectores como automoción, energía o manufactura, aplicando IA para mejorar mantenimiento, calidad y eficiencia. ¿Cuáles destacaría como los más representativos por su impacto o nivel de innovación y qué aprendizajes han obtenido de ellos?**

El mayor aprendizaje es entender que la inteligencia artificial debe traducirse en resultados tangibles para nuestros clientes. Por eso, nuestros proyectos más representativos comparten un enfoque común: resolver desafíos reales con tecnología avanzada, generando impacto medible y sostenible.

Hoy en día, más de 10.000 empresas se encuentran conectadas a iniciativas de innovación en industria inteligente de Minsait, algunas de ellas referentes en sectores como el energético, el textil, el de consumo, la distribución o la automoción.

Uno de nuestros proyectos más destacados en la integración de tecnologías IT y OT es el que realiza-

mos con AGOlives, la empresa líder mundial en aceituna de mesa. Les acompañamos en un plan completo de transformación digital de sus operaciones, implantando metodologías y tecnologías adaptadas a sus necesidades.

Por ejemplo, desarrollamos un sistema avanzado de planificación y programación (APS) que abarca no solo la producción, sino también áreas como recursos humanos y desarrollo de negocio. Este sistema está conectado con el software de control integral de operaciones (MES), que, a través de una red OT, llega directamente a las líneas de producción. Gracias a nuestras herramientas de conectividad, aseguramos la calidad del servicio para el cliente final.

Además, incorporamos tecnología propia de control de calidad mediante visión artificial, garantizando que cada producto cumple los más altos estándares. En el ámbito de la automatización, creamos un marco de especificaciones que permite estandarizar futuras implantaciones de terceros, asegurando coherencia y eficiencia en toda la planta productiva.

**“A los ingenieros industriales les diría que estamos ante una oportunidad histórica. La inteligencia artificial no viene a sustituir su conocimiento, sino a amplificarlo”**

Minsait también ha llevado a cabo el proceso de migración de los sistemas y aplicaciones de Ecoembes hacia un ecosistema multinube –sobre Microsoft Azure y Oracle Cloud Infrastructure (OCI)–. Esta iniciativa forma parte del Plan Director de Tecnología de Ecoembes, cuyo objetivo es dotar a la organización de una plataforma que aporte valor en su relación con terceros, aumente la eficiencia, ofrezca una gestión ágil de la innovación y posibilite implementar mejoras basadas en IA y analítica avanzada.

Gracias a nuestra experiencia en consultoría industrial, en Minsait hemos desarrollado para Hitachi Energy un proyecto de mantenimiento integral 4.0 completamente digitalizado. El cliente confía en nosotros para analizar su plan de crecimiento y las tecnologías que ya utiliza o quiere incorporar. Con esa información diseñamos una metodología, la implantamos y proporcionamos las herramientas digitales con un fuerte uso de IA, necesarias para sostener la transformación.

Además, ofrecemos un servicio 'llave en mano' que consiste en un equipo de mantenimiento preparado para operar y mantener estas tecnologías, basándose en las predicciones de nuestras herramientas, cumpliendo los objetivos planificados y que están directamente vinculados al negocio y que complementamos con nuestro Observatorio de Industria Digital, que asesora en inversiones para garantizar que estén alineadas con su estrategia y permitan un mantenimiento sostenible en el tiempo.

En el sector Defensa, donde el Grupo Indra lidera proyectos estratégicos, Minsait ha implantado nuestra plataforma soberana industrial. Esta solución integra la captura de informa-

**“Gracias a nuestra experiencia en consultoría industrial, en Minsait hemos desarrollado para Hitachi Energy un proyecto de mantenimiento integral 4.0 completamente digitalizado”**



IA en las Industrias

ción del mundo físico con herramientas digitales para explotarla de forma segura y eficiente. Gracias a esta plataforma, toda la información generada durante la fabricación se almacenan de manera segura y se muestran durante la operación en tiempo real. Todo el proceso está orquestado por un sistema MES, que organiza las tareas en los puestos de trabajo y sincroniza la información con el ERP, en este caso SAP, asegurando su disponibilidad para la toma de decisiones.

Por último, aunque ya antiguo, me gustaría recordar que Minsait colaboró en su día con el Ministerio de Industria, Energía y Turismo para la definición del programa 'Industria Conectada 4.0', guía a nivel nacional diseñada para impulsar la transformación digital de la industria española mediante la actuación conjunta y coordinada del sector público y privado.

**El mantenimiento predictivo y los gemelos digitales están revolucionando la forma de operar en las plantas industriales. ¿Qué avances concretos está desarrollando Minsait en este ámbito y qué resultados tangibles están observando?**

En efecto, uno de los avances más significativos en la digitalización industrial es la creación de gemelos digitales, réplicas virtuales de plantas, procesos y productos que se actualizan con datos reales de operación. Estos gemelos no solo sirven para formar y entrenar a los operarios antes de que trabajen en la planta real, reduciendo el tiempo de adaptación y mejorando la eficiencia, sino que también permiten simular escenarios

de automatización, analizar alternativas técnicas y operacionales, y ajustar el diseño para cumplir requisitos de seguridad y optimización. Y lo más importante, es una herramienta que posibilita asegurar las expectativas de los clientes porque anticipa, mediante una simulación que otro soporte digital o de papel no podría realizar, tener una visión muy exacta de cómo será la futura implantación.

Para Minsait, el empleo de gemelos digitales en nuestros proyectos de implantación de líneas de producción es un hito más de nuestra metodología de gestión de proyectos.

Respecto a casos de uso, podemos mencionar un caso que hemos desarrollado en un proyecto para un fabricante de componentes mecánicos, donde el gemelo digital facilitó el diseño de una solución de automatización, permitió detectar incompatibilidades y optimizar costes y tiempos, asegurando la viabilidad técnica y la rentabilidad de la operación.

En cuanto al mantenimiento predictivo, Minsait lleva años integrando inteligencia artificial y big data en sus plataformas para anticipar necesidades y personalizar servicios. La analítica predictiva permite a las empresas industriales reducir costes de mantenimiento entre un 15% y un 30%, disminuir el tiempo de parada de máquinas hasta un 50% y optimizar la gestión de inventarios y recursos. Estas capacidades se han traducido en resultados tangibles en clientes como Refrival, donde la aplicación de IoT y analítica avanzada optimizó los recursos y elevó la calidad del servicio de mantenimiento, o en SEAT, donde al-



goritmos de visión artificial detectaron defectos en tiempo real en la cadena de producción, permitiendo corregir anomalías antes de que comprometan su fabricación.

Al final, la digitalización debe implicar cambios reales y un impacto visible. Desde una reducción del tiempo de lanzamiento de productos en un 20-30%, mejora de la previsión de demanda en un 30-50%, hasta la digitalización total de los procedimientos técnicos o una disminución de los residuos industriales entre un 5% y un 10%, los réditos de proyectos ya implementados son muy significativos. Además, la monitorización y el control remoto de consumos energéticos generan ahorros superiores al 15%, y evidencian un compromiso con la sostenibilidad y la eficiencia que va más allá de actuaciones concretas.

**La inteligencia artificial generativa comienza a aplicarse en la gestión del conocimiento técnico y en la documentación industrial. ¿Qué potencial le ve para transformar la forma en que los ingenieros trabajan, diseñan o acceden a la información?**

La inteligencia artificial, sobre todo la IA Generativa, ha abierto una nueva era en la gestión del conocimiento técnico y la documentación industrial, y su potencial para transformar el trabajo de los ingenieros es inmenso y ya tangible. Yo creo que no solo está revolucionando la gestión del conocimiento técnico y la documentación industrial, sino que está redefiniendo el papel del ingeniero, potenciando su creatividad, su capacidad de innovación y su acceso a la información.



Recordemos que gracias a su capacidad para procesar y sintetizar información compleja, la IA generativa puede convertir datos dispersos en conocimiento accesible y estructurado, permitiendo a los profesionales acceder rápidamente a la información relevante para cada proyecto, anticipar problemas y tomar decisiones más informadas. Lo sabemos bien: la adopción de inteligencia artificial en Indra Group ha supuesto una transformación profunda en la productividad, la eficiencia y la cultura de trabajo de la organización. Más de 3.000 profesionales utilizan ya Microsoft 365 Copilot, con una tasa de adopción del 80% y resultados tangibles: optimización de dos horas semanales por usuario, mejora de la productividad en un 5% y una satisfacción de cuatro puntos sobre cinco, mejorando ámbitos tan relevantes para nuestra compañía como el desarrollo del software o la presentación de ofertas.

Pero el impacto va más allá de los indicadores cuantitativos. Se ha producido un cambio cultural hacia una forma de trabajar más ágil y creativa, con equipos que ahora pueden dedicar más tiempo a la estrategia y la innovación. Destacan casos como la reducción de hasta un 90% del tiempo dedicado a tareas repetitivas, la mejora en la calidad de los entregables y la democratización controlada del acceso a la información.

Al final, el impacto va mucho más allá de la eficiencia. La IA generativa está transformando la cultura de trabajo, haciendo que los equipos sean más ágiles y colaborativos, y permitiendo que los ingenieros o trabajadores dediquen más tiempo a la estrategia y la innovación. Todo ello sin olvidar que facilita la creación de agentes inteligentes capaces de acompañar a los profesionales en sus primeros pasos, acelerando la curva de aprendizaje y ayudando a resolver dudas técnicas en tiempo real.

**En el ámbito energético y de las utilities, la IA está cambiando la gestión de redes y activos críticos. ¿Qué proyectos recientes ilustran mejor la contribución de Minsait a una energía más inteligente, eficiente y segura?**

En efecto, desde la unidad de Energía de Minsait también se constata cómo la inteligencia artificial está desempe-

**“La inteligencia artificial, sobre todo la IA Generativa, ha abierto una nueva era en la gestión del conocimiento técnico y la documentación industrial, y su potencial para transformar el trabajo de los ingenieros es inmenso y ya tangible”**

ñando un papel decisivo en la transformación del sector energético, y cómo determinados proyectos están redefiniendo la forma en que se gestionan las redes y los activos críticos. Por ejemplo, uno de los avances más relevantes ha sido la aplicación de modelos predictivos para anticipar fallos en infraestructuras clave, como centros de transformación o redes de distribución. Gracias a la sensórica avanzada y al análisis de datos en tiempo real, hemos conseguido reducir significativamente las incidencias y mejorar la disponibilidad de los activos, lo que se traduce en una operación más eficiente y segura.

También impulsa la digitalización integral de las redes eléctricas mediante plataformas como nuestra solución Onesait Utilities, que permite supervisar y controlar remotamente activos distribuidos, automatizar el ciclo de vida de los activos lineales y aplicar tecnologías como IoT, edge computing o gemelos digitales. Esto no solo mejora la trazabilidad y la resiliencia de las redes, sino que también facilita una toma de decisiones más ágil y fundamentada.

En paralelo, la IA está ayudando a nuestros clientes a avanzar en sus objetivos de sostenibilidad. Por ejemplo, Minsait está desarrollando sistemas de visión artificial para proteger la biodiversidad en parques eólicos, reduciendo drásticamente la siniestralidad de aves, y soluciones para monitorizar el polvo en placas solares, optimizando su rendimiento y prolongando su vida útil. Además, en un contexto de creciente electrificación y generación distribuida, la IA se ha convertido en una herramienta clave para anticipar la demanda, planificar la producción y

## “Estamos entrando en una nueva etapa de la industria, más conectada, más inteligente y más humana. Y los ingenieros del ámbito industrial tienen un papel protagonista en ese camino”

gestionar de forma dinámica las redes inteligentes.

Un caso especialmente ilustrativo de la capacidad de Minsait es el despliegue del primer sistema SCADA en la nube para la gestión de toda la red eléctrica de Guatemala, un proyecto pionero que ha permitido operar más de 80.000 kilómetros de red y dar servicio a más de dos millones de clientes. Este tipo de iniciativas demuestran cómo la tecnología, bien aplicada, puede ser un catalizador real para una energía más inteligente, eficiente y segura.

**La adopción de IA plantea retos en materia de gobernanza, seguridad y explicabilidad de los modelos. ¿Cómo afronta Minsait estos aspectos al implementar soluciones en sectores industriales regulados o de infraestructura crítica?**

Hemos desarrollado un marco integral que garantiza que nuestras soluciones de IA sean seguras, éticas y transparentes desde su concepción hasta su despliegue. Nuestra estrategia parte de una convicción clara: la regulación no es un freno, sino una oportunidad para generar confianza. Por eso, hemos acogido con firmeza la aprobación del AI Act europeo, que establece un marco pionero a nivel mundial. Consideramos que esta normativa aporta certidumbre y permite a las empresas definir políticas de uso responsable, al tiempo que refuerza la percepción de un “espacio IA seguro” para los ciudadanos. Eso sí, también defendemos que la regulación debe ser flexible y ágil, capaz de adaptarse al ritmo vertiginoso de la evolución tecnológica.

La entrada en vigor de la AI Act en Europa implica ciertos desafíos para que las compañías adopten la inteligencia artificial desde un ámbito normativo, pero también rentable. Desde nuestro lado, por ejemplo, hemos creado un marco normativo de acción (AIACtion), para que las empresas, grandes o pequeñas, puedan escalar en el uso de la IA internamente de forma responsable y transparente, pero también eficientes con sus objetivos de negocio.

La seguridad es otro pilar fundamental. A través de Minsait Cyber, líder en ciberseguridad, protegemos entornos operacionales (OT) e infraestructuras críticas con soluciones que van desde la gestión de identidades y la protección de datos hasta la ciberdefensa avanzada. Esta capa de seguridad es especialmente relevante en determinados ámbitos industriales, donde los riesgos asociados a la IA pueden tener un impacto directo en la vida de las personas.

Por último, la explicabilidad es un aspecto que abordamos desde su doble vertiente técnica y cultural. A nivel técnico, trabajamos con arquitecturas que permiten auditar y entender las decisiones de los modelos, algo esencial en sectores regulados. Y desde el punto de vista cultural, promovemos una IA comprensible y accesible, que permita a todos los usuarios confiar en las recomendaciones del sistema y tomar decisiones informadas.

**Por último, ¿qué mensaje trasladaría a los ingenieros de la rama industrial sobre las oportunidades que abre la inteligencia artificial en su campo y sobre el papel que pueden desempeñar en esta nueva etapa de digitalización avanzada de la industria?**

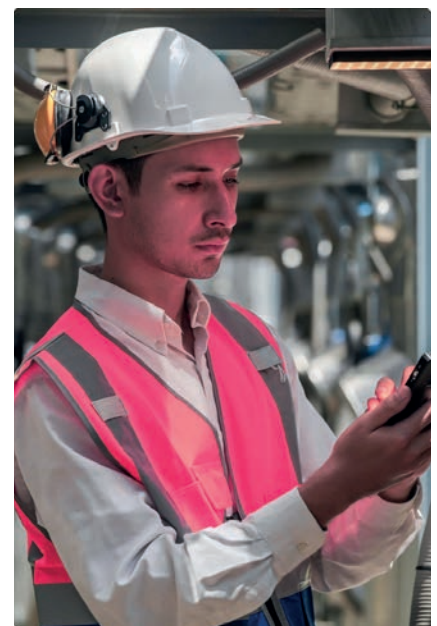
A los ingenieros del ámbito industrial les diría que estamos ante una oportunidad histórica. La inteligencia artificial no viene a sustituir su conocimiento, sino a amplificarlo. En un momento en el que la industria se enfrenta a retos sin precedentes, desde la sostenibilidad hasta la resiliencia de las cadenas de suministro, la IA se convierte en una herramienta clave para diseñar soluciones más eficientes, seguras y adaptadas a un entorno cambiante.

Pero para que esa transformación sea real, necesitamos que las personas, los profesionales y trabajadores

de la industria, estén realmente en el centro. Su comprensión profunda de los procesos, su capacidad para resolver problemas complejos y su visión práctica del negocio son imprescindibles para que la IA escale internamente dentro de las organizaciones, y se aplique con sentido, impacto y con responsabilidad. En Minsait vemos cada día que los proyectos más exitosos son aquellos en los que los equipos de ingeniería y los expertos en datos trabajan codo con codo, aprendiendo unos de otros y construyendo juntos.

No olvidemos que la IA no sustituye a las personas, pero sí está abriendo nuevas formas de trabajar. Desde el diseño asistido por algoritmos hasta la automatización de tareas repetitivas, pasando por la generación de documentación técnica o la simulación de escenarios mediante gemelos digitales, los profesionales tienen hoy a su alcance herramientas que les permiten centrarse en lo que realmente aporta valor: la creatividad, la innovación y la toma de decisiones estratégicas.

Estamos entrando en una nueva etapa de la industria, más conectada, más inteligente y más humana. Y los ingenieros del ámbito industrial tienen un papel protagonista en ese camino. No solo como usuarios de la tecnología, sino como impulsores de una transformación interna que, si se hace bien, puede mejorar no solo la productividad, sino también la calidad del empleo, la sostenibilidad del planeta y el bienestar de las personas.



# ¿Por qué elegirnos?



El ingeniero que  
buscas está aquí

Más Información:  
[www.proempleoingenieros.es](http://www.proempleoingenieros.es)  
[cogiti@cogiti.es](mailto:cogiti@cogiti.es)  
91 554 18 06

Metodología de selección de  
probada eficacia

Sello de profesionalidad de la  
colegiación y Acreditación DPC

Expertise en la ingeniería de la rama  
industrial

Garantía de calidad respaldada por  
COGITI



**COGITI**  
Consejo General de Colegios Oficiales  
de Graduados e Ingenieros Técnicos  
Industriales de España



# Inteligencia Artificial y medicina: una alianza estratégica ante los retos del siglo XXI

La Inteligencia Artificial (IA) ha dejado de ser una promesa futurista para convertirse en un componente clave de transformación en múltiples sectores. Uno de los ámbitos donde su impacto está siendo más disruptivo es el de la medicina, donde las tecnologías basadas en IA están revolucionando la prevención, el diagnóstico, el tratamiento y la gestión de los sistemas sanitarios. Sin embargo, este avance conlleva importantes retos técnicos, éticos, regulatorios y sociales que aún deben abordarse para consolidar una integración segura y equitativa.

## Mónica Ramírez

La IA en medicina abarca una amplia gama de tecnologías, desde el machine learning (aprendizaje automático) y el procesamiento del lenguaje natural, hasta los modelos generativos, como los sistemas de diagnóstico por imagen basados en redes neuronales profundas. Su aplicación permite a los profesionales de la salud acceder a herramientas que mejoran la toma de decisiones clínicas, aumentan la precisión diagnóstica y optimizan los recursos disponibles.

Un ejemplo concreto es la radiología asistida por IA, que permite detectar patrones imperceptibles al ojo humano en imágenes de resonancia magnética, tomografías o mamografías. Estas herramientas ya se están utilizando para el cribado temprano de enfermedades como el cáncer de mama, con tasas de sensibilidad comparables o incluso superiores a las del especialista humano en determinadas circunstancias.

En el ámbito de la genómica y la medicina personalizada, la IA permite analizar millones de datos genéticos en tiempos récord, ayudando a predecir predisposiciones a enfermedades y a desarrollar tratamientos individualizados basados en el perfil molecular de cada paciente.

## IA al servicio del paciente: desde chatbots hasta cirugía asistida

Más allá del diagnóstico, la IA está transformando también la relación médico-paciente. Los sistemas conversacionales, o chatbots médicos,

ya se utilizan en servicios de atención primaria para orientar a los pacientes, programar citas, resolver dudas básicas de salud e incluso monitorizar síntomas en enfermedades crónicas como la diabetes o la hipertensión.

En cirugía, la robotización asistida por IA permite realizar intervenciones de altísima precisión con mínima invasividad, reduciendo complicaciones y tiempos de recuperación. Equipos como el Da Vinci Surgical System se benefician de algoritmos que analizan datos intraoperatorios en tiempo real para asistir al cirujano con recomendaciones adaptadas al caso específico.

Asimismo, los sistemas de monitorización remota con IA permiten a los médicos seguir la evolución de sus pacientes desde casa, mediante dispositivos portátiles que miden constantes vitales y detectan anomalías potencialmente graves antes de que se manifiesten clínicamente.

## Retos éticos y de gobernanza: ¿quién toma la última decisión?

Aunque los beneficios son evidentes, la integración de la IA en medicina plantea retos éticos fundamentales. Uno de los principales es el de la responsabilidad en la toma de decisiones clínicas: si un sistema de IA sugiere un tratamiento erróneo que resulta perjudicial, ¿quién es el responsable? ¿El médico que lo siguió, el programador que diseñó el algoritmo, o la institución que lo implantó?

Otro aspecto crítico es el de los sesgos algorítmicos. Los sistemas

de IA aprenden de los datos que se les proporciona, y si estos datos son incompletos o reflejan desigualdades sociales, los resultados pueden perpetuar o incluso amplificar esas injusticias. Por ejemplo, un algoritmo entrenado mayoritariamente con datos de poblaciones blancas puede ser menos preciso al diagnosticar enfermedades en personas de otras etnias.

Además, el uso masivo de datos médicos plantea serias preocupaciones en materia de privacidad, consentimiento informado y ciberseguridad. Garantizar que la información médica sensible no sea utilizada indebidamente ni comprometida es esencial para mantener la confianza del paciente y la integridad del sistema sanitario.

## Regulación, estandarización y validación

Uno de los principales obstáculos para una adopción generalizada de la IA en medicina es la falta de marcos regulatorios específicos. A diferencia de los fármacos, los algoritmos de IA no siguen procesos de validación clínica estandarizados. Esto dificulta su aprobación y comercialización a gran escala.

La Agencia Europea del Medicamento (EMA) y organismos como la FDA en Estados Unidos ya han comenzado a diseñar rutas de aprobación para dispositivos médicos basados en IA. En paralelo, la Unión Europea trabaja en una legislación específica sobre IA (la AI Act), que clasificará los sistemas según su nivel de riesgo y establecerá requisitos



Un médico utiliza una tableta digital con tecnología de IA para la base de datos de registros médicos electrónicos en la red. Foto: Shutterstock.

de transparencia, seguridad y control humano.

Asimismo, las sociedades médicas y los colegios profesionales tienen un papel clave en la formación continua de los profesionales sanitarios para el uso adecuado de estas herramientas, así como en la creación de guías clínicas que incorporen criterios éticos y científicos para la evaluación de tecnologías inteligentes.

### **Hacia una medicina más preventiva, equitativa y eficiente**

Pese a los desafíos, la IA tiene el potencial de contribuir a una medicina más proactiva y preventiva, capaz de anticiparse a la enfermedad

en lugar de reaccionar a ella. Esto es especialmente relevante en un contexto de envejecimiento poblacional, aumento de enfermedades crónicas y presión sobre los recursos sanitarios.

La automatización de tareas repetitivas y administrativas puede liberar tiempo para que los profesionales se concentren en lo verdaderamente importante: el contacto humano, la escucha y la toma de decisiones complejas.

Además, la IA bien implementada puede mejorar la equidad en el acceso a servicios médicos en zonas rurales o con escasa cobertura sanitaria, al facilitar el diagnóstico remoto y el seguimiento continuo.

### **Una herramienta, no un sustituto**

La Inteligencia Artificial no viene a reemplazar al profesional médico, sino a potenciar sus capacidades, ofreciendo herramientas que amplifican su juicio clínico, mejoran la eficiencia de los procesos y abren nuevas posibilidades en el tratamiento y la prevención de enfermedades.

No obstante, su integración responsable requiere una colaboración activa entre ingenieros, sanitarios, reguladores, pacientes y ciudadanía. Solo así se podrá garantizar que el uso de la IA en medicina responda a los principios de beneficencia, autonomía y justicia que guían la práctica médica desde sus orígenes.

# Cómo la inteligencia artificial y las nuevas herramientas de automatización están transformando los procesos empresariales

**Pablo Horcajuelo Muñoz**

En un mercado cada vez más competitivo, la automatización de procesos mediante inteligencia artificial deja de ser una opción tecnológica para convertirse en un factor estratégico de competitividad. Desde la optimización operativa hasta el ahorro de costes y la escalabilidad, la IA ofrece a las empresas la capacidad de transformar sus flujos de trabajo, liberar talento humano y adaptarse al crecimiento de forma ágil y sostenible.

## Automatización inteligente: más allá de la automatización tradicional

Durante años, las organizaciones han automatizado tareas repetitivas mediante software de reglas fijas o sistemas ERP. Sin embargo, la IA permite dar un paso más allá, dotando a los sistemas de capacidad de aprendizaje, adaptación y toma de decisiones autónoma en base a grandes volúmenes de datos.

Gracias a algoritmos de machine learning, procesamiento de lenguaje natural (NLP) y visión artificial, la automatización inteligente puede abordar tareas más complejas: desde el análisis predictivo de la demanda hasta la clasificación automática de documentos o la gestión dinámica de inventarios.

## Ejemplos prácticos de automatización con IA

Actualmente existen herramientas específicas que permiten automatizar tareas concretas mediante inteligencia artificial:

- Automatización de emails y marketing personalizado: Plataformas como ActiveCampaign o HubSpot utilizan IA para segmentar audiencias, optimizar envíos y personalizar el contenido según el comportamiento del usuario.
- Procesamiento de documentos y datos estructurados: Herramientas como UiPath Document Understanding o Microsoft Syntex aplican IA para extraer información de facturas,

contratos o formularios de forma automática.

- Atención al cliente y chatbots: Soluciones como Intercom, Drift o los chatbots de Google Dialogflow permiten gestionar consultas automáticamente, aprendiendo de las interacciones para mejorar sus respuestas.
- Visión artificial aplicada a control de calidad: Sistemas como Landing AI o Amazon Lookout for Vision analizan imágenes o vídeos en tiempo real para detectar defectos en procesos industriales.
- Automatización de procesos financieros: Plataformas como Kensho o DataRobot permiten automatizar análisis financieros, detección de fraudes y generación de informes predictivos.

## Herramientas de automatización de procesos sin código

En paralelo al avance de la IA, han surgido herramientas que permiten a las empresas automatizar procesos sin necesidad de programar, facilitando la integración entre distintas aplicaciones y servicios. Este tipo de soluciones son especialmente útiles para pequeñas y medianas empresas que buscan agilidad sin grandes inversiones en desarrollo.

- Make (antes Integromat): permite diseñar flujos de trabajo visuales conectando múltiples aplicaciones (CRM, ERP, comercio electrónico, email, etc.) y estableciendo reglas de automatización. Por ejemplo, es posible que, al recibir un pedido online, Make genere automáticamente la factura, actualice el inventario, envíe el email de confirmación y registre el movimiento contable.
- Zapier: orientado a la automatización de tareas sencillas y de uso general, conecta cientos de aplicaciones cloud permitiendo flujos automatizados como la creación de registros en hojas de cálculo, envío de notificaciones o actualizaciones entre sistemas de ventas y marketing.

- Microsoft Power Automate: pensado para entornos empresariales, permite integrar aplicaciones tanto en la nube como on-premise, incluyendo automatización de procesos internos, aprobaciones, integración con Microsoft 365, SharePoint o Dynamics 365.

- Workato: orientado a automatización avanzada en entornos empresariales complejos, permite crear integraciones más sofisticadas entre sistemas con capacidades de lógica empresarial y control de errores.

Estas herramientas democratizan el acceso a la automatización, permitiendo a los departamentos operativos, comerciales o administrativos mejorar sus procesos sin depender exclusivamente del área de TI.

## Eficiencia operativa y reducción de errores

Uno de los principales beneficios de la automatización con IA es la drástica mejora de la eficiencia. Las máquinas procesan grandes cantidades de información a velocidad constante, reduciendo los tiempos de ejecución y minimizando los errores humanos. Esto permite liberar recursos humanos de tareas rutinarias, para que puedan centrarse en actividades de mayor valor añadido.

En sectores como la industria manufacturera, la logística o los servicios financieros, la IA está optimizando procesos de control de calidad, detección de anomalías, validación de transacciones y atención automatizada al cliente.

## Ahorro de costes a corto y largo plazo

Si bien la implantación inicial de soluciones de automatización inteligente puede requerir inversión en software, integración y formación, el retorno de la inversión suele ser rápido. La reducción de tiempos, el menor margen de error y la optimización de recursos redundan en un ahorro directo.

Además, muchas soluciones basadas en IA se ofrecen hoy bajo modelos





En el sector industrial, la IA se aplica en los ámbitos del mantenimiento predictivo de maquinaria, control de calidad mediante visión artificial, y optimización de líneas de producción, entre otros.

SaaS (Software as a Service), lo que permite acceder a estas tecnologías sin necesidad de grandes infraestructuras propias.

### Escalabilidad y adaptación al crecimiento empresarial

Otro de los puntos fuertes de la automatización con IA es su capacidad de escalar a medida que la empresa crece. Los algoritmos pueden entrenarse con nuevos datos y adaptarse a escenarios cambiantes, manteniendo la eficiencia incluso ante picos de demanda o entrada en nuevos mercados.

Esto permite a las empresas mantener una estructura ágil, evitando tener que aumentar proporcionalmente los recursos humanos para gestionar mayores cargas de trabajo.

### Casos de uso reales en el tejido empresarial

- Sector industrial: mantenimiento predictivo de maquinaria, control de calidad mediante visión artificial, optimización de líneas de producción.
- Sector logístico: rutas dinámicas de reparto, optimización de almacenes, predicción de demanda.
- Sector financiero: detección de fraudes, automatización de auditorías, asesoramiento financiero automatizado.
- Sector sanitario: diagnóstico por imagen, gestión automatizada de citas, predicción de riesgos de salud.

### Un cambio cultural además de tecnológico

Para que la automatización con IA sea realmente efectiva, las empresas deben acompañar el cambio tecnológico con una transformación cultural. Es fundamental preparar a los equipos para trabajar junto a sistemas inteligentes, impulsar la formación en competencias digitales y promover una mentalidad de mejora continua.

La inteligencia artificial aplicada a la automatización de procesos no es una promesa de futuro, es una realidad al alcance de las empresas que desean ser más competitivas, eficientes y escalables. Quienes apuesten por integrar estas soluciones de forma estratégica estarán mejor posicionados para afrontar los retos de un mercado en constante evolución.

### Preguntas frecuentes sobre automatización con IA

#### ¿Qué diferencia hay entre automatización tradicional y automatización con IA?

La automatización tradicional sigue reglas fijas y procesos predefinidos. La IA permite que los sistemas aprendan de los datos, se adapten a nuevas situaciones y tomen decisiones autónomas, lo que amplía enormemente las posibilidades de automatización.

#### ¿Es necesaria una gran inversión inicial para automatizar con IA?

Depende del alcance. Existen solu-

ciones SaaS accesibles para pymes, mientras que proyectos más complejos pueden requerir inversiones mayores. Sin embargo, el retorno de inversión suele ser rápido gracias al ahorro de costes y aumento de eficiencia.

#### ¿Qué tareas son más fáciles de automatizar hoy en día?

Procesamiento de datos, generación de informes, atención al cliente mediante chatbots, validación de documentos, integraciones entre aplicaciones y análisis predictivo son algunas de las tareas más automatizadas actualmente.

#### ¿Necesito conocimientos de programación para implementar automatización en mi empresa?

No necesariamente. Herramientas como Make, Zapier o Power Automate permiten automatizar procesos sin necesidad de programar, gracias a sus interfaces visuales y configuraciones sencillas.

#### ¿Qué riesgos existen al automatizar procesos con IA?

Riesgos como la dependencia tecnológica, posibles errores por entrenamiento inadecuado de los modelos o la falta de supervisión humana. Por ello es clave implementar controles, revisiones periódicas y un enfoque gradual de adopción.

**Pablo Horcajuelo** es socio director de Programación y marketing digital en Sale Systems.

# Diseño y validación de un controlador predictivo no lineal basado en un modelo aplicado al seguimiento de trayectorias de vehículos autónomos

Design and Validation of a Nonlinear Model-Based Predictive Controller Applied to Autonomous Vehicle Trajectory Tracking

Marc Sánchez-Mateu<sup>1</sup>, Daniel S. Gamba<sup>2</sup>, J Pérez-Fernández<sup>2</sup>, JA Cabrera Carrillo<sup>2</sup>, JJ Castillo-Aguilar<sup>2</sup>

## Resumen

El campo de los vehículos y de la conducción autónoma se encuentra inmerso en un rápido crecimiento y expansión. Por ello, en el presente artículo se pretende diseñar un controlador predictivo que sea capaz de calcular el ángulo de dirección óptimo para poder seguir una trayectoria genérica, además de realizar trayectorias como el cambio de carril y el doble cambio de carril. Este tipo de controladores necesita un modelo interno que represente la dinámica longitudinal, lateral y la guiñada con precisión, el cual se describe mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales de segundo orden que especifica dicho comportamiento dinámico.

A diferencia de otros tipos de controladores, el controlador predictivo requiere de la resolución de un problema de optimización para obtener la acción de control. La función de coste característica de la optimización se compone de un conjunto de matrices que, en su totalidad, describen el comportamiento del controlador predictivo. Se destaca la importancia de recoger el comportamiento dinámico del modelo en su forma matricial. Para ello, se debe someter al conjunto de ecuaciones diferenciales a un proceso matemático de linealización, obteniendo la representación en espacio de estados del modelo. Una vez representado en su forma matricial, se construyen el resto de matrices de la optimización a partir de estas.

En la resolución del problema de seguimiento de trayectorias, es habitual el uso de modelos de vehículo simplificados que asumen un comportamiento del neumático lineal, en el que las fuerzas laterales y longitudinales de estos son proporcionales al ángulo de deriva.

## Palabras clave

Control predictivo basado en un modelo no lineal (NMPC), control predictivo basado en modelo (MPC), seguimiento de trayectorias (PT) y programación cuadrática (QP).

## Abstract

The field of vehicles and autonomous driving is currently undergoing rapid growth and expansion. For this reason, the present article aims to design a predictive controller capable of calculating the optimal steering angle to follow a generic trajectory, as well as to perform manoeuvres such as lane changes or double lane changes. This type of controller requires an internal model that accurately represents the longitudinal, lateral, and yaw dynamics, which is described by a set of second-order differential equations that capture such dynamic behaviour.

Unlike other types of controllers, the predictive controller requires solving an optimization problem to obtain the control action. The cost function characteristic of the optimization is composed of a set of matrices that, as a whole, describe the behaviour of the predictive controller. Emphasis is placed on capturing the dynamic behaviour of the model in its matrix form. To achieve this, the set of differential equations must undergo a mathematical linearization process, resulting in the state-space representation of the model. Once expressed in its matrix form, the remaining optimization matrices are derived from it.

In solving the trajectory tracking problem, it is common to use simplified vehicle models that assume linear tire behaviour, in which lateral and longitudinal forces are proportional to the slip angle.

## Keywords

Nonlinear model predictive control (NMPC), model predictive control (MPC), path tracking (PT), quadratic programming (QP).

Recibido/received: 03/07/2025

Aceptado/accepted: 27/09/2025

<sup>1</sup>Departamento de ingeniería Mecánica, Universidad de Málaga; e-mail: marcsanchez@uma.es

<sup>2</sup>Departamento de ingeniería Mecánica, Universidad de Málaga; e-mails: danielgamba@uma.es, javierperez@uma.es, jcabrera@uma.es, juancas@uma.es

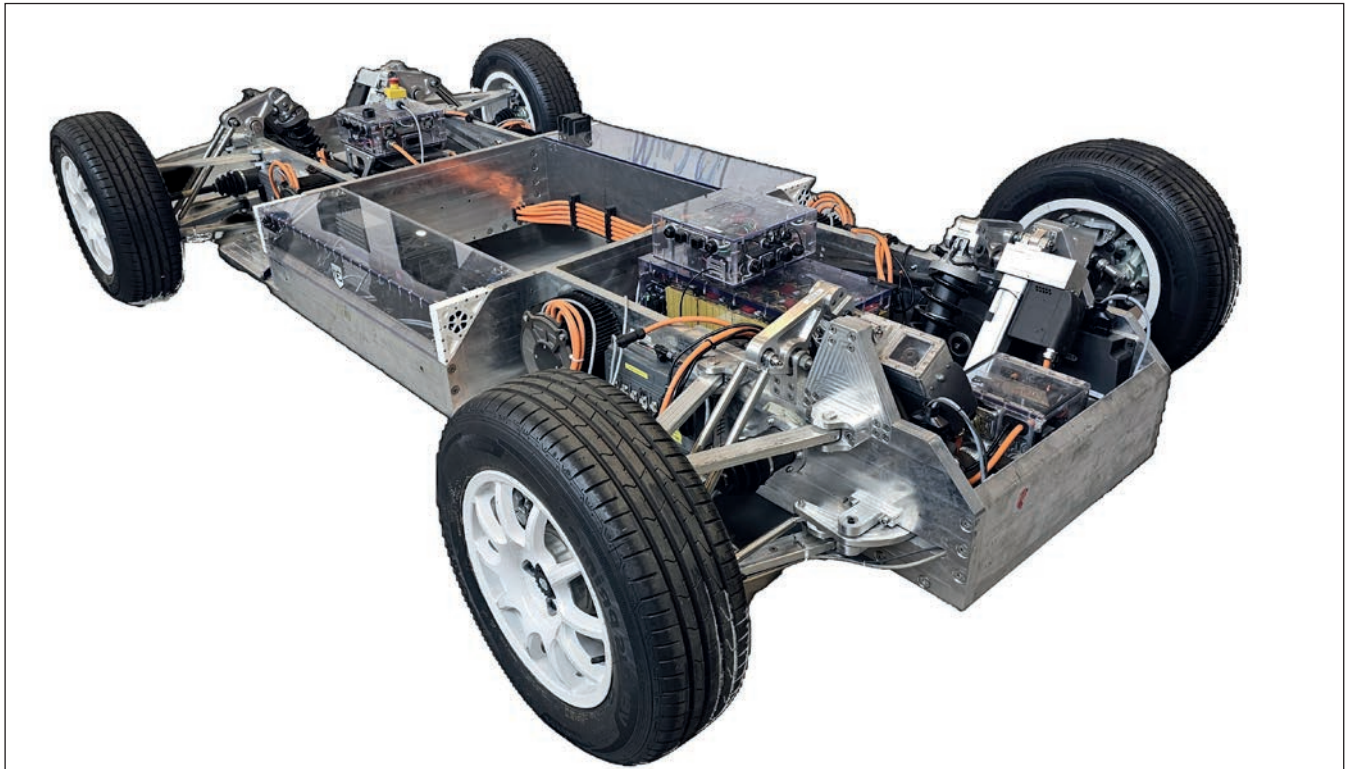


Imagen cedida por los autores del artículo

## INTRODUCCIÓN

Debido al incremento de la congestión del tráfico y al aumento de incidentes causados por una conducción impropia, el interés por la implantación del vehículo autónomo en la sociedad actual se ha visto incrementado. En los últimos años, ha surgido un avance tecnológico en el campo de la conducción autónoma impulsado por su potencial para mejorar la seguridad, promover una conducción eficiente en el consumo de energía y optimizar el flujo del tráfico (Urmoson *et al.*). Es por ello por lo que Qing Li analiza las necesidades del vehículo autónomo y presenta la arquitectura del sistema de control y la capacidad de detectar carriles de forma automática (Li *et al.*, 2004). Desde entonces, muchos investigadores han dedicado grandes esfuerzos a realizar avances en el desarrollo y el control del vehículo autónomo. Desde la perspectiva de la detección de obstáculos, Häne es capaz de extraer la información de obstáculos estáticos de mapas de profundidad calculados a partir de imágenes consecutivas (Häne *et al.*, s.f.). Abdelmoghith Zaarane plantea un sistema de medición de distancia entre vehículos para conducción autónoma basado en el procesamiento de imágenes, haciendo uso de cámaras estéreo

y procesamiento de imagen (Zaarane *et al.*, 2020). Desde la perspectiva del *path planning*, Huang propone el uso de un algoritmo RRT (*Rapidly-exploring Random Tree*) para la planificación de rutas en un entorno complejo con un gran número de obstáculos aleatorios (Huang & Ma, 2022). Chao Chun Yuan presenta un nuevo algoritmo de fusión que combina el algoritmo de colonia de hormigas y un campo potencial mejorado, lo que permite que el vehículo autónomo evite obstáculos y conduzca de manera más segura (Yuan *et al.*, 2020).

En el área del control de vehículos autónomos, José E. Naranjo propone un sistema de adelantamiento para vehículos autónomos equipado con capacidades de seguimiento de trayectoria y cambio de carril. El sistema utiliza controladores difusos que imitan el comportamiento y las reacciones humanas durante maniobras de adelantamiento; se basa en la información proporcionada por un sistema de posicionamiento global de gran precisión y un entorno de red inalámbrica (Naranjo *et al.*, 2008). Hamid presenta un novedoso método de control indirecto robusto y adaptativo basado en un enfoque de red neuronal difusa de tipo 2 con modo deslizante de tipo expo-

nencial, considerando incertidumbres paramétricas relacionadas con la rigidez nominal en curva del vehículo, el coeficiente de adherencia neumático-carretera, los parámetros inerciales y la velocidad de avance (Taghavifar & Rakheja, 2019). Teniendo en cuenta el conflicto existente entre precisión de seguimiento y la estabilidad bajo condiciones extremas de conducción, Tchamna promueve un nuevo enfoque para controlar la tasa de guiñada y el deslizamiento lateral de un vehículo, sin descuidar su dinámica longitudinal y sin realizar suposiciones simplificadoras sobre su movimiento (Tchamna y Youn, 2013). Kibeom Lee propone un control lineal cuadrático gaussiano (LQG) para diseñar de manera eficiente y sistemática el controlador de seguimiento de trayectoria, al mismo tiempo que maneja eficazmente los problemas de ruido y error que surgen de los algoritmos de localización y planificación de trayectorias (Lee *et al.*, 2019). Hay multitud de técnicas y algoritmos para realizar el control sobre el movimiento del vehículo, pero todos están enfocados en mejorar la precisión y la estabilidad del control. Más allá de estos controladores, el control predictivo basado en modelo destaca por su capacidad para manejar



sistemas complejos y dinámicos, optimizando el control mientras respeta las restricciones operativas del vehículo (Yu *et al.*, 2021), convirtiéndolo en el algoritmo de control más empleado a la hora de resolver los problemas de seguimiento de trayectorias en vehículos autónomos.

Primeramente, Falcone (2007) defiende la implementación de un controlador predictivo para controlar un sistema de dirección activa en el eje delantero de un vehículo autónomo. Este compara dos enfoques con diferentes costes computacionales: el uso de un modelo no lineal de elevada complejidad del vehículo, sujeto a un proceso de linealización en cada iteración, y un modelo de menor complejidad cuyos parámetros varían de forma lineal. Este último tiene en cuenta el estado del vehículo y las restricciones para garantizar la estabilidad a grandes velocidades y en superficies con poca adherencia. Posteriormente, Falcone *et al.* (2008) presentan un esquema de seguimiento de trayectoria basado en control predictivo por modelo (MPC) para realizar maniobras de evasión de obstáculos mediante la optimización del ángulo de la dirección y el control de la aceleración o el frenado. Cheng (2021) diseña un controlador de seguimiento de trayectoria robusto basado en MPC, capaz de hacer frente a incertidumbres en los parámetros. Este controlador incorpora un algoritmo novedoso que puede resolverse mediante un conjunto de desigualdades matriciales lineales (LMI), derivadas del principio de estabilidad asintótica de Lyapunov. Más tarde, Cheng *et al.* (2021) proponen un algoritmo de control predictivo adaptativo, el cual calcula los parámetros característicos del controlador en función del estado del vehículo y de las condiciones del trazado. En la mayoría de los artículos previamente citados, muchos autores optan por emplear el modelo lineal de bicicleta, el cual ayuda a reducir el coste computacional y muestra gran precisión siempre y cuando se trabaje en la zona lineal del neumático. Sin embargo, en maniobras extremas y en superficies de baja adherencia, este controlador presenta limitaciones. Por ello, en el presente artículo se diseña un algoritmo de control predictivo basado en el modelo no lineal de Dugoff, el cual, mediante una formulación

matemática más simple que otros modelos de neumático como el de Pacjeka, puede reproducir con precisión el comportamiento real del neumático.

## MODELO DINÁMICO DEL VEHÍCULO

### Modelo de bicicleta

La resolución del problema de seguimiento de trayectorias (PT) depende en gran medida del modelo de vehículo empleado, ya que es un requisito indispensable para la estrategia de control utilizada. Los vehículos son sistemas muy complejos, con múltiples grados de libertad y una gran cantidad de parámetros que varían de forma no lineal con el tiempo. Debido a esta complejidad, resulta extremadamente difícil desarrollar un modelo capaz de capturar, en su totalidad, todas las características del vehículo. Además, emplear un modelo tan detallado implicaría un aumento significativo en el costo computacional, lo que dificultaría su implementación en el control en tiempo real. Por ello, es esencial utilizar un modelo dinámico simplificado cuyos parámetros puedan adaptarse con el tiempo, manteniendo un equilibrio entre precisión y viabilidad computacional. Este enfoque permite un buen seguimiento de la trayectoria en tiempo real sin comprometer el rendimiento.

En este apartado, se introduce el modelo de vehículo y de neumático empleado para el control basado en el espacio de estados. Dicho modelo debe

ser capaz de describir la dinámica plana del automóvil, y es necesario describir mediante ecuaciones los movimientos longitudinales, laterales y de rotación. Se selecciona el modelo de bicicleta con tres grados de libertad para modelizar la dinámica plana de vehículos sin considerar la geometría de Ackerman. Este es una representación simple y efectiva que se utiliza ampliamente en los controles de estabilidad y trayectoria de vehículos autónomos (Lin, Sun, Wu, y Qian, 2021). Este artículo demuestra cómo aplicando dicho modelo simplificado, que incluye la rigidez de los neumáticos, puede lograrse un seguimiento preciso y suave de la trayectoria de referencia. El modelo es eficaz incluso en condiciones difíciles que involucran movimientos laterales, longitudinales y de giro del vehículo. Para poder aplicar este modelo, se deben considerar las siguientes simplificaciones:

- Las ruedas del mismo eje se agrupan en una sola rueda ubicada en el centro del eje delantero o trasero.
- El peso del cuerpo del vehículo se distribuye en cada rueda.
- Efectos como los movimientos de la suspensión, fenómeno de deslizamiento y los efectos de la aerodinámica son despreciados.
- Se ignoran efectos como la relación de acoplamiento de la fuerza del neumático y el efecto del par de alineación.

La representación del modelo en un sistema de coordenadas plano puede visualizarse en la figura 1.

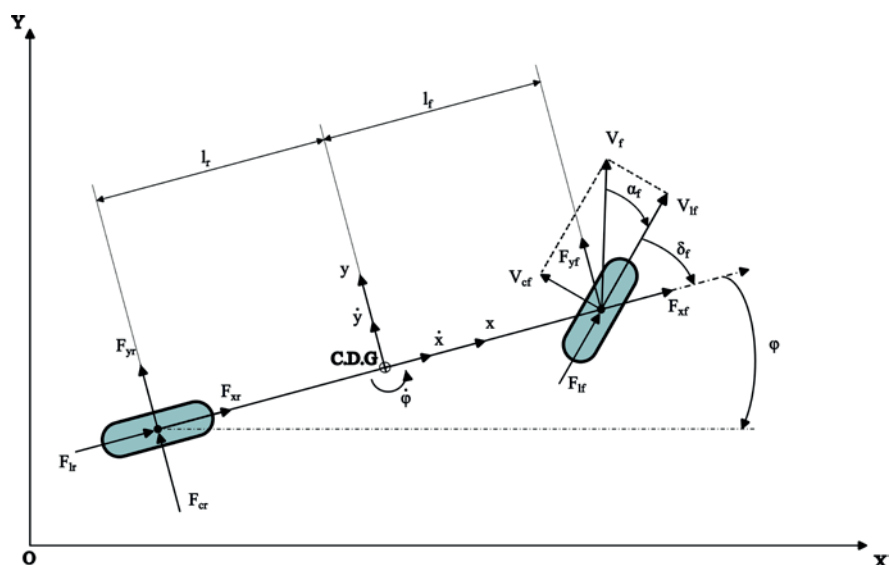


Figura 1. Modelo de bicicleta de tres grados de libertad.

De acuerdo con la Segunda Ley de Newton y Euler, el equilibrio de fuerzas y momentos resultante a lo largo de los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$  locales cuya referencia está centrada en el centro de gravedad del vehículo es el siguiente:

$$m\ddot{x} = 2F_{xf} + 2F_{xr} + m\dot{y}\dot{\phi} \quad (1)$$

$$m\ddot{y} = 2F_{yf} + 2F_{yr} - m\dot{x}\dot{\phi} \quad (2)$$

$$I_z\ddot{\phi} = 2F_{yf}l_f - 2F_{yr}l_r \quad (3)$$

donde  $m$  es la masa del vehículo,  $F_{xf}$  y  $F_{xr}$  son las fuerzas longitudinales de las ruedas delantera y trasera respecto del eje local  $x$ .  $F_{yf}$  y  $F_{yr}$  son las fuerzas laterales sobre los delantero y trasero, calculadas respecto del eje local  $y$ . La inercia del vehículo respecto del eje  $z$  viene representada por el parámetro  $I_z$ .

Las fuerzas de los neumáticos delantero y trasero obtenidas en las direcciones  $x$  e  $y$  se relacionan con las fuerzas longitudinales y laterales de estos. La relación es la siguiente [1]:

$$F_{xf} = F_{lf} \cos(\delta_f) - F_{cf} \sin(\delta_f)$$

$$F_{xr} = F_{lr} \cos(\delta_r) - F_{cr} \sin(\delta_r) \quad (4)$$

$$F_{yf} = F_{lf} \sin(\delta_f) + F_{cf} \cos(\delta_f)$$

$$F_{yr} = F_{lr} \sin(\delta_r) + F_{cr} \cos(\delta_r)$$

En la fórmula (4),  $F_{lf}$  y  $F_{lr}$  son las fuerzas longitudinales de las ruedas delantera y trasera,  $F_{cf}$  y  $F_{cr}$  son las fuerzas laterales de ambas ruedas (delantera y trasera). Los ángulos de dirección delantero y trasero se representan como  $\delta_f$  y  $\delta_r$  respectivamente. Se asume que el modelo de vehículo seleccionado solo tiene dirección en la rueda delantera, lo que resulta en que  $\delta_r=0$ . Además, si se desprecia el efecto de transferencia de carga y asumiendo que la velocidad del vehículo cambia lentamente, las cargas verticales del neumático delantero y trasero puede calcularse (Chen *et al.*, 2013):

$$F_{zf} = \frac{l_r m g}{2(l_f + l_r)} \quad (5)$$

$$F_{zr} = \frac{l_f m g}{2(l_f + l_r)} \quad (6)$$

Las fuerzas longitudinal y lateral del neumático puede expresarse como una función compleja del ángulo de deriva del neumático  $\alpha$  ángulo de deslizamiento longitudinal del neumático y la fuerza vertical  $F_z$ , además de otros parámetros que se comentarán con más detalle posteriormente:

$$F_l = f_l(\alpha, s, F_z) \quad (7)$$

$$F_c = f_c(\alpha, s, F_z) \quad (8)$$

Además, los ángulos de deriva trasero y delantero pueden calcularse aplicando la siguiente ecuación:

$$\alpha_f = \delta_f - \frac{\dot{y} - l_f \dot{\phi}}{\dot{x}} \quad (9)$$

$$\alpha_r = \frac{\dot{y} + l_r \dot{\phi}}{\dot{x}} \quad (10)$$

En la fórmula,  $\alpha_f$  y  $\alpha_r$  son los ángulos de deslizamiento de las ruedas delanteras y traseras, respectivamente,  $\dot{x}$  e  $\dot{y}$  son las velocidades longitudinal y lateral del vehículo,  $\dot{\phi}$  es la tasa de variación del ángulo de guiñada y  $\delta_f$ , el ángulo de dirección de la rueda delantera. Con el fin de minimizar el coste computacional para el modelo simplificado, se asume la hipótesis de pequeños ángulos de deslizamiento. Se traduce en una simplificación en las funciones trigonométricas que aparecen en las ecuaciones que describen la dinámica del modelo de bicicleta de la figura 1. Se da la siguiente condición:

$$\cos \delta_f \approx 1, \sin \delta_f \approx \delta_f, \tan \delta_f \approx \delta_f \quad (11)$$

Las ecuaciones (1)-(8) derivan del sistema de coordenadas local centrado en el cuerpo del vehículo. Hay una relación entre el sistema de coordenadas fijo en el cuerpo y el sistema de coordenadas inercial  $X, Y$ :

$$\dot{X} = \dot{x} \cos \delta_f - \dot{y} \sin \delta_f \quad (12)$$

$$\dot{Y} = \dot{x} \sin \delta_f + \dot{y} \cos \delta_f \quad (13)$$

Donde  $X$  es la posición longitudinal en el sistema de referencias inercial e  $Y$  es la posición lateral en el sistema de coordenadas inercial.

### Modelo de neumático no lineal. Modelo de Dugoff

Para conseguir una reducción en el coste computacional de los cálculos, es muy habitual encontrar algoritmos de control en los que se asume la hipótesis de pequeños ángulos de deslizamiento descrito en la ecuación (9). Cuando dicha hipótesis es cierta y los ángulos de deslizamiento longitudinal y lateral son pequeños, las fuerzas que actúan sobre el neumático pueden aproximarse linealmente como:

$$\begin{cases} F_l = C_l s \\ F_c = C_c \alpha \end{cases} \quad (14)$$

En la ecuación (12),  $C_l$  es la rigidez longitudinal del neumático y  $C_c$  es su rigidez lateral. El uso de dicha ecuación tiene limitado el rango de aplicación, ya que solo es viable su uso para aceleraciones laterales  $a_y$  menores de 0,3-0,4 g y condiciones de adheren-

cia normales y no cerca de la pérdida de tracción. En caso de sobrepasar el límite de la aceleración lateral o si el vehículo circula en superficies de baja adherencia, las fuerzas laterales y longitudinales que se calculan en el modelo interno del controlador pueden inducir cierto error. Empíricamente, se ha observado que, en caso de sobrepasar dichas limitaciones, el incremento de las fuerzas en el neumático es más lento con el ángulo de deriva longitudinal y lateral, perdiendo la linealidad. Por ello, las fuerzas calculadas bajo la hipótesis lineal de pequeños deslizamientos serían mayores que la fuerza bajo condiciones reales, lo que introduce una discrepancia en el modelo interno del controlador y afecta el rendimiento del controlador. Para hacer el controlador más preciso y versátil, se implementa un modelo de vehículo basado en el modelo de neumático no lineal de Dugoff (Gao *et al.*, 2024.), reemplazando el coeficiente de rigidez constante de la ecuación (12) por un coeficiente corregido no lineal, el cual permite capturar el comportamiento real del neumático bajo condiciones que favorecen la pérdida de proporcionalidad entre el deslizamiento y la fuerza. La expresión que se usa para el cálculo de este nuevo coeficiente de rigidez no lineal es:

$$C_{\alpha ij}^{non} = \frac{C_{\alpha ij}}{1 - s_{ij}} f(\sigma) \quad (15)$$

$f(\sigma)$  es el parámetro de deflexión del neumático, el cual otorga al modelo interno la capacidad de reproducir el comportamiento del neumático con mayor rigor, involucrando los rangos de trabajo en los que se pierde la linealidad debido a los factores descritos en el párrafo anterior. Este se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{\mu F_{zij}(1 - s_{ij})}{2\sqrt{(C_{sij}s_{ij})^2 + (C_{\alpha ij} \tan \alpha_{ij})^2}} \quad (16)$$

$$f(\sigma) = \begin{cases} \sigma(2 - \sigma), & \sigma < 1 \\ 1, & \sigma \geq 1 \end{cases} \quad (17)$$

$\mu$  es el coeficiente de adherencia,  $F_{zij}$  es la carga vertical sobre el neumático,  $C_{sij}$  es el valor de referencia del coeficiente de rigidez longitudinal del neumático y  $C_{\alpha ij}$  es el valor de referencia de rigidez lateral.  $s_{ij}$  y  $\alpha_{ij}$  son sus ángulos de deslizamiento longitudinal y lateral. El índice  $i$  indica la dirección de la fuerza ( $x$  o  $y$ ) y el índice  $j$  la rueda

en la que se aplica la fuerza (delantera o trasera). En las ecuaciones, la rueda delantera se asocia con la letra *f*, que deriva del inglés *front*. Para la rueda trasera, se hace uso de la letra *r*, en inglés *rear*. Una vez calculados los parámetros de rigidez longitudinal y lateral, pueden obtenerse las fuerzas lateral y longitudinal de forma sencilla:

$$F_{xij} = C_{sij}^{non} s_{ij} \quad (18)$$

$$F_{yij} = C_{\alpha ij}^{non} \alpha_{ij} \quad (19)$$

En la figura 2 puede verse la evolución del nuevo coeficiente de rigidez  $C_{\alpha ij}^{non}$  frente al ángulo de deslizamiento del neumático  $\alpha_{ij}$  a distintos valores de coeficiente de fricción  $\mu$ . Para ángulos de deslizamiento pequeños (0-2 grados), dicho coeficiente presenta un comportamiento lineal, lo que hace que la fuerza lateral varíe también linealmente. De este modo, se valida la hipótesis de proporcionalidad planteada inicialmente. Por otro lado, en dicha figura también se aprecia que, a partir de ángulos de deslizamiento más elevados, por encima de 2 grados aproximadamente, el valor que toma el coeficiente de rigidez propuesto disminuye de forma no lineal y captura la variación no uniforme tan característica del neumático (Gao *et al.*, 2024.). Este cambio en la rigidez no solo refleja la capacidad del neumático para mantener la adherencia a altas velocidades o en condiciones extremas, sino también la forma en que las características del material y la estructura del neumático influyen en su rendimiento bajo diferentes condiciones de carga y deslizamiento. Bastaría con aplicar las fórmulas (18) y (19) para obtener el valor de las fuerzas longitudinal y lateral para su respectivo coeficiente de rigidez ajustado  $C_{\alpha ij}^{non}$ .

En la figura 3 puede visualizarse que, ante un determinado valor de carga vertical de 4.120 N, la influencia del coeficiente de fricción  $\mu$  sobre las fuerzas laterales a las que se puede ver sometido el neumático. El propio valor del coeficiente de rodadura determina el límite de deslizamiento de este. Cuanto más grande sea el valor de dicho coeficiente, mayor es la rigidez del neumático (v. Fig. 2) y, por consiguiente, mayor es el valor pico de la fuerza lateral. El valor de rigidez constante  $C_{\alpha}$  empleado para realizar los cálculos del

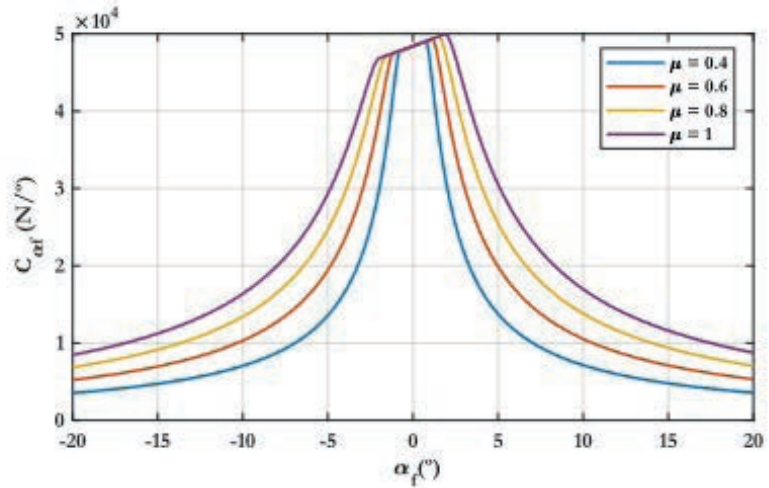


Figura 2. Efecto de la de fricción  $\mu$  y del ángulo de deslizamiento  $\alpha_{ij}$  sobre el coeficiente de rigidez  $C_{\alpha ij}^{non}$ .

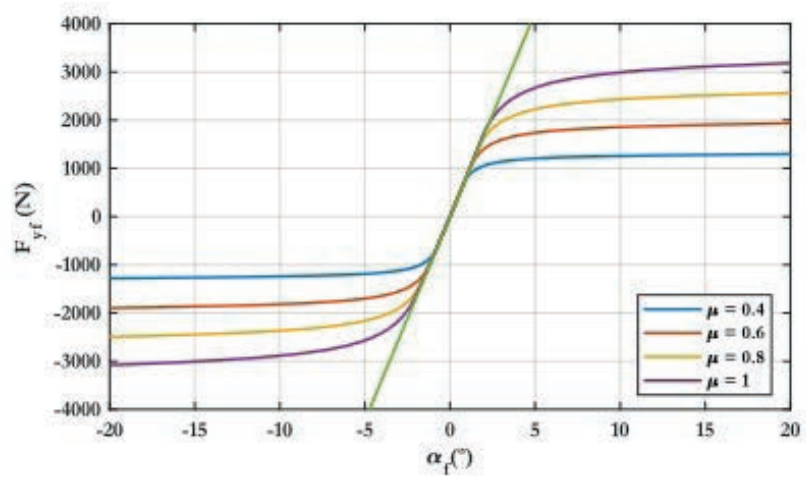


Figura 3. Efecto de la de fricción  $\mu$  y del ángulo de deslizamiento  $\alpha_{ij}$  sobre la fuerza lateral del neumático  $F_{y.}$

modelo de Dugoff de las ecuaciones (15)-(17) y que permite la representación de las figuras 2 y 3 es de 48.400 N/°. Este es un valor representativo para simular el comportamiento del neumático ante condiciones típicas de carga y deslizamiento.

Puede verse en las ecuaciones (18) y (19) que la fuerza lateral es solo dependiente del ángulo de deslizamiento lateral y que la fuerza longitudinal lo es del deslizamiento longitudinal. Por lo que sustituyendo dichas ecuaciones en las ecuaciones (1)-(3), se puede obtener el modelo de bicicleta no lineal basado en Dugoff:

$$\ddot{x} = \frac{2F_{xf} \cos(\delta_f) - 2C_{\alpha f}^{non} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + f \dot{\psi}}{x} \right) \sin(\delta_f) + 2F_{xr}}{m} + \dot{y} \dot{\psi} \quad (20)$$

$$\ddot{y} = \frac{2F_{yf} \sin(\delta_f) + 2C_{\alpha f}^{non} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + f \dot{\psi}}{x} \right) \cos(\delta_f)}{m} - \frac{2C_{\alpha r}^{non} \left( \frac{\dot{y}}{x} \right)}{m} - \dot{x} \dot{\psi} \quad (21)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{\left( 2F_{xf} \sin(\delta_f) + 2C_{\alpha f}^{non} \left( \delta_f - \frac{\dot{y} + f \dot{\psi}}{x} \right) \cos(\delta_f) \right) f_r}{I_z} - \frac{2C_{\alpha r}^{non} \left( \frac{\dot{y}}{x} \right) f_r}{I_z} \quad (22)$$

$$\dot{\phi} = \dot{\psi} \quad (23)$$

$$\dot{X} = \dot{x} \cos \delta_f - \dot{y} \sin \delta_f \quad (24)$$

$$\dot{Y} = \dot{x} \sin \delta_f + \dot{y} \cos \delta_f \quad (25)$$

## DISEÑO DEL CONTROLADOR PREDICTIVO BASADO EN MODELO

### Algoritmo de control propuesto

El controlador predictivo basado en modelo (MPC) es una estrategia de control avanzado que utiliza un modelo matemático discreto del sistema para prever su comportamiento futuro y determinar las acciones de control óptimas. Este enfoque se basa en la definición de dos horizontes clave: el horizonte de predicción  $N_p$  y el horizonte de control  $N_c$ . El horizonte de predicción es el intervalo de tiempo en el que el controlador anticipa la dinámica futura del sistema, evaluando el impacto de las posibles acciones de control sobre las salidas del sistema. Por otro lado, el horizonte de control corresponde a la porción del horizonte de predicción en la que se optimizan



y se aplican las acciones de control, usualmente limitado para simplificar el problema y para evitar elevados costes computacionales.

El principio fundamental del MPC consiste en resolver, en cada instante de tiempo, un problema de optimización que minimiza una función de coste, la cual combina los errores entre las salidas predichas y las referencias, así como los esfuerzos de control. Este cálculo se realiza bajo las restricciones físicas y operativas del sistema, como límites en los estados, salidas y entradas. Solo se aplica la primera acción de control de esta secuencia, y el proceso se repite en el siguiente paso, actualizando el modelo con las mediciones más recientes. La estructura del controlador puede verse en la figura 4.

El primer elemento importante es el generador de referencias, el cual, en función de la posición y velocidad estimada del vehículo, obtendrá para cada instante de tiempo  $T_s$ , el conjunto de puntos que sirven como referencia durante todo el horizonte de predicción definido en el controlador. Otro elemento importante para destacar es el modelo de neumático de Dugoff. Tomando los ángulos de deslizamiento  $\alpha_f$  y  $\alpha_r$  como entrada, calcula internamente los coeficientes de rigidez no lineal  $C_{\alpha f}^{non}$  y  $C_{\alpha r}^{non}$ . El controlador, tomando los nuevos coeficientes de rigidez, actualiza el modelo interno del vehículo y predice el comportamiento de este a lo largo del horizonte de predicción. Finalmente, una vez predicho el comportamiento, se compara con el conjunto de puntos de la referencia y se obtiene la acción de control óptima. Esta última es el ángulo de dirección del vehículo.

### Modelo empleado para la predicción

La discretización es un proceso esencial para el desarrollo de algoritmos de control de tipo predictivo, ya que estos emplean un modelo discreto del sistema dinámico interno para realizar la predicción sobre el comportamiento futuro de este. Es necesario representar en espacio de estados las ecuaciones (20)-(25). Para ello, seleccionamos como variables de estado la posición longitudinal  $x$ , la velocidad longitudinal  $\dot{x}$ , la posición lateral  $y$ , la velocidad lateral  $\dot{y}$ , el ángulo de rotación de vehículo

(ángulo de guiñada)  $\varphi$ , la variación del ángulo  $\dot{\varphi}$ , la desviación lateral  $Y$  y la desviación longitudinal  $X$ . El conjunto de variables de estado se agrupa de forma matricial, definiendo lo que se conoce como vector de estados  $\mathbf{x} = [X, \dot{x}, Y, \dot{y}, \varphi, \dot{\varphi}]^T$ . En las ecuaciones (20)-(23) se observa que el sistema también depende de la variable del ángulo de dirección  $\delta_f$ . En sistemas de control aplicado al seguimiento de trayectorias, es muy habitual elegir como variable de control  $\mathbf{u} = \delta_f$ .

La forma general de representar la ecuación de estado es la siguiente:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (26)$$

La variable de estado y la variable de control del vehículo de referencia satisface, para cualquier instante de tiempo, la ecuación de arriba. El subíndice  $r$  representa la variable de referencia:

$$\dot{\mathbf{x}}_r = \mathbf{f}(\mathbf{x}_r, \mathbf{u}_r) \quad (27)$$

El paso previo a la discretización es la linealización del sistema definido en la ecuación (26). Para ello, se realiza una expansión en series de Taylor alrededor de cualquier punto de referencia de la trayectoria, ignorando los términos de alto orden (Gao *et al.*, 2024.):

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_r, \mathbf{u}_r) + \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_r} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_r) + \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_r} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_r) \quad (28)$$

Si se restan las ecuaciones (28) y (27) se obtiene:

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}(t)\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{B}(t)\tilde{\mathbf{u}} \quad (29)$$

Donde las matrices  $\mathbf{A}(t)$  y  $\mathbf{B}(t)$  se conocen como matrices jacobianas, y representa las derivadas parciales de una función respecto de sus variables independientes. Estas variables de estado se agrupan dentro del vector de estados  $\mathbf{x}$  y la variable de control  $\mathbf{u}$ . Analíticamente, estas matrices se calculan:

$$\mathbf{A}(t) = \begin{pmatrix} 0 & \frac{\partial f_x}{\partial x} & 0 & \frac{\partial f_x}{\partial y} & \frac{\partial f_x}{\partial \varphi} & 0 \\ 0 & \frac{\partial f_{\dot{x}}}{\partial x} & 0 & \frac{\partial f_{\dot{x}}}{\partial y} & 0 & \frac{\partial f_{\dot{x}}}{\partial \dot{\varphi}} \\ 0 & \frac{\partial f_y}{\partial x} & 0 & \frac{\partial f_y}{\partial y} & \frac{\partial f_y}{\partial \varphi} & 0 \\ 0 & \frac{\partial f_{\dot{y}}}{\partial x} & 0 & \frac{\partial f_{\dot{y}}}{\partial y} & 0 & \frac{\partial f_{\dot{y}}}{\partial \dot{\varphi}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_{\varphi}}{\partial \varphi} & 0 \\ 0 & \frac{\partial f_{\dot{\varphi}}}{\partial x} & 0 & \frac{\partial f_{\dot{\varphi}}}{\partial y} & 0 & \frac{\partial f_{\dot{\varphi}}}{\partial \dot{\varphi}} \end{pmatrix} \quad (30)$$

$$\mathbf{B}(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\partial f_x}{\partial u} \\ 0 \\ \frac{\partial f_y}{\partial u} \\ 0 \\ \frac{\partial f_{\dot{\varphi}}}{\partial u} \end{pmatrix} \quad (31)$$

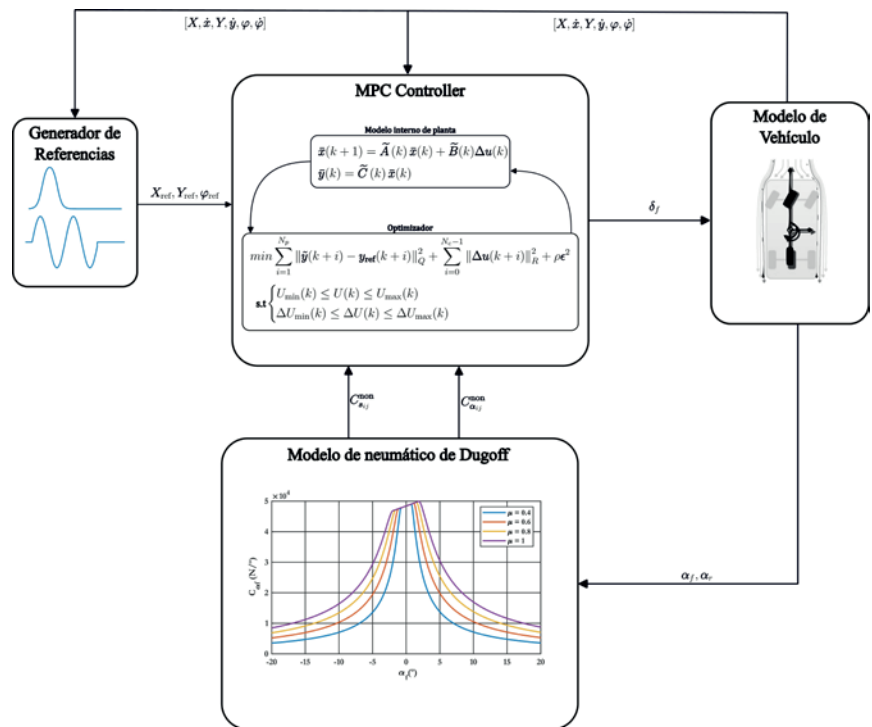


Figura 4. Bucle de control del MPC

Los términos de la matriz  $\mathbf{A}(t)$  y  $\mathbf{B}(t)$  son:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f_x}{\partial x} &= \cos \varphi \\
 \frac{\partial f_x}{\partial y} &= -\sin \varphi \\
 \frac{\partial f_x}{\partial \varphi} &= -\dot{x} \sin \varphi - \dot{y} \cos \varphi \\
 \frac{\partial f_y}{\partial x} &= \frac{2(c_{\delta_f}^{\text{non}} \sin \delta_f (\dot{y} + l_f \dot{\varphi}))}{m \dot{x}^2} \\
 \frac{\partial f_y}{\partial y} &= \frac{-2(c_{\delta_f}^{\text{non}} \sin \delta_f)}{m \dot{x}} + \dot{y} \\
 \frac{\partial f_y}{\partial \varphi} &= \frac{-2(c_{\delta_f}^{\text{non}} \sin \delta_f) l_f}{m \dot{x}} + \dot{\varphi} \\
 \frac{\partial f_{\dot{x}}}{\partial x} &= \sin \varphi \\
 \frac{\partial f_{\dot{x}}}{\partial y} &= \cos \varphi \\
 \frac{\partial f_{\dot{x}}}{\partial \varphi} &= \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi \\
 \frac{\partial f_{\dot{y}}}{\partial x} &= \frac{2(c_{\delta_f}^{\text{non}} \cos \delta_f (\dot{y} + l_f \dot{\varphi}))}{m \dot{x}^2} - \frac{2c_{\delta_f}^{\text{non}} (\dot{y} - l_f \dot{\varphi})}{m \dot{x}^2} \\
 \frac{\partial f_{\dot{y}}}{\partial y} &= \frac{2(c_{\delta_f}^{\text{non}} \cos \delta_f)}{m \dot{x}} + \frac{2c_{\delta_f}^{\text{non}}}{m \dot{x}} - \dot{\varphi} \\
 \frac{\partial f_{\dot{y}}}{\partial \varphi} &= \frac{2(c_{\delta_f}^{\text{non}} \cos \delta_f) l_f}{m \dot{x}} - \frac{2c_{\delta_f}^{\text{non}} l_f}{m \dot{x}} - \dot{y} \\
 \frac{\partial f_{\ddot{x}}}{\partial \varphi} &= 1 \\
 \frac{\partial f_{\ddot{x}}}{\partial x} &= \frac{2(c_{\delta_f}^{\text{non}} \cos \delta_f (\dot{y} + l_f \dot{\varphi})) l_f}{l_x \dot{x}^2} - \frac{2c_{\delta_f}^{\text{non}} (\dot{y} - l_f \dot{\varphi})}{l_x \dot{x}^2} \\
 \frac{\partial f_{\ddot{x}}}{\partial y} &= \frac{2(c_{\delta_f}^{\text{non}} \cos \delta_f) l_f}{l_x \dot{x}^2} + \frac{2c_{\delta_f}^{\text{non}} l_f}{l_x \dot{x}^2} \\
 \frac{\partial f_{\ddot{x}}}{\partial \varphi} &= \frac{2(c_{\delta_f}^{\text{non}} \cos \delta_f) l_f^2}{l_x \dot{x}^2} - \frac{2c_{\delta_f}^{\text{non}} l_f^2}{l_x \dot{x}^2} \\
 \frac{\partial f_{\ddot{x}}}{\partial u} &= \frac{-2F_x f \sin \delta_f}{m} + \frac{2c_{\delta_f}^{\text{non}} \sin \delta_f}{m} - \frac{2c_{\delta_f}^{\text{non}} (\dot{\delta}_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\varphi}}{\dot{x}}) \cos \delta_f}{m} \\
 \frac{\partial f_{\ddot{y}}}{\partial u} &= \frac{2F_x f \cos \delta_f}{m} + \frac{2c_{\delta_f}^{\text{non}} \cos \delta_f}{m} - \frac{2c_{\delta_f}^{\text{non}} (\dot{\delta}_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\varphi}}{\dot{x}}) \sin \delta_f}{m} \\
 \frac{\partial f_{\ddot{\varphi}}}{\partial u} &= \frac{2F_x l_f \cos \delta_f}{l_x} + \frac{2c_{\delta_f}^{\text{non}} l_f \cos \delta_f}{l_x} - \frac{2c_{\delta_f}^{\text{non}} (\dot{\delta}_f - \frac{\dot{y} + l_f \dot{\varphi}}{\dot{x}}) l_f \sin \delta_f}{l_x}
 \end{aligned} \quad (32)$$

La fórmula (29) representa una ecuación de espacio de estados continua en el tiempo. Para su implementación en el algoritmo de control, esta debe discretizarse, ya que el MPC requiere de un modelo en espacio de estados discreto para poder realizar la predicción. Hay multitud de métodos de discretización de ecuación, cada uno con sus ventajas y desventajas en cuanto a los requisitos computacionales, precisión del seguimiento de la trayectoria, etc. (Gao *et al.*, 2024.). En el presente artículo, se propone el método de discretización de Euler, que permite representar las matrices del sistema continuas  $\mathbf{A}(t)$  y  $\mathbf{B}(t)$  en su forma discreta:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}(k) &= \mathbf{I} + T_s \mathbf{A}(t) \\
 \mathbf{B}(k) &= T_s \mathbf{B}(t)
 \end{aligned} \quad (33)$$

$T_s$  es el tiempo de muestreo e  $\mathbf{I}$ , la matriz identidad cuya dimensión debe ser coincidir con la de la matriz  $\mathbf{A}(t)$ . En este caso es una matriz 6x6. Una vez realizada la discretización, el nuevo modelo en espacio de estados que se obtiene es:

$$\tilde{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}(k) \tilde{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{B}(k) \tilde{\mathbf{u}}(k) \quad (34)$$

Ya que la variable de control es el ángulo de dirección de la rueda delantera  $\delta_f$ , para poder asegurar un funcionamiento normal del vehículo y

prevenir cambios repentinos en dicho ángulo, es crucial limitar el incremento del ángulo de dirección. Con este propósito, la ecuación (34) se transforma a su representación en forma de incrementos de la acción de control (Gao *et al.*, 2024.). Esta reformulación permite que el sistema controle directamente los cambios en el ángulo, lo que es esencial para mantener una conducción suave y predecible, especialmente en escenarios en los que el comportamiento dinámico del vehículo puede verse afectado por variaciones rápidas:

$$\tilde{\mathbf{x}}(k+1) = \tilde{\mathbf{A}}(k) \tilde{\mathbf{x}}(k) + \tilde{\mathbf{B}}(k) \Delta \tilde{\mathbf{u}}(k) \quad (35)$$

En la fórmula:  $\tilde{\mathbf{x}}(k) = \begin{pmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{y}(k-1) \end{pmatrix}$ ,  $\tilde{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{\text{non}} & \mathbf{B}_{\text{non}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_{n-1} \end{pmatrix}$ ,  $\tilde{\mathbf{B}} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_{\text{non}} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}$ ,  $\Delta \tilde{\mathbf{u}}(k) = \mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1)$ .

En el algoritmo propuesto, la referencia del controlador es el conjunto de puntos de la trayectoria objetivo, los cuales están definidos en el plano mediante su posición en  $x$ , en  $y$  y el ángulo de rotación respecto al punto anterior  $\varphi$ . Con el propósito de realizar el seguimiento del camino objetivo, las salidas del controlador serán aquellas que permiten ubicar el vehículo en el plano, y son: la posición longitudinal del vehículo en coordenadas globales  $X$ , la posición lateral en coordenadas globales  $Y$  y la rotación del vehículo o ángulo de guiñada  $\varphi$ . De esta manera, el MPC calculará la acción de control óptima que minimice el error existente entre la posición actual del vehículo y la trayectoria. En otras palabras, el objetivo es reducir la distancia entre el vehículo y la trayectoria conforme avanza la simulación [16]. Según los fundamentos de la representación de sistemas en espacio de estados, las salidas pueden obtenerse mediante la siguiente operación matricial:

$$\tilde{\mathbf{y}}(k) = \tilde{\mathbf{C}}(k) \tilde{\mathbf{x}}(k) \quad (36)$$

$$\tilde{\mathbf{C}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Por lo que combinando las ecuaciones (35) y (36), se obtiene el modelo completo en espacio de estados discreto:

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{x}}(k+1) = \tilde{\mathbf{A}}(k) \tilde{\mathbf{x}}(k) + \tilde{\mathbf{B}}(k) \Delta \tilde{\mathbf{u}}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \tilde{\mathbf{C}}(k) \tilde{\mathbf{x}}(k) \end{cases} \quad (37)$$

### Cálculo de la salida en el dominio temporal de la predicción

Se asume que el horizonte de predicción  $N_p$  es mayor que el horizonte de control  $N_c$ . Basándose en la ecuación (37), se estima que se aplicarán  $N_c$  incrementos de control durante el hori-

zonte de control del sistema. Cuando el tiempo  $k$  se encuentra en el horizonte de control, al pasar del horizonte de control al horizonte de predicción, la cantidad de control aplicada al sistema permanece constante y el incremento de la acción de control es 0. Tras realizar la derivación, se puede obtener la expresión de salida predicha del sistema (Gao *et al.*, 2024.):

$$\tilde{\mathbf{y}}(k) = \tilde{\mathbf{A}}(k) \tilde{\mathbf{x}}(k|k) + \tilde{\mathbf{B}}(k) \Delta \tilde{\mathbf{u}}(k) \quad (38)$$

En la fórmula es:

$$\begin{aligned}
 \tilde{\mathbf{y}}(k) &= \begin{pmatrix} \mathbf{y}(k+1|k) \\ \vdots \\ \mathbf{y}(k+N_p|k) \end{pmatrix} \quad \Delta \tilde{\mathbf{u}}(k) = \begin{pmatrix} \Delta \tilde{\mathbf{u}}(k|k) \\ \vdots \\ \Delta \tilde{\mathbf{u}}(k+N_c-1|k) \end{pmatrix} \\
 \tilde{\mathbf{A}}(k) &= \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{C}} \tilde{\mathbf{A}} \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}} \tilde{\mathbf{A}}^{N_p} \end{pmatrix} \quad \tilde{\mathbf{B}}(k) = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{C}} \tilde{\mathbf{B}} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}} \tilde{\mathbf{A}}^{N_c-1} \tilde{\mathbf{B}} & \dots & \tilde{\mathbf{C}} \tilde{\mathbf{B}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}} \tilde{\mathbf{A}}^{N_p-1} \tilde{\mathbf{B}} & \dots & \tilde{\mathbf{C}} \tilde{\mathbf{A}}^{N_p-N_c} \tilde{\mathbf{B}} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

### Definición de la función de coste objetivo

Como se comenta anteriormente, el MPC necesita de una función de coste que optimizar para calcular el valor óptimo de la acción de control. De esta manera, para garantizar que el vehículo autónomo sea capaz de seguir una trayectoria de referencia con precisión y de forma estable, es necesario optimizar el error existente entre la referencia y la posición del vehículo estimada y la acción de control. Se lleva a cabo la optimización del error a lo largo del horizonte de predicción  $N_p$  y la de la acción de control a lo largo del horizonte de control  $N_c$ . Además, es necesario restringir el incremento en la acción de control en cada periodo de muestreo, evitando variaciones bruscas y oscilaciones. Por consiguiente, refiriéndose al método de restricciones suaves utilizado en la literatura [18], la forma seleccionada de la función objetivo es la siguiente:

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \|\tilde{\mathbf{y}}(k+i|k) - \mathbf{y}_{\text{ref}}(k+i|k)\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta \tilde{\mathbf{u}}(k+i|k)\|_R^2 + \rho \epsilon^2 \quad (39)$$

En la fórmula,  $\rho$  es el coeficiente de ponderación del factor de relajación de las restricciones  $\epsilon$ .  $Q$  y  $R$  son las matrices de pesos de la salida y de la variable de control, respectivamente. El primer término de la ecuación representa la acumulación del error existente entre la salida del sistema y la referencia de dicha salida. Es decir, captura la desviación entre ambas variables reflejando la capacidad de seguimiento de la trayectoria objetivo. El segundo término hace referencia a la acumulación de desviaciones de la variable de control. Refleja el requisito de cambio uniforme en dicha variable.

El tercer término garantiza que haya una solución óptima factible al realizar cambios en tiempo real.  $\tilde{y}(k+i|k)$  es el valor predicho de la salida para el tiempo discreto  $k$  en el tiempo futuro  $k+i$ .  $y_{\text{ref}}(k+i|k)$  es el valor de referencia de la salida para el tiempo discreto  $k$  en el tiempo futuro  $k+i$ .  $\Delta u(k+i|k)$  es la secuencia del futuro de la variable de control.

Las matrices de pesos  $Q$  y  $R$  se calculan del siguiente modo:

$$Q = \begin{pmatrix} q & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & q & 0 & \vdots \\ 0 & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q \end{pmatrix}_{(3 \times N_p) \times (3 \times N_p)}, q = \begin{pmatrix} q_x & 0 & 0 \\ 0 & q_y & 0 \\ 0 & 0 & q_\varphi \end{pmatrix}_{(3 \times 3)}$$

$$R = \begin{pmatrix} r & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & r & 0 & \vdots \\ 0 & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r \end{pmatrix}_{(N_c) \times (N_c)}$$

Realizando las operaciones necesarias para transformar el problema de optimización genérico definido por la función de coste  $J$  de la ecuación (39) en su representación matricial[18], se obtiene la formulación típica de un problema de optimización cuadrática QP:

$$J = \frac{1}{2} \Psi(k)^T H(k) \Psi(k) + f(k)^T \Psi(k) + P(k) \quad (40)$$

La matriz  $H(k)$  es la matriz hessiana,  $f(k)$  es el vector del gradiente lineal,  $\Psi(k)$  es el vector de variables de decisión y  $P(k)$  es el vector de términos independientes. El cálculo de estas matrices puede verse a continuación:

$$H(k) = \begin{pmatrix} 2(\tilde{B}(k)^T Q \tilde{B}(k) + R) & 0 \\ 0 & 2p \end{pmatrix}, \Psi(k) = \begin{pmatrix} \Delta u \\ \epsilon \end{pmatrix}, f(k) = (2E(k)^T Q \tilde{B}(k) \quad 0),$$

$$P(k) = E(k)^T Q E(k), E(k) = \tilde{A}(k) \tilde{x}(k|k) - y_{\text{ref}}(k|k)$$

### Restricciones del problema de optimización

En algoritmos de control de tipo predictivo, es necesario imponer ciertas restricciones que deben cumplirse durante la resolución del problema de optimización definido por la ecuación (40). Generalmente, se definen restricciones en la propia variable de control y en su incremento y en las salidas. En escenarios reales de conducción, el ángulo de dirección tiene un rango limitado de giro, por lo que se debe tener en cuenta dicha limitación a la hora de diseñar el controlador. Al mismo tiempo, para tener en cuenta la estabilidad del vehículo al realizar el seguimiento de la trayectoria, también se debe limitar el incremento de la variable de control. Además, para evitar desviaciones excesivas del camino de referencia, se debe limitar también el valor máximo y mínimo de la posición longitudinal, lateral y del ángulo de guiñada.

Parámetros	Valor (unidades)
Masa del vehículo	$m = 1.723 \text{ kg}$
Inercia rotacional del vehículo	$I_z = 4.175 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Distancia entre ejes	$L = 2,8 \text{ m}$
Distancia desde el centro de gravedad al eje delantero	$l_f = 1,232 \text{ m}$
Distancia desde el centro de gravedad al eje trasero	$l_r = 1,468 \text{ m}$
Coefficiente de rigidez lateral del neumático delantero	$C_{\alpha f} = 48.400 \text{ N/rad}$
Coefficiente de rigidez lateral del neumático trasero	$C_{\alpha r} = 44.800 \text{ N/rad}$
Coefficiente de rigidez longitudinal neumático delantero	$C_{lf} = 90.800 \text{ N/rad}$
Coefficiente de rigidez longitudinal neumático trasero	$C_{lr} = 76.000 \text{ N/rad}$

Tabla 1. Parámetros del vehículo

Dicho lo cual, las restricciones impuestas al valor máximo y mínimo de la acción de control:

$$U_{\min}(k) \leq U(k) \leq U_{\max}(k) \quad (41)$$

$U_{\min}(k)$  es el valor mínimo de la variable de control y  $U_{\max}(k)$  es el valor máximo. Se imponen también restricciones al incremento de la variable de control:

$$\Delta U_{\min}(k) \leq \Delta U(k) \leq \Delta U_{\max}(k) \quad (42)$$

$\Delta U_{\min}(k)$  es el valor mínimo del incremento de control y  $\Delta U_{\max}(k)$  es el valor máximo del incremento. E imponiendo restricciones a las salidas:

$$\tilde{y}_{\min}(k) \leq \tilde{y}(k) \leq \tilde{y}_{\max}(k) \quad (43)$$

$\tilde{y}_{\min}(k)$  es el valor mínimo de la salida e  $\tilde{y}_{\max}(k)$  es el valor máximo de esta.

### SIMULACIÓN

Para validar el rendimiento del controlador MPC no lineal propuesto, se realizan diversos escenarios de simulación en el entorno de Matlab/Simulink. Estos escenarios incluyen maniobras típicas como el doble cambio de carril y el camino sinusoidal. Además, las pruebas se llevan a cabo tanto a velocidad constante como a velocidad variable, lo que permite analizar el efecto de la aceleración longitudinal en el control. Por último, se plantea un escenario que considera un trazado complejo, compuesto por segmentos rectos y curvos, ejecutado a velocidad constante.

### Parámetros de la simulación

Los parámetros mecánicos del vehículo empleado para realizar las diferentes simulaciones se recogen en la tabla 1.

En línea con [18], las restricciones que se imponen a la variable de control y a la variación de esta son:

$$\begin{aligned} -30^\circ &\leq \delta_f \leq 30^\circ \\ -5^\circ &\leq \Delta \delta_f \leq 5^\circ \end{aligned} \quad (44)$$

### Escenario 1: simulación a velocidad constante baja y coeficiente de adherencia elevado

Se propone estudiar la precisión del controlador ante un escenario de velocidad del vehículo constante y la maniobra de referencia es el doble cambio de carril. Esta maniobra se usa ampliamente en ensayos en los que se mide la estabilidad y la maniobrabilidad del vehículo.

El controlador propuesto se basa en el modelo no lineal de neumático de Dugoff, el cual, partiendo de un coeficiente rigidez de referencia,  $C_{\alpha f}$ ,  $C_{lf}$  para el neumático delantero y  $C_{\alpha r}$ ,  $C_{lr}$  para el neumático trasero, obtiene un nuevo coeficiente de rigidez  $C_{\alpha ij}^{non}$  no lineal que tiene en cuenta rangos de trabajo del neumático en los que se pierde la proporcionalidad entre la fuerza y el ángulo de deslizamiento. Para reflejar el rendimiento de este primer controlador no lineal NMPC, se compara con un controlador MPC convencional. Este no considera la región no lineal del neumático y está diseñado bajo la simplificación de coeficiente de rigidez lateral y longitudinal constante. En la tabla 2 se recogen los



parámetros del controlador para este escenario de simulación:

En la figura 5 puede observarse la efectividad que tienen ambos controladores para seguir la referencia de posición lateral. Bajo unas condiciones de adherencia elevada  $\mu=0,9$  y velocidad baja  $v=36$  km/h, ambos controladores muestran una gran exactitud a la hora de seguir la trayectoria. Pero, al fijarse en el detalle de la zona remarcada, puede verse que el controlador NMPC muestra mayor precisión y consigue que la trayectoria que describe el vehículo controlado esté más próxima a la de la referencia. Esta diferencia de rendimiento entre ambos controladores se acentúa en las zonas en las que la curvatura es mayor, hasta alcanzar ángulos de deslizamiento más elevados y acercándose a la zona de trabajo no lineal del neumático. Aunque en dichas condiciones de trabajo se puede suponer que las fuerzas sobre los neumáticos son constantes, el controlador NMPC puede describir con mayor rigor las fuerzas sobre los neumáticos que el controlador lineal MPC. Muestra, por consiguiente, mayor capacidad de seguimiento de la referencia.

En la figura 5a, se representa el ángulo de guiñada de referencia que debe seguir el vehículo para poder seguir la trayectoria con la mayor precisión y estabilidad. Se observa que el ángulo que describe el vehículo controlado por el NMPC está más próximo al ángulo objetivo en prácticamente todo el trazado. Resalta esta discrepancia en las zonas en las que la curvatura es mayor y se alcanzan mayores ángulos de deslizamiento. En la figura 5b-d se describen el ángulo de la dirección, el de deslizamiento del vehículo y el de deslizamiento del neumático delantero del controlador NMPC y del controlador MPC, que son parecidos, ya que la magnitud y la forma que describen es parecida. Aunque justamente las pequeñas fluctuaciones existentes entre ambos controladores se dan en el rango de 6-8 segundos, cuando se ejecuta la última curva de la maniobra. Una vez superada dicha zona, se observa que las oscilaciones se van atenuando con el tiempo, y son mayores las del MPC, lo que también demuestra una peor capacidad de corregir el error en el régimen permanente. En definitiva, el rendimiento de ambos controladores es muy parecido, ya que ambos pueden

Parámetros del controlador	Valor (unidades)	Parámetros del ensayo	Valor (unidades)
Periodo de muestreo	$T_s = 0,01$ s	Velocidad del vehículo	$v = 36$ km/h
Horizonte de predicción	$N_p = 10$	Coefficiente de adherencia	$\mu = 0,8$
Horizonte de control	$N_c = 3$		
Coefficiente de ponderación posición longitudinal	$q_x = 5$		
Coefficiente de ponderación posición lateral	$q_y = 5$		
Coefficiente de ponderación ángulo guiñada	$q_\phi = 16$		
Coefficiente de ponderación de la variable de control	$r = 1$		

Tabla 2. Parámetros del controlador y características del escenario 1

seguir la trayectoria con precisión y fluidez, aunque queda demostrado que en zonas en las que se alcanzan mayores aceleraciones laterales y mayores ángulos de deslizamiento, el controla-

dor NMPC se ajusta mejor, debido a su capacidad de modelizar con mayor precisión el comportamiento del neumático.

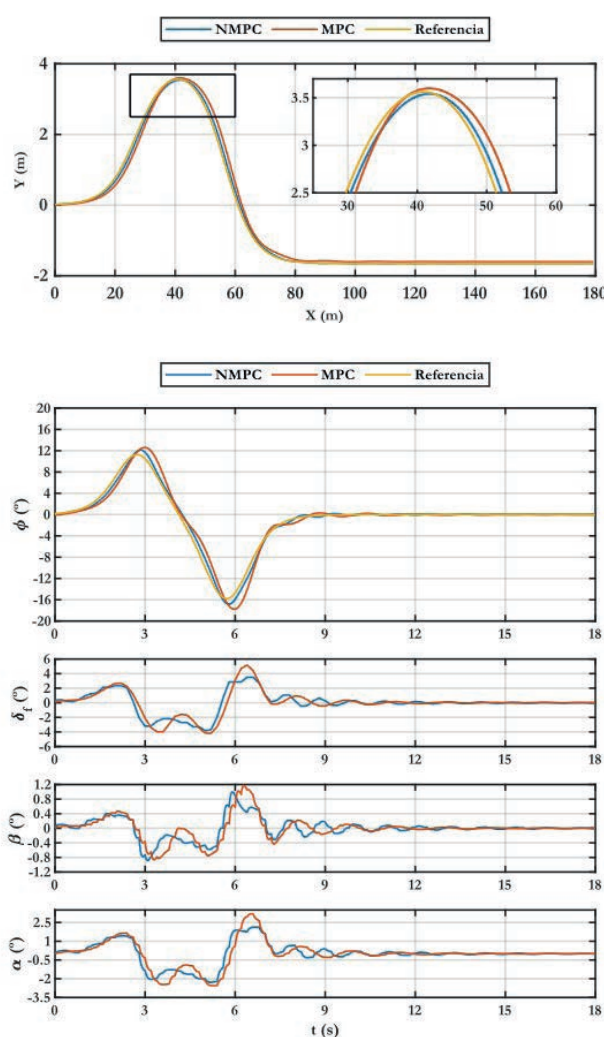


Figura 5. Comparación del seguimiento como referencia lateral.

- Comparación del ángulo de guiñada del vehículo;
- Comparación del ángulo de dirección delantero;
- Comparación del ángulo de deslizamiento, y
- Comparación del ángulo de deslizamiento del neumático.

**Escenario 2: simulación a velocidad constante elevada y coeficiente de adherencia alto**

En el escenario 1 se ha demostrado que, ante unas condiciones de favorables, ambos controladores exhiben una elevada precisión a la hora de realizar el seguimiento del camino de referencia. Es ligeramente superior el NMPC. En el presente escenario, se eleva la velocidad a  $v=20$  m/s y se mantiene el coeficiente de adherencia a  $\mu=0,9$ . La maniobra que se ejecuta sigue siendo el cambio de carril. Los controladores que se comparan siguen siendo los mismos, un NMPC basado en el modelo de Dugoff de neumático y un MPC clásico lineal. Se debe implementar unos cambios en los parámetros del controlador. En la tabla 3 se recogen los parámetros de los controladores y del ensayo:

Al haberse incrementado la velocidad longitudinal al doble que en el escenario 1, la capacidad global de seguir la referencia de ambos controladores disminuye. En la figura 6 se observa que ninguno de los controladores puede seguir la referencia lateral con suficiente exactitud, y es el NMPC el que muestra mayor precisión. Esto puede verse en el tramo entre 25 y 60 metros, en el que la trayectoria del controlador NMPC se encuentra más próxima a la maniobra objetivo que el MPC. También el controlador no lineal puede corregir el error en régimen permanente. Se observa en el tramo de los 100 metros hasta el final del recorrido, donde el NMPC corrige perfectamente la trayectoria y el MPC no puede hacerlo completamente.

Por otro lado, en la figura 6a se puede visualizar la capacidad de seguimiento de la referencia del ángulo de guiñada de los controladores. En este caso, las discrepancias entre ambos son menores, y es el controlador no lineal NMPC el que se queda más próximo. Pero, a diferencia de lo ocurrido en el seguimiento de la referencia lateral, los dos controladores sí pueden corregir el error del régimen permanente. Esto puede verse a partir de los 4,5 segundos de simulación, cuando se amortiguan las oscilaciones y se demuestra que el sistema tiene una respuesta estable. En la figura 6b-d, se observa la evolución de los ángulos de dirección, deslizamiento de vehículos y del neumático, respectivamente. Ambos

Parámetros del controlador	Valor (unidades)	Parámetros del ensayo	Valor (unidades)
Periodo de muestreo	$T_s = 0,01$ s	Velocidad del vehículo	$v = 72$ km/h
Horizonte de predicción	$N_p = 20$	Coeficiente de adherencia	$\mu = 0,9$
Horizonte de control	$N_c = 3$		
Coeficiente de ponderación en posición longitudinal	$q_x = 1$		
Coeficiente de ponderación en posición lateral	$q_y = 15$		
Coeficiente de ponderación del ángulo guiñada	$q_\varphi = 30$		
Coeficiente de ponderación de la variable de control	$r = 2,5$		

Tabla 3. Parámetros del controlador y características del escenario 2

describen curvas muy similares. La mayor diferencia entre dichas curvas se observa en el primer segundo de la simulación, coincidiendo con el inicio de la maniobra del cambio de carril y cuando la aceleración lateral del vehículo se ve incrementada. Este efecto se traduce en un aumento del ángulo de deslizamiento lateral del neumático, y se alcanzan valores que se quedan

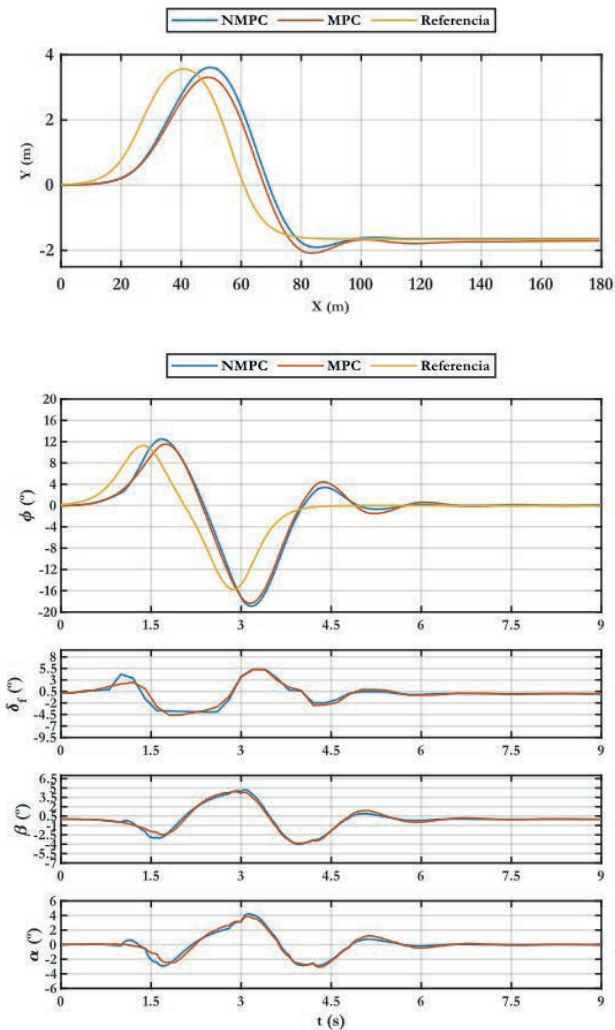


Figura 6. Comparación del seguimiento lateral de la referencia.  
a) Comparación del ángulo de guiñada del vehículo;  
b) Comparación del ángulo de dirección delantero;  
c) Comparación del ángulo de deslizamiento, y  
d) Comparación del ángulo de deslizamiento del neumático.

fuera de la zona lineal de trabajo de este, lo que justifica el mejor rendimiento del controlador NMPC frente al MPC.

## CONCLUSIONES

En este artículo se diseña un algoritmo de control predictivo basado en el modelo no lineal del neumático. Este permite reducir el error de cálculo de las fuerzas de los neumáticos del vehículo ante condiciones adversas, como zonas con muy baja adherencia, elevadas velocidades, etc., y se evita el deterioro en la capacidad de seguimiento de maniobras bajo dichas condiciones. En el controlador no lineal propuesto, las fuerzas se caracterizan mediante funciones no lineales basadas en el modelo de Dugoff, en vez de hacer uso de la aproximación del comportamiento lineal del neumático, el cual, según se comenta previamente, presenta ciertas limitaciones en su aplicación. Durante el proceso de diseño del controlador, se hace uso de la expansión en series de Taylor ampliamente usada en el proceso de linealización de sistemas complejos. Esto es determinante para la construcción de las matrices características que permiten la resolución del problema de optimización. Posteriormente, se lleva a cabo un proceso de discretización del sistema mediante el método de Euler. Para poder validar el potencial del controlador propuesto, se llevan a cabo una serie de simulaciones bajo distintas condiciones y se compara con el controlador lineal clásico MPC. El primer escenario consiste en realizar la maniobra de cambio de carril a una velocidad baja y un coeficiente de adherencia alto. Ambos controladores muestran una gran precisión a la hora de realizar el seguimiento de la trayectoria, y el controlador no lineal es ligeramente superior. En el segundo escenario se duplica la velocidad y se mantiene la trayectoria y la adherencia. Aquí ambos controladores pierden rendimiento; muestra mayor estabilidad y precisión el controlador no lineal NMPC. Como trabajo futuro, se propone ampliar la cantidad de ensayos que realizar, variando las condiciones de trabajo. Esto incluye escenarios que simulen conducción en superficies con bajo coeficiente de adherencia, velocidad variable, etc., además de probar otras maniobras típicas de ensayos como el camino senoidal o de serpiente o un camino aleatorio que incluya trazados con diferentes curvaturas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Chen L, Bian M, Luo Y, Li K. (2013). Maximum tire road friction estimation based on modified Dugoff tire model. In Proceedings of the 2013 International Conference on Mechanical and Automation Engineering (p. 56-61). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MAEE.2013.24>
- Cheng S, Li L, Chen X, Wu J, Wang HD. (2021). Model-predictive-control-based path tracking controller of autonomous vehicle considering parametric uncertainties and velocity-varying. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 68(9), p. 8698-707. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3009585>.
- Falcone P, Borrelli F, Asgari J, Tseng HE, Hrovat D. (2007). Predictive active steering control for autonomous vehicle systems. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 15(3), 566-80. <https://doi.org/10.1109/TCST.2007.894653>.
- Falcone P, Tseng HE, Borrelli F, Asgari J, Hrovat D. (2008). MPC-based yaw and lateral stabilisation via active front steering and braking. Vehicle System Dynamics, 46(6), 611-28. <https://doi.org/10.1080/00423110802018297>.
- Frendi S, Mellah R, Seddiki L, Akdag H. (2016). Tracking controller design of a sideslip angle and yaw rate for electrical vehicle bicycle model. IFAC-PapersOnLine, 49(11), 169-74. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.108>.
- Gao Y, Wang X, Huang J, Yuan L. (2024). Adaptive model predictive control for intelligent vehicle trajectory tracking considering road curvature. International Journal of Automotive Technology, 25(5), 1051-64. <https://doi.org/10.1007/s12239-024-00086-8>.
- Häne C, Sattler T, Pollefeys M (s.f.). Obstacle detection for self-driving cars using only monocular cameras and wheel odometry.
- Huang G, Ma Q. (2022). Research on path planning algorithm of autonomous vehicles based on improved RRT algorithm. International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, 20(1), 170-80. <https://doi.org/10.1007/s13177-021-00281-2>.
- Lee K, Jeon S, Kim H, Kum D. (2019). Optimal path tracking control of autonomous vehicle: Adaptive full-state linear quadratic Gaussian (LQG) control. IEEE Access, 7, 109120-33. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933895>.
- Li Q, Zheng N, Cheng H. (2004). Springrobot: A prototype autonomous vehicle and its algorithms for lane detection. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 5(4), 300-8. <https://doi.org/10.1109/TITS.2004.838220>.
- Lin F, Sun M, Wu J, Qian C. (2021). Path tracking control of autonomous vehicle based on nonlinear tire model. Actuators, 10(9), 241. <https://doi.org/10.3390/act10090242>.
- Naranjo JE, González C, García R, De Pedro T. (2008). Lane-change fuzzy control in autonomous vehicles for the overtaking maneuver. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 9(3), 438-50. <https://doi.org/10.1109/TITS.2008.922880>.
- Taghavifar H, Rakheja S. (2019). Path-tracking of autonomous vehicles using a novel adaptive robust exponential-like-sliding-mode fuzzy type-2 neural network controller. Mechanical Systems and Signal Processing, 130, 41-55. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.04.060>.
- Tchamna R, Youn I. (2013). Yaw rate and side-slip control considering vehicle longitudinal dynamics. International Journal of Automotive Technology, 14(1), 53-60. <https://doi.org/10.1007/s12239-013-0007-1>.
- Urmson C. Self-Driving Cars in the Urban Challenge.
- Yu S, Hirche M, Huang Y, Chen H, Allgöwer F. (2021). Model predictive control for autonomous ground vehicles: A review. Autonomous Intelligent Systems, 1(1), 1-24. <https://doi.org/10.1007/s43684-021-00005-z>.
- Yuan CC, Wei Y, Wang T, et al. (2020). Research on path planning based on new fusion algorithm for autonomous vehicle. Advances in Mechanical Engineering. <https://doi.org/10.1177/1729881420911235>.
- Zaarane A, Slimani I, Al Okaishi W, Atouf I, Hamdoun A. (2020). Distance measurement system for autonomous vehicles using stereo camera. Array, 5, 100016. <https://doi.org/10.1016/j.array.2020.100016>.



*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](http://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 indización 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 reproducirse 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 Viloria 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](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 [cogiti@cogiti.es](mailto:cogiti@cogiti.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.

# Validación de resultados de ensayo con dispositivo de caracterización de superficie

## Validation of test results with surface characterization device

I. Sánchez<sup>1</sup>, J. Velasco<sup>1</sup>, J. A. Cabrera<sup>1</sup>, J. J. Castillo<sup>1</sup>, M. Sánchez<sup>2</sup>

### Resumen

La adherencia y la rugosidad son dos parámetros fundamentales en la ingeniería de vehículos y la seguridad vial, ya que influyen directamente en el comportamiento de los neumáticos sobre las superficies de rodadura, por lo que afectan a la maniobrabilidad y a la estabilidad de los vehículos. Con el fin de avanzar en la investigación y el desarrollo de tecnologías más eficaces para la mejora de la dinámica vehicular, se ha diseñado y se ha fabricado un sistema para la medición de la adherencia y rugosidad de superficies, el cual está orientado a emplearse como herramienta de referencia para la caracterización de superficie y optimización de los sistemas de control del automóvil.

El sistema diseñado combina métodos de medición para evaluar la capacidad de adherencia y la rugosidad superficial de manera simultánea. Este enfoque permite obtener resultados más precisos y rápidos en comparación con los métodos tradicionales, y proporciona una visión integral del estado de la superficie. La aplicación futura de este sistema no solo se prevé en el ámbito de la caracterización de superficies, sino también en el desarrollo de sistemas de control de vehículos, optimizando los sistemas de frenos, tracción y estabilidad, especialmente en condiciones de baja adherencia.

En este trabajo se muestran los resultados de ensayo realizados para validar la precisión y la fiabilidad del sistema en comparación con los métodos tradicionales de referencia, como son el péndulo británico y el método volumétrico. Para ello, se han realizado una serie de pruebas en diferentes tipos de superficies, y se ha evaluado su rendimiento bajo condiciones controladas. Los resultados obtenidos indican que el nuevo sistema ofrece mayor consistencia y repetibilidad en las mediciones de adherencia, así como mejor correlación con la rugosidad superficial. Gracias a todo esto, se espera lograr una caracterización de superficie más precisa y fiable.

### Palabras clave

Adherencia, rugosidad, superficies, péndulo británico, clasificación, estimación y dinámica vehicular.

### Abstract

Adhesion and roughness are two fundamental parameters in vehicle engineering and road safety, as they directly influence tire behaviour on road surfaces, affecting vehicle manoeuvrability and stability. To advance research and the development of more effective technologies for vehicle dynamics, a system has been designed and manufactured to measure surface adhesion and roughness, serving as a reference tool for surface characterization and optimization of automotive control systems.

The system integrates measurement methods to simultaneously evaluate both adhesion and surface roughness, enabling faster and more accurate results than traditional methods and providing a comprehensive view of surface conditions. Its application extends beyond surface characterization to the development of vehicle control systems, optimizing braking, traction, and stability, particularly under low-adhesion conditions.

This paper presents the results of tests conducted to validate the accuracy and reliability of the system in comparison with traditional reference methods, such as the British pendulum and the volumetric method. Experiments were performed on different surface types under controlled conditions. The results indicate that the system provides more consistent and repeatable adhesion measurements, with improved correlation to surface roughness, enabling more accurate and reliable surface characterization.

### Keywords

Adherence, roughness, surfaces, British pendulum, classification, estimation, vehicle, and dynamics.

Recibido/received: 03/07/2025. Aceptado/accepted: 10/10/2025.

1Dpto. de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos. Universidad de Málaga.  
2Dpto. de Ingeniería Mecánica y Energía. Universidad Miguel Hernández de Elche.

Autor para correspondencia: nsanchez@uma.es; msanchez@umh.es



Imagen cedida por los autores del artículo.

## 1. INTRODUCCIÓN

La estimación precisa de la adherencia entre el neumático y la superficie de la carretera desempeña un papel fundamental en la seguridad y el rendimiento de los vehículos. Al hablar de adherencia, se hace referencia a la capacidad de los neumáticos para transmitir a la superficie las fuerzas de tracción, frenado y estabilidad lateral necesarias para un correcto control, especialmente en situaciones adversas como puede ser con lluvia, nieve y superficies resbaladizas. Por el contrario, una situación con mala adherencia puede dar lugar a elevados deslizamientos, pérdida de control del vehículo y situaciones de peligro para los conductores como y otros usuarios de la vía. En este contexto, la correcta medición o estimación de la adherencia se vuelve aún más relevante para la mejora de los algoritmos de control.

Fabricantes de automóviles e investigadores se esfuerzan por mejorar día a día la capacidad de los sistemas de control y responder de manera óptima a las condiciones cambiantes de la carretera (Daghan & Pinar, 2019; Castillo *et al.*, 2015), trabajando con potentes simulaciones que emplean un amplio abanico de modelos de neumáticos. Entre los principales enfoques se encuentran los modelos numéricos y de simulación, que utilizan herramientas como el método de elementos finitos para analizar el contacto neumático-superficie en distintas condiciones. También destacan los modelos analíticos, que representan matemáticamente la adherencia en función de variables como la presión de contacto, la deformación del neumático y

la textura del pavimento. Finalmente, se presentan los modelos empíricos basados en la recopilación de grandes volúmenes de datos experimentales obtenidos mediante dispositivos de medición, con el fin de describir o modelar el comportamiento del neumático (Magic Formula, Pacejka).

Recorriendo la bibliografía actual, se observa una amplia variedad de algoritmos propuestos con el objetivo de estimar la superficie o el nivel de adherencia que esta presenta. Trabajos como el de Masino *et al.* (2017) abordan la clasificación de superficies mediante el análisis acústico de la rodadura del neumático. Por otro lado, Jin *et al.* (2020) emplean un enfoque basado en el análisis de imágenes para la estimación del coeficiente de rodadura de la superficie. Asimismo, Wang *et al.* (2017) y Mei *et al.* (2019) tratan el problema de la clasificación de superficies mediante el análisis de la aceleración experimentada por el neumático al rodar sobre distintas superficies. En el estudio de Weiwen y Qingrong (2009) se utilizan sensores propios del vehículo para realizar análisis de patrones que permiten inferir la superficie sobre la que se circula. Finalmente, trabajos como los de Park *et al.* (2018) y Šabanović *et al.* (2020) hacen uso de algoritmos basados en machine learning y deep learning para analizar la información aportada por los sensores del vehículo, con el objetivo de estimar parámetros que permitan clasificar la superficie, determinar la adherencia o evaluar distintos parámetros dinámicos, entre otros.

Por otro lado, también es importante para los ingenieros de infraestructuras y

las autoridades viales evaluar la calidad de las carreteras existentes y optimizar los métodos de construcción y los materiales utilizados para garantizar un agarre óptimo (Pérez-Acebo *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2020). Los datos de adherencia son fundamentales para el diseño de carreteras más seguras y la implementación de medidas de mantenimiento adecuadas, además de para poder informar a los usuarios sobre las condiciones de la vía.

A partir de esto se hace crucial disponer de datos de ensayo de superficie precisos. Diversos tipos de ensayos miden la adherencia y la rugosidad de la superficie (Chen *et al.*, 2022; Zúñiga-García *et al.*, 2017; Mahboob Kanafi *et al.*, 2015; Wambold & Antle, 1995; Torbruegge & Wies, 2015). Se dividen principalmente en dos categorías: ensayos estáticos, aquellos que realizan mediciones esporádicas en una superficie fija y ensayos dinámicos, que registran datos en movimiento mediante vehículos sensorizados.

Entre las herramientas para realizar ensayos estáticos, destaca el péndulo británico, un dispositivo portátil ampliamente tratado en la bibliografía (Chu *et al.*, 2022; Guo *et al.*, 2021) y utilizado en normativas nacionales e internacionales (AENOR, 2012), como es el caso de España. Su popularidad radica en su facilidad de uso, portabilidad y capacidad de medir la adherencia tanto en seco como en mojado. No obstante, presenta limitaciones, como la falta de representación de condiciones de fricción real, su dependencia ante la manipulación del operador y la necesidad de correlacionar sus resultados con coeficientes





Figura 1. Ensayo de una superficie de asfalto mojado con péndulo británico.

de fricción reales, dado que no aporta una medida directa del coeficiente de fricción entendido como la relación entre la carga vertical y horizontal sufrida por el medidor (Fig. 1).

Por su parte, los ensayos dinámicos incluyen dispositivos montados en vehículos que simulan condiciones de conducción reales. Estos se pueden dividir en función del modo de operación sobre el neumático sensorizado. Ejemplos de estos sistemas son: dispositivos con rueda bloqueada (CHIRP, Estados Unidos), sistemas que imponen ángulo de giro del neumático sensorizado (SCRIM, Reino Unido) y, por otra parte, equipos con rueda parcialmente bloqueada de deslizamiento fijo (Grip Tester, Reino Unido) o deslizamiento variable (Norsemeter, Noruega) (Mataei *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2021).

Entre los equipos de medición disponibles, GripTester destaca como uno de los más utilizados (Fig. 2). Se trata de un remolque acoplado a un vehículo de prueba, dotado de un sistema de sensores que registran fuerza, velocidad y posición durante el avance. Con estos datos es posible evaluar en tiempo real la adherencia de amplias secciones de la superficie. Su principio de funcionamiento consiste en introducir una ligera diferencia de velocidad entre la rueda instrumentada y las demás ruedas del remolque, para generar así un deslizamiento controlado que permite calcular la fricción.

En un nivel de escala mayor, se pueden encontrar auténticos laboratorios rodantes (Fig. 3) en los que se dispone de la maquinaria necesaria para someter a un neumático de ensayo a las condiciones deseadas y obtener la información más realista posible del contacto neumático-carretera. Sin embargo, el desarrollo y el empleo de estos dispositivos está limitado a grandes corporaciones que cuentan con los recursos materiales y humanos suficientes para hacerlo. Este hecho hace poco viable optar por una solución de este calado.

Finalmente, como muestra la figura 4, desde una perspectiva industrial orientada a la producción y a los ensayos en serie, hay diversas máquinas diseñadas específicamente para reproducir distintas condiciones de funcionamiento del neu-



Figura 2. Dispositivo de ensayo de adherencia GripTester.

mático. Estos equipos permiten analizar su comportamiento de manera controlada sin necesidad de desplazarse fuera del laboratorio.

Otro aspecto clave en la caracterización de la superficie es la rugosidad, parámetro que no puede ser evaluado por la mayoría de los dispositivos descritos. La dimensión de la textura superficial con mayor impacto sobre la adherencia corresponde a la macrotextura (0,5-50 mm), directamente determinada por el tamaño de grano. Esta característica incide, además, de forma significativa en la capacidad de evacuación de agua en la zona de contacto del neumático con el pavimento.

Por otra parte, en el ámbito nacional, el ensayo de rugosidad establecido más empleado es la técnica de parche volumétrico (AENOR, 2010; AENOR, 2021; Ruiz & González, 2013). Esta metodología se basa en técnicas rudimentarias y simples. Así, en este caso, se aplica un volumen cono-



A) Vehículo para prueba de neumáticos Michelin PLR.



B) Vehículo de inspección de carreteras Scrim.



C) Vehículo de ensayos de neumáticos eléctrico Continental.

Figura 3. Vehículos de investigación de neumáticos.



A) Máquina de ensayo de neumáticos con rodillo UMH (Cuadrado & Sánchez, 2018).



B) Máquina de ensayos de neumáticos de tipología Flat-Trac UMA (Cabrera et al., 2003).



C) Máquina desplazable sobre pista de asfalto Dufournier.

Figura 4. Maquinaria para ensayo de neumáticos.

cido de material de ensayo sobre la superficie y se extiende suavemente hasta que el material queda incrustado en la macrotextura superficial. De esta manera, se mide el diámetro del parche formado y, empleando la ecuación del volumen de un cilindro, se deduce la altura media de grano en todo el parche (Fig. 5).

En la actualidad, gracias al avance de la técnica y la tecnología, surgen nuevos dispositivos basados en tecnología láser que pueden realizar un perfil de superficie muy preciso (Fig. 6). Este tipo de aparatos emplea un cabezal láser que se desplaza grabando la profundidad de la textura de la superficie durante su recorrido con resoluciones de micras ( $\mu\text{m}$ ) y procesan todo el perfil digitalmente.

Este trabajo presenta un dispositivo innovador diseñado para medir de forma directa y automática la adherencia y la rugosidad de las superficies y que supera las limitaciones de los métodos tradicionales. El equipo, denominado AFRmeter (Automatic Friction and Roughness meter), se caracteriza por ser económico, fácil de utilizar y por requerir una mínima intervención del operador, lo que incrementa la repetibilidad y la confiabilidad de los resultados.

Asimismo, se exponen los primeros resultados obtenidos con este nuevo dispositivo y se comparan con los registrados mediante el uso del péndulo británico y el método volumétrico. Las pruebas iniciales realizadas sobre distintas superficies indican que el AFRmeter proporciona mediciones consistentes y adecuadas, y se posiciona como una herramienta prometedora para investigaciones en seguridad vial y caracterización de pavimentos. Sus mediciones precisas ofrecen una base sólida para la validación de superficies y la calibración de algoritmos de control en dinámica vehicular.

Este artículo se estructura de la siguiente manera: primero, se presenta el diseño y desarrollo del prototipo pro-

puesto. A continuación, se examinan los dispositivos tradicionales utilizados como referencia para la validación comparativa, mientras que la siguiente sección describe las superficies seleccionadas como objeto de estudio. A continuación se detallan los experimentos realizados y los resultados obtenidos, seguidos por una discusión crítica de estos hallazgos. La siguiente sección resume las principales conclusiones del trabajo. Finalmente, el último apartado aborda las posibles aplicaciones del dispositivo y propone líneas de investigación y desarrollo futuras.

## 2. DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO

Los métodos tradicionales, aunque estandarizados, presentan limitaciones en precisión debido a la influencia del operador y a la naturaleza indirecta de sus mediciones, lo que dificulta la correlación de resultados. El dispositivo de ensayo de adherencia y rugosidad propuesto en este trabajo se desarrolla como una solución técnica para obtener mediciones objetivas y cuantitativas de las propiedades superficiales.

Su aplicación proporciona a los ingenieros de dinámica vehicular una referencia precisa para la calibración de algoritmos de control y, en ingeniería civil, mejora la fiabilidad en la toma de decisiones sobre mantenimiento y la optimización de vías.

### 2.1 Requisitos de diseño

El proceso de desarrollo del prototipo se llevó a cabo mediante la recopilación exhaustiva de información relacionada con las necesidades y desafíos existentes en este campo de aplicación. Se realizaron estudios de mercado, análisis de tecnologías disponibles y consultas con expertos en el área para comprender a fondo sus demandas y expectativas. Este esfuerzo tiene como objetivo garantizar que los ensayos se realicen en las mismas condiciones en todo momento y que puedan ser reproducibles por otro equipo en el futuro.

Los principales requisitos de diseño son:

- Medición directa del coeficiente de adherencia.
- Medición directa de la rugosidad de superficie.
- Disponer de la automatización necesaria para realizar y grabar el ensayo.
- Capacidad para registrar la temperatura ambiente y de superficie.
- Incluir geolocalización del dispositivo.
- Garantizar la repetibilidad de ensayos a través de la rigurosidad y trazabilidad de las condiciones en las que se realizan las mediciones.
- Dispositivo portátil y manejable.
- Dispositivo económicamente viable.

El prototipo desarrollado se plantea como un conjunto sensorizado montado sobre un marco o guía que permita su desplazamiento sobre la superficie en la que se va a ensayar (Fig. 7).

El dispositivo está equipado con un palpador de caucho montado sobre una célula de carga que permite monitorizar de forma continua las fuerzas vertical y horizontal en el punto de contacto. Gracias a este sistema, no es necesario cumplir condiciones de puesta en marcha tan estrictas como en el ensayo con péndulo. Además de la medición de adherencia, el equipo incorpora un láser para capturar el perfil de rugosidad de la superficie analizada.

### 2.2 Componentes y materiales requeridos

El mecanismo de movimiento elegido para propulsar el carrito se basa en el uso de un husillo con poleas y guías lineales. El carrito descansa sobre un marco de aluminio con dos guías lineales y un sistema de patines; esto permite 900 mm de carrera efectiva de ensayo.

Para este montaje, se ha elegido un motor brushless trifásico de pequeñas dimensiones, concretamente un modelo del tipo C4250 Outrunner. Se trata de un motor síncrono de imanes permanentes (siete pares de polos) que puede aportar una potencia de 1,7 kW y 0,81 Nm de par nominal.

El sistema de gestión de potencia emplea un inversor que convierte la corriente continua de la batería en corriente trifásica para alimentar el motor síncrono. Este inversor aplica un control vectorial que regula el par y el flujo magnético controlando en todo momento la posición del rotor. Para ello, se empleará un controlador de la marca oDrive, que puede realizar control por posición, lo que permitirá ajustar con precisión la posición del carrito y así



Figura 5. Ensayo de rugosidad en asfalto mediante técnica de parche volumétrico.



Figura 6. Ensayo de rugosidad en asfalto mediante dispositivo láser Dufournier.



controlar de forma exacta la velocidad de avance del efector final.

El dispositivo proporciona dos tipos de resultados: por un lado, el coeficiente de fricción dinámico ( $\mu$ ), obtenido cuando ambas superficies presentan movimiento relativo, y, por otro, la rugosidad en forma de perfil de superficie (mm), a partir del cual es posible derivar las métricas más comunes establecidas en la normativa, como la profundidad media del perfil.

El AFRmeter funciona a velocidades comprendidas en un rango de 0 a 300 mm/s. El patín sensorizado, dispuesto sobre una mesa deslizante que le permite ajustar la fuerza sobre la superficie, instala una célula de carga triaxial, modelo T501 marca Right, capaz de soportar hasta 300 N con una resolución de 0,1 N.

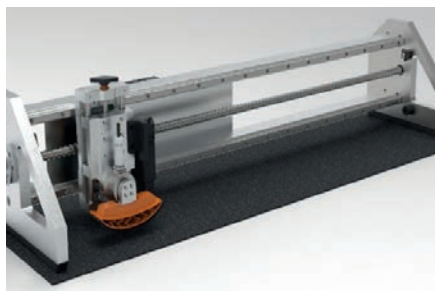
Este montaje permite la medida simultánea de la carga vertical ejercida sobre la superficie y la fuerza longitudinal generada por el desplazamiento del patín (Fig. 8). Ambas fuerzas dan lugar a la definición del coeficiente de adherencia longitudinal ( $\mu$ ):

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} \quad (1)$$

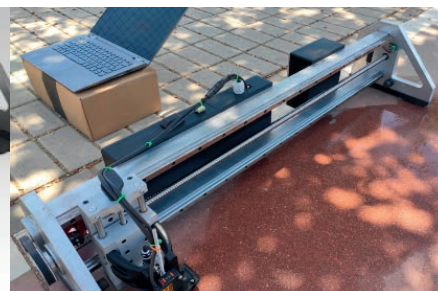
Para la producción del patín se ha optado por un diseño de tipo flexible para dar mayor progresividad al contacto con la calzada, basado en plástico impreso en 3D. Como recubrimiento de contacto sobre el patín, se dispondrá una pieza de caucho 57 o 96 (grado internacional de dureza del caucho [IRHD]).

En paralelo con este sistema, se ubicará un láser de alta precisión para la captura de la rugosidad de superficie. El dispositivo es de la marca OMRON modelo Z4M-S40 y dispone de una distancia de medida de  $40 \pm 10$  mm con una resolución de 20  $\mu$ m. El rango de alcance y de resolución del láser permite analizar una zona de trabajo que abarca la parte final de la macrotextura (de 50 a 0,5 mm) y parte de la microtextura (< 0,5 mm) superficial. No obstante, esta última no se considera objeto de medición, ya que el láser operará a una velocidad de avance de 12,5 mm/s, y las posibles imperfecciones de la superficie podrían afectar la calidad del resultado. El sistema de adquisición junto con el láser establece una resolución en el avance de 0,05 mm, suficientes para captar adecuadamente la macrotextura.

El análisis a escala microscópica se reserva para dispositivos más avanzados, diseñados para realizar mediciones con mayor tiempo de exposición (de horas incluso) y una precisión mayor capaz de captar ese rango de la superficie.

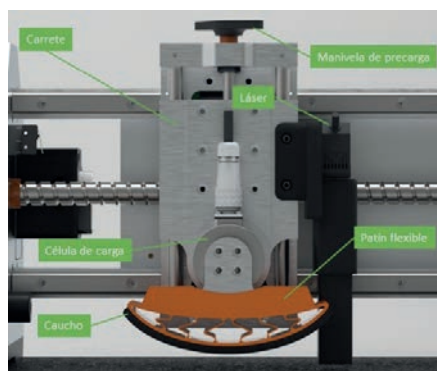


A) Modelo renderizado del prototipo completo.

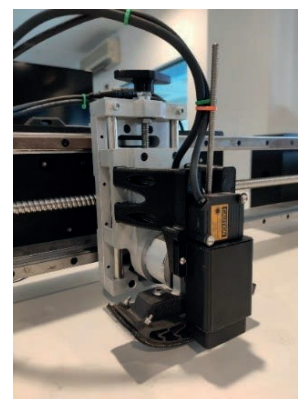


B) Prototipo durante un ensayo de superficie.

Figura 7. Vistas del prototipo.



A) Modelo renderizado del patín.



B) Primer prototipo completado

Figura 8. Vistas del patín deslizante.

En tercer lugar, se instalará un sensor infrarrojo para la medición de la temperatura de superficie. Se ha elegido para este fin un sensor de la marca MELEXIS modelo MLX90614, con el que poder realizar una medición de la temperatura de superficie sin contacto.

Estos tres sensores formarán el conjunto principal de adquisición, cubriendo los objetivos por los cuales se propone el diseño y fabricación de este prototipo. Adicionalmente, se incluirá un sensor para registrar la temperatura y la humedad ambiente. El modelo elegido es el sensor BME280 de la marca BOSCH. En último lugar, se incorporará un sensor GPS al sistema para geoposicionar las ubicaciones ensayadas. Esta información será captada mediante un sensor modelo M6N de la marca uBlox.

Por encima de todo lo descrito y de la electrónica auxiliar, se dispondrá de un ordenador en tiempo real que irá embarcado sobre la bancada. Se trata de un dispositivo MyRIO de la marca National Instruments, el cual se encargará de gestionar la entrega de potencia y el movimiento del efector y, por otro lado, de cubrir la adquisición de todas las señales de los sensores y almacenar los ensayos realizados.

El software elegido como base de todo el sistema será Labview. La decisión es

obligada, dado que se emplea un dispositivo MyRio de National Instruments, pero también se elige por su versatilidad de programación a la hora de adaptarse a distintos tipos de proyectos y por la gestión de datos en el momento de registrar todos los sensores.

Aunque técnicamente más complejo, el dispositivo se caracteriza por su fácil manejo y portabilidad, gracias a la posibilidad de interactuar con el equipo y de gestionar los ensayos realizados a través de un ordenador o una tableta en el mismo momento (Fig. 9). La frecuencia de adquisición de los sensores por parte del ordenador principal está establecida de 250 Hz, rango apto para el desarrollo de los ensayos.

Finalmente, el dispositivo cuenta con una batería integrada que permite su uso en ensayos de campo.

Este sistema logra eliminar la variabilidad y la interpretación de resultados que adolecen sistemas como el péndulo británico. Por otra parte, su portabilidad le permitirá realizar ensayos en cualquier tipo de superficie, hecho fuera del alcance de maquinaria de ensayo industrial estática y laboratorios rodantes de grandes dimensiones. Además, la medida de rugosidad aporta un refuerzo más para la completa caracterización de superficie, parámetro que quedaba fuera del alcance de la mayo-



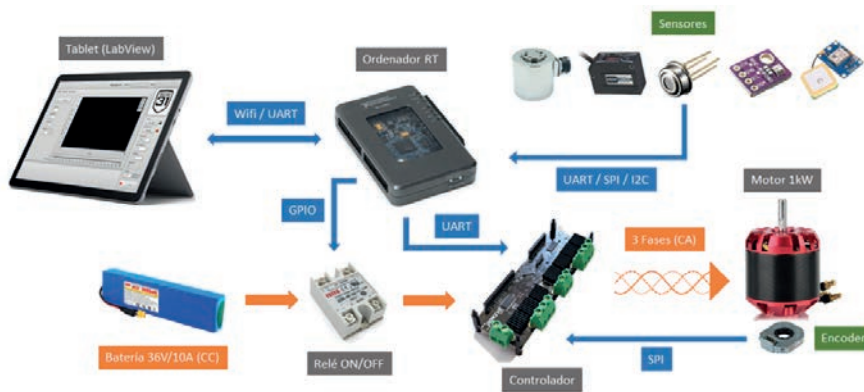


Figura 9. Diagrama de componentes del sistema.

ría de los dispositivos mencionados anteriormente.

Una vez situado el dispositivo sobre la superficie que ensayar, se realizará la puesta en servicio de todos los sensores y se aplicará la carga vertical deseada para el ensayo. El sistema está pensado para trabajar con una carga vertical constante durante todo el ensayo. Esta podrá ajustarse manualmente al inicio mediante la manivela de precarga situada en la parte superior. Hecho esto, el ordenador comenzará a lanzar las instrucciones de ensayo. La secuencia para ejecutar los ensayos debe estandarizarse, con la idea de garantizar la trazabilidad y la repetibilidad en los ensayos a lo largo del tiempo.

### 3. DISPOSITIVOS TRADICIONALES DE MEDIDA

Para llevar a cabo los ensayos, se utilizan dos dispositivos de medición: por un lado, el péndulo británico del Laboratorio de Demarcación de Carreteras del Estado en Andalucía Oriental (MITMA) y, por otro, el AFRmeter desarrollado en este trabajo para medir el coeficiente de adherencia y la rugosidad de la superficie, perteneciente al Área de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Málaga (IMMA).

El péndulo británico (Fig. 10) es un dispositivo mecánico sencillo que cuenta con un brazo oscilante equipado con un

patín de caucho como elemento rozador. Su funcionamiento se basa en medir la energía disipada por fricción cuando el patín cae y entra en contacto con la superficie. Durante este proceso, el patín arrastra una aguja indicadora, que queda fija en el punto final del recorrido antes de que el péndulo regrese a su posición inicial. La posición alcanzada por la aguja y la distancia recorrida por el péndulo tras el contacto, se utilizan para calcular el valor de resistencia al deslizamiento. El tamaño y la geometría del péndulo están definidos por normativa para garantizar la calidad y trazabilidad de los resultados.

Cuando el péndulo roza la superficie, lo hace aproximadamente sobre un recorrido de 126 mm. El caucho empleado en el ensayo está normalizado y debe presentar un borde de arista limpio de no más de 1 mm. También está definida la carga vertical que el patín debe imprimir sobre la superficie, gracias a un muelle dispuesto para tal fin. El valor de esta fuerza está establecido en 22 N aproximadamente cuando la deflexión del muelle alcanza 4,5 mm. La dureza del patín se establece en un valor de 57 o 96, según el grado de dureza del caucho.

De manera paralela, el método de parche volumétrico empleado para medir la rugosidad superficial consiste en extender un volumen conocido de arena o esferas de vidrio sobre la superficie con el uso de

un pisón de caucho plano normalizado. Una vez que el material se ha distribuido de manera uniforme, se procede a medir en repetidos puntos el diámetro del parche generado. Con el resultado de la media aritmética de los valores medidos se estima la profundidad media de la textura superficial.

#### 4. SUPERFICIES DE ENSAYO

Para las pruebas de campo se han seleccionado seis tipos de superficie, con el objetivo de abarcar amplias variaciones en el material constructivo, tamaño de grano, irregularidad de la superficie y porosidad (Fig. 11). Estos factores son esenciales para evaluar cómo cada tipo de superficie se comporta en condiciones reales de uso. Se han incluido materiales como hormigón, asfalto y resina, cada uno con características que influyen en aspectos como la adherencia, el drenaje de agua y la resistencia al desgaste. Además, se ha considerado la textura y la rugosidad de las superficies, que afectan la fricción y la acumulación de suciedad o agua.

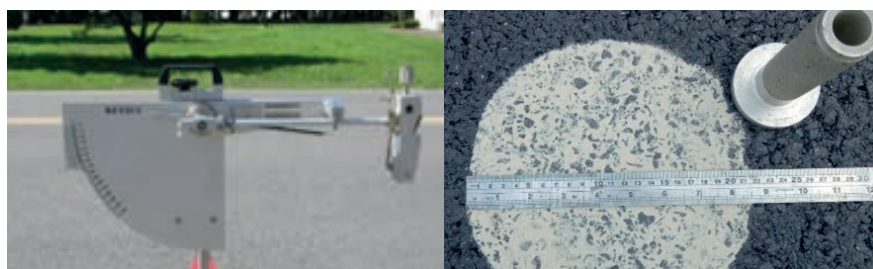
Las pruebas se realizarán en dos condiciones diferentes (seco y mojado), para recopilar información sobre el agarre en diferentes circunstancias climatológicas. El objetivo es obtener una evaluación completa de cómo responden estas superficies bajo condiciones de uso cotidiano.

Las características principales de cada superficie se evaluarán ordenándolas de menor a mayor en función del estado observado de las superficies (Tabla 1). Esta comparación previa a los ensayos aportará información relativa del desempeño de cada superficie, lo que facilitará la toma de decisiones a la hora de planificar los ensayos y la posterior validación de los resultados.

## 5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Para este trabajo se han sometido a ensayo seis superficies diferentes en condiciones de seco y mojado. Cada superficie ha sido ensayada empleando dos equipos de trabajo: el péndulo británico y el AFRmeter, propuesto en este trabajo para el análisis de adherencia y rugosidad de superficie.

En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos con el péndulo británico. Este dispositivo proporciona una única medida que resume los resultados de las diferentes pasadas del péndulo sobre la superficie. Según normativa, se deben realizar al menos cinco pasadas. Si las diferencias entre estas pasadas no superan las tres unidades, se registra el valor; de lo



A) Péndulo británico.

B) Método del parche volumétrico.

Figura 10. Métodos de caracterización de superficie clásicos.

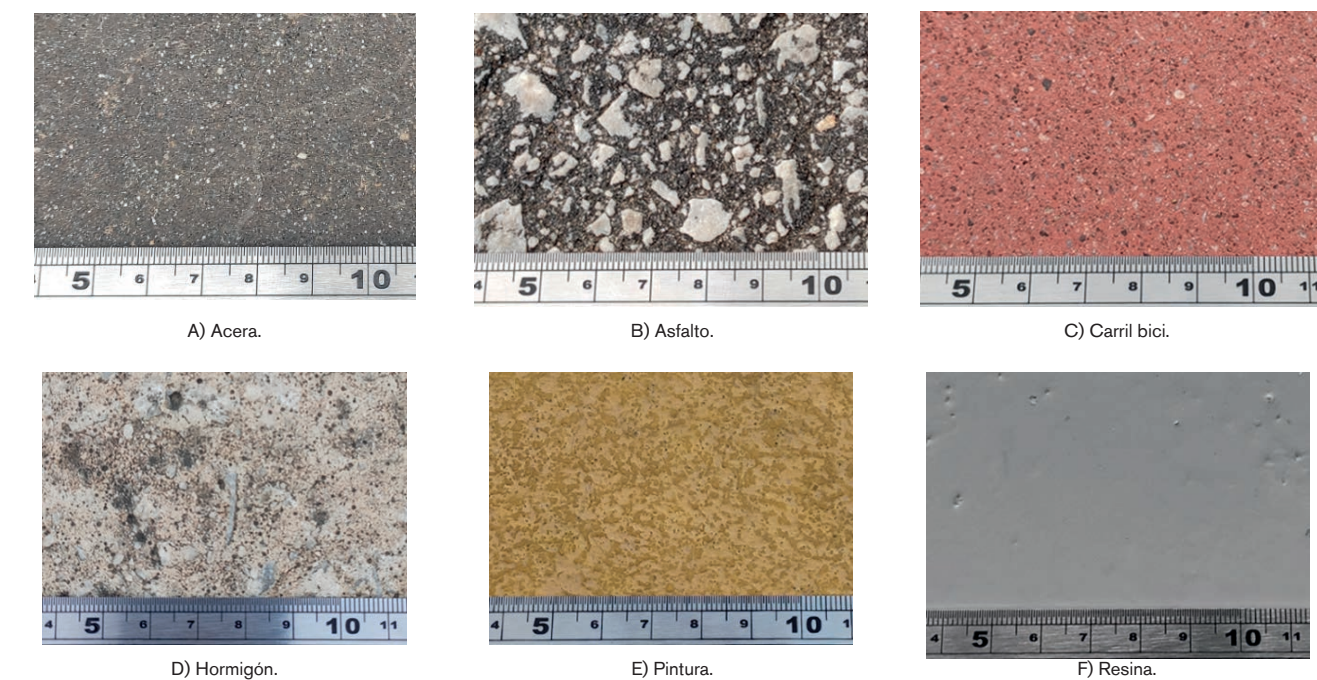


Figura 11. Superficies de ensayo.

Superficie	Tamaño de grano	Irregularidad	Porosidad
Acera	3	2	3
Asfalto	5	5	5
Carril bici	3	2	4
Hormigón	4	4	6
Pintura	2	3	2
Resina	1	1	1

Tabla 1. Propiedades de superficie.

contrario, se repite el proceso hasta obtener tres lecturas constantes. La superficie de trabajo tiene una longitud normalizada de, aproximadamente, 126 mm y el péndulo se desplaza sobre ella a una velocidad máxima próxima a los 3 m/s (Fig. 12).

Los valores mostrados en la figura 12 son el resultado del ensayo de las distintas superficies ofrecido por el equipo de trabajo del péndulo británico. Los resultados están corregidos frente a la influencia de la temperatura como está recogido en la norma. Además, se muestra la ratio de agarre seco sobre mojado entre las dos condiciones de superficie con el mismo sistema de medición.

Por su parte, los ensayos realizados con el AFRmeter ofrecen una medida basada en la adquisición continua de información. El dispositivo ensaya cada superficie de manera continua. Durante este tiempo, el sistema de adquisición recaba los datos de todos los sensores con una frecuencia de adquisición de 250 Hz. Por cada ensayo se realizan 10 pasadas sobre el total de la superficie.

La carga vertical inicial se impone mediante un sistema que trata de mantener estable la presión que el caucho ejerce sobre la superficie. Se establece una carga inicial de 40 N sobre el carrito sensorizado. Los ensayos son realizados a una velocidad de 125 mm/s durante todo el recorrido.

En la figura 13 se muestra el resultado final alcanzado por el AFRmeter para el coeficiente de fricción ( $\mu$ ) de cada una de las superficies, bajo las dos condiciones de ensayo. De igual manera que con el sistema anterior, se refleja la ratio de agarre seco sobre mojado para este sistema.

La figura 14 concentra toda la información de los ensayos del coeficiente de fricción ( $\mu$ ) para cada superficie con la dispersión típica ( $\sigma$ ) asociada a cada ensayo. En este caso, son resultado del tratamiento de miles de datos recabados durante la duración del ensayo gracias al sistema de adquisición del dispositivo. Los resultados presentan un rango de dispersión contenido, y estos son de un orden de magnitud inferior al propio valor del coeficiente resultante.

Para estos resultados no se contempla corrección de temperatura, dado que no se dispone de la base de conocimiento y de pruebas suficientes para tal fin. Para actuar contra la posible dispersión debida a la temperatura, todos los ensayos se han realizado a temperatura controlada en un rango de  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ .

La segunda parte del ensayo contempla el estudio de la rugosidad para realizar un perfil de superficie completo de la zona de ensayo (Fig. 15). Para el desarrollo de estos ensayos, se ha establecido una velocidad de avance reducida de 12,5 mm/s y se ha hecho trabajar únicamente el dispositivo láser; el palpador de caucho ha permanecido en una posición elevada. Las superficies han sido ensayadas un total de seis veces.

La evaluación de la superficie se ha basado en la determinación de la profundidad media del perfil (MPD). En la norma se definen los distintos rangos representativos de la superficie, así como la metodología de ensayo y parámetros representativos. También se obtendrá la profundidad estimada de la textura (ETD), que es una estimación del resultado que se obtendría mediante el método volumétrico. Según recoge la norma, este parámetro tiene dos posibles definiciones y se aportan los resultados recogidos en la tabla 2.

6. DISCUSIÓN

A la vista de los resultados preliminares, extraídos de los ensayos de superficie, se revelan un par de hechos interesantes. En primer lugar, cabe destacar el comporta-

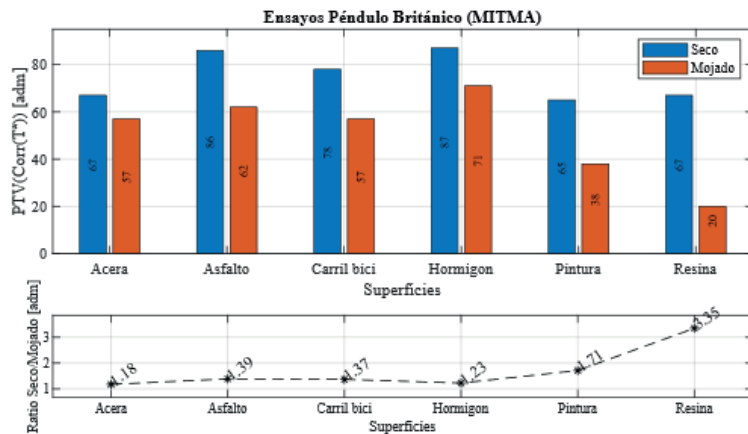
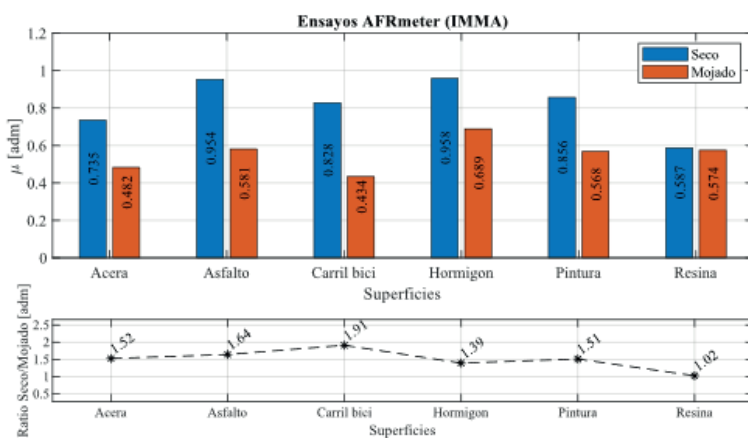
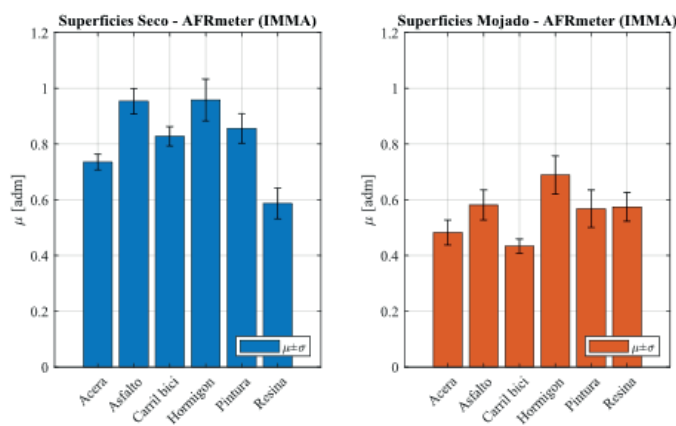


Figura 12. Resultados obtenidos del péndulo británico y ratio entre condiciones de ensayo.

Figura 13. Valores de coeficiente de fricción ( $\mu$ ) obtenidos por el dispositivo AFRmeter.Figura 14. Estadística de los valores de coeficiente de fricción ( $\mu$ ) obtenidos con AFRmeter.

miento repetible y estable de las medidas realizadas con el nuevo dispositivo. Este hecho se podía observar en el análisis estadístico de las medidas de ensayo en el que la dispersión de los datos se muestra contenida (v. Fig. 14), lo cual denota su buen funcionamiento e independencia del operador, por lo que se logra con ello uno de los objetivos de este trabajo.

En segundo lugar, el cruce de los resultados obtenidos por cada uno de los

sistemas parece reflejar una correlación adecuada para cierto tipo de superficies. En algunos trabajos se menciona la existencia de dicho vínculo, lo cual parece denotar que los resultados del dispositivo AFRmeter son adecuados. Dicha relación no responde a una correlación universal entre el coeficiente de fricción y el valor del péndulo, pues depende de la interacción entre materiales (patín y superficie). Además, se sabe que la calidad de medida

del péndulo se ve comprometida con materiales con macrotextura grande y materiales con comportamiento no lineal (p. ej., resina epoxi o polímeros). Por este motivo se recomienda recalibrar este ajuste para cada familia de materiales.

Como puede apreciarse en la figura 16, cuatro de las superficies estudiadas responden al comportamiento mencionado, y se alinean en una correlación clara. Estas superficies tienen en común que presentan una textura árida, con un tamaño de grano fino o medio y una gran porosidad. Ambos sistemas han captado de manera similar la capacidad de agarre de las superficies referidas para las dos condiciones de ensayo. Por otro lado, las dos superficies restantes (y divergentes a esta relación) son superficies sintéticas con cobertura de pintura o resina que elimina su porosidad y presentan un acabado muy liso. Este hecho puede provocar un comportamiento extraño en los resultados obtenidos por el péndulo británico y, de igual manera, puede afectar el AFRmeter y desvirtuar el resultado obtenido. Este tipo de casos los recoge la literatura especializada como conflictivos a la hora de realizar mediciones con péndulo, por lo que se recomienda el uso de otro tipo de sistemas tribológicos.

En el caso de la resina, se presentan las mayores discrepancias entre sistemas. Por su parte, el péndulo predice un gran descenso de la adherencia en mojado para esta superficie, hecho que puede deberse a que la microtextura es muy lisa y homogénea, por lo que el patín puede deslizarse sobre el agua sin agarre. En contraposición, con el AFRmeter el resultado obtenido en ambos casos es prácticamente igual. Este hecho puede ser explicado debido a la menor velocidad de avance del carrete y que, al tratarse de una superficie no porosa, el agua es apartada sin infiltrarse en la superficie, por lo que se genera la misma situación de contacto que en seco. Es similar a como sucedería con el agua evacuada en las acanaladuras de un neumático.

Los resultados del ajuste de la correlación entre los valores obtenidos del péndulo británico y el AFRmeter pueden verse en la tabla 3. El ajuste ha sido realizado excluyendo las dos superficies conflictivas descritas anteriormente.

En lo que a medidas de rugosidad se refiere, las capacidades del láser instalado en el equipo demuestran una amplia solvencia para capturar la macrotextura superficial (v. Tabla 2), incluso algunos detalles de la microtextura, los cuales también tienen influencia en la adherencia con el caucho.



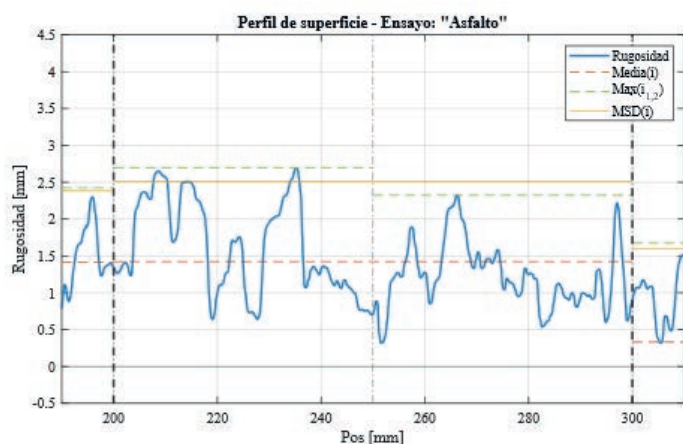


Figura 15. Muestra del perfil de superficie generado por el medidor láser.

Parámetro	Acera	Asfalto	Carril bici	Hormigón	Pintura	Resina
MPD	0,217	1,050	0,274	0,964	0,299	0,184
ETD_1	0,374	1,040	0,417	0,971	0,439	0,347
ETD_2	0,239	1,155	0,298	1,060	0,328	0,202

ETD: profundidad estimada de la textura; MPD: profundidad media del perfil.

Tabla 2. Resumen de medidas del perfil de superficie obtenidos con AFRmeter.

El análisis del perfil obtenido, basado en el promedio de una nube de puntos generada en sucesivas pasadas sobre la superficie, tiene suficiente entidad como para poder descartar el uso de sistemas tradicionales como el método volumétrico. Se ha evaluado la superficie con los criterios recogidos en la normativa vigente y se han obtenido resultados coherentes, pero sin la profundidad de un trabajo específico o más extenso sobre el tema. Los resultados muestran una ordenación correcta del perfil de superficie basándose en las primeras observaciones y las medidas obtenidas.

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un prototipo innovador que aúna en una herramienta las capacidades de diferentes aparatos de medida ya existentes en el mercado empleados en la investigación de neumáticos y superficies. Se ha diseñado un dispositivo que muestra una potencial mejora en la precisión y confiabilidad de los resultados de ensayo de superficie frente a dispositivos precedentes. Se trata de una herramienta manejable, portátil y de construcción asequible, sin que esto último repercuta en la calidad de sus resultados.

En la actualidad, los ensayos cuyos objetivos son la predicción de superficie y la estimación del nivel de adherencia no cuentan con información precisa o con-

creta de la zona donde se ha realizado el ensayo. Si se persigue la optimización de estas estimaciones, se debe disponer de un sistema que sea capaz de caracterizar adecuadamente la superficie testada y, con ello, poder validar la predicción realizada.

De igual manera, en este trabajo se han presentado los primeros resultados obtenidos con el dispositivo desarrollado, que ha demostrado un rendimiento adecuado y ha proporcionado datos de adherencia y rugosidad estables y consistentes. Aunque se encuentra en el ámbito de los dispositivos de medición estáticos, es un equipo portátil con un sistema de adquisición integrado y un proceso completa-

mente automatizado.

Se ha logrado realizar la validación de las medidas obtenidas comprobando la correlación con los sistemas de referencia empleados. De este modo, se ha logrado una herramienta valiosa y útil para futuras investigaciones en caracterización de superficie y seguridad vial. Este nuevo dispositivo tiene el potencial de convertirse en un referente para evaluar la adherencia de las superficies, contribuyendo así a mejorar la seguridad del automóvil y el diseño de infraestructuras viales.

## 8. APLICACIONES Y POSIBILIDADES FUTURAS

El dispositivo propuesto integra en una única herramienta las mediciones necesarias para caracterizar la superficie ensayada, y se constituye como un recurso de apoyo en diversas disciplinas, incluyendo la investigación en dinámica vehicular, el estudio de neumáticos y la gestión del mantenimiento de infraestructuras viales.

El prototipo destaca por una serie de cualidades que lo hacen muy prometedor, pues proporciona resultados confiables y consistentes. Su diseño ligero y de manejo sencillo lo hace accesible incluso para usuarios no especializados, y su versatilidad permite adaptarlo a una amplia gama de ensayos y aplicaciones.

Respecto a posibles mejoras futuras, se identifican varias líneas de evolución. Actualmente, el diseño contempla un efector fijo que genera un deslizamiento completo sobre la superficie. Una mejora consistiría en incorporar un dispositivo final capaz de ajustar el grado de deslizamiento mediante un rozador en forma de disco o rueda, accionado por un segundo motor eléctrico. Ajustando la velocidad del carrete y la rotación de la rueda, sería

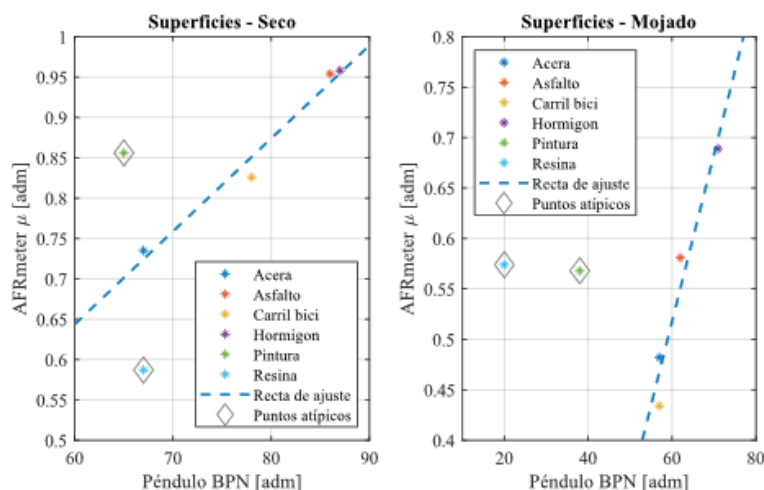


Figura 16. Correlación de resultados entre el péndulo británico y el AFRmeter.

Ensayos	p1		p2	R
	-	%		
Seco	0,012	1,150	-0,047	0,975
Mojado	0,017	1,660	-0,477	0,938

Tabla 3. Coeficientes de ajuste lineal ( $f(x) = p1 \cdot x + p2$ ).

posible mantener un deslizamiento controlado y analizar la evolución del coeficiente de adherencia, simulando situaciones como una frenada de emergencia con un sistema antibloqueo progresivo.

Adicionalmente, podría incorporarse un sistema para registrar la vibración del patín causada por el grano de la superficie, lo que permitiría clasificarla mediante modelos predictivos entrenados con este tipo de fenómenos.

Por último, resultaría relevante estudiar la influencia de parámetros como la carga aplicada, la temperatura y la velocidad de avance del dispositivo, así como elaborar una base de datos amplia que permita parametrizar estos factores. Asimismo, convendría analizar la rugosidad de la superficie y evaluar cómo la micro-textura y la macrotextura afectan los resultados de adherencia.

## BIBLIOGRAFÍA

AENOR. (2010). UNE-EN 13036-1: Características de las superficies de carreteras y aeródromos. Métodos de ensayo. Parte 1: Medición de la profundidad de la macrotextura de la superficie del pavimento utilizando una técnica de parche volumétrico. Asociación Española de Normalización (AENOR).

AENOR. (2012). UNE-EN 13036-4: Características de las superficies de carreteras y aeródromos. Métodos de ensayo. Parte 4: Método para la medición de la resistencia al deslizamiento o deslizamiento de una superficie: ensayo del péndulo. Asociación Española de Normalización (AENOR).

AENOR. (2021). UNE-EN ISO 13473-1: Caracterización de la textura de los pavimentos mediante el uso de perfiles de superficie. Parte 1: Determinación de la profundidad media del perfil. Asociación Española de Normalización (AENOR).

Cabrera, J. A., Ortiz, A., Simón, A., García, F., & La Blanca, A. P. (2003). A versatile flat track tire testing machine. *Vehicle System Dynamics*, 40(4), 271-284.

Castillo, J. J., Cabrera, J. A., Guerra, A. J., & Carabias, E. (2015). Robust road condition detection system using

in-vehicle standard sensors. *Sensors*, 15, 32056-32078.

Chen, S., Liu, X., Luo, H., *et al.* (2022). A state-of-the-art review of asphalt pavement surface texture and its measurement techniques. *Journal of Road Engineering*, 2(2), 156-180.

Chu, L., Guo, W., & Fwa, T. F. (2022). Theoretical and practical engineering significance of British pendulum test. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(1), 1-8.

Cuadrado, O., & Sánchez, M. (2018). Ensayo de resistencia a la rodadura de neumáticos en banco de ensayo tipo tambor rotatorio. XXII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Madrid.

Daghan, D., & Pinar, B. (2019). Smart traction control systems for electric vehicles using acoustic road-type estimation. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*.

Guo, F., Pei, J., Zhang, J., Li, R., Zhou, B., & Chen, Z. (2021). Study on the skid resistance of asphalt pavement: A state-of-the-art review and future prospective. *Construction and Building Materials*, 303, 124411.

Guo, W., Chu, L., & Fwa, T. F. (2021). Mechanistic harmonization of British pendulum test measurements. *Measurement*, 182, 109618.

Jin, D., Leng, B., Yang, X., Xiong, L., & Yu, Z. (2020). Road friction estimation method based on fusion of machine vision and vehicle dynamics. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* (pp. 1771-1776). Las Vegas, NV.

Mahboob Kanafi, M., Kuosmanen, A., Pellinen, T. K., & Tuononen, A. J. (2015). Macro- and micro-texture evolution of road pavements and correlation with friction. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(2), 168-179.

Masino, J., Foitzik, M. J., Frey, M., & Gauterin, F. (2017). Pavement type and wear condition classification from tire cavity acoustic measurements with artificial neural networks. *Journal of the Acoustical Society of America*, 141, 4220-4229.

Mataei, B., Zakeri, H., Zahedi, M., & Nejadj, F. M. (2016). Pavement friction

and skid resistance measurement methods: A literature review. *Open Journal of Civil Engineering*, 6(4), 537.

Mei, M., Chang, J., Li, Y., Li, Z., Li, X., & Lv, W. (2019). Comparative study of different methods in vibration-based terrain classification for wheeled robots with shock absorbers. *Sensors*, 19.

Park, J., Min, K., Kim, H., Lee, W., Cho, G., & Huh, K. (2018). Road surface classification using a deep ensemble network with sensor feature selection. *Sensors*, 18, 1-16.

Pérez-Acebo, H., Gonzalo-Orden, H., Findley, D. J., & Rojí, E. (2020). A skid resistance prediction model for an entire road network. *Construction and Building Materials*, 262, 120041.

Ruiz, L. P., & González, S. J. Y. (2013). Correlación de medidas de macrotextura tomadas con el método volumétrico y con diferentes texturómetros láser. *Ingeniería Civil*, (169), 23-40.

Sharma, S., Phan, H., & Lee, J. (2020). An application study on road surface monitoring using DTW-based image processing and ultrasonic sensors. *Applied Sciences*, 10.

Šabanović, E., Žuraulis, V., Prentkovskis, O., & Skrickij, V. (2020). Identification of road-surface type using deep neural networks for friction coefficient estimation. *Sensors*.

Torbruegge, S., & Wies, B. (2015). Characterization of pavement texture by means of height difference correlation and relation to wet skid resistance. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2(2), 59-67.

Wambold, J. C., & Antle, C. E. (1995). International PIARC experiment to compare and harmonize texture and skid resistance measurements. Permanent International Association of Road Congresses (PIARC), París, Francia.

Wang, S., Kodagoda, S., Shi, L., & Wang, H. (2017). Road-terrain classification for land vehicles: Employing an acceleration-based approach. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 12, 34-41.

Weiwen, D., & Qingrong, Z. (2009). Road surface condition identification based on statistical pattern recognition method. 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (pp. 1-6). St. Louis, MO.

Zúñiga-García, N., Smit, A., & Prozzi, J. (2017). Cuantificación de la macro y microtextura del pavimento para la estimación de fricción.

# Deceleration variability of a progressive action safety gear in an inclined elevator

Variabilidad de la deceleración de un paracaídas de acción progresiva en un ascensor inclinado

Beatriz Valles Fernández<sup>1</sup>, Enrique Alcalá Fazio<sup>1</sup>, Ángel Martín López<sup>1</sup>, David Rincón-Dávila<sup>1</sup> y Joel Valenzuela Cuartero<sup>1</sup>

## Resumen

Los ascensores inclinados son un tipo de ascensor que se mueven siguiendo la inclinación del terreno. El uso de este tipo de ascensores es muy diverso, ya que puede ser utilizado en centros comerciales, metros, estaciones y aeropuertos, así como en zonas residenciales y en lugares o zonas turísticas con cierto desnivel. Esta opción se ha convertido en una excelente alternativa a las escaleras mecánicas tradicionales al poder ser utilizada para el transporte de personas con discapacidad o personas con movilidad reducida. También presenta una ventaja competitiva frente a las escaleras mecánicas al poder adaptarse a trayectos largos con mayor facilidad. Este tipo de ascensores cuenta con una cabina, habitualmente acristalada, que permite que los pasajeros estén siempre en posición vertical, aunque la trayectoria del terrero sea inclinada.

En el caso de los ascensores con trayectoria inclinada, la norma de referencia UNE EN 81:22-2022 establece dos límites de aceleración en caso de actuación del sistema de parada de emergencia: un límite de aceleración horizontal máximo, establecido para evitar que los pasajeros colisionen con las paredes del carro, y un límite de aceleración vertical mínimo que garantiza que el paracaídas tiene una capacidad de frenado suficiente para decelerar el carro en condiciones seguras para los ocupantes en caso de plena carga.

En este artículo se presenta el análisis realizado para determinar la viabilidad de uso de un paracaídas de acción progresiva, que forma parte del sistema de seguridad pasiva junto con el limitador de velocidad en los ascensores verticales, como sistema de frenado en caso de emergencia para los ascensores con trayectoria inclinada.

## Palabras clave

Modelo de ascensor, ascensor inclinado, paracaídas, amortiguador hidráulico, tope de ascensor, EN 81-22:2020.

## Abstract

Inclined elevators are a type of elevator that moves along the incline of the ground. These types of elevators are widely used, and can be used in shopping malls, subways, stations, and airports, as well as in residential areas or places with a certain level difference. This option has become an excellent alternative to traditional escalators, allowing them to be used for transporting disabled or people with reduced mobility. Furthermore, they feature a cabin, usually enclosed in glass, that allows passengers to remain upright, even when the ground is inclined.

For elevators with inclined trajectories, the UNE EN 81:22-2022 standard establishes two acceleration limits in the event of the emergency stop system being activated: a maximum horizontal acceleration limit, established to prevent passengers from colliding with the carriage walls; and a minimum vertical acceleration limit, which guarantees that the safety gear has sufficient braking capacity to decelerate the carriage under safe conditions for occupants if fully loaded.

This article presents the analysis conducted to determine the feasibility of using a progressive-action safety gear, which is part of the passive safety system along with the speed limiter in vertical elevators, as an emergency braking system for elevators with inclined trajectories.

## Keywords

Hydrogen, thermochemical cycles, perovskites, nuclear energy, and generation IV reactors.

Recibido/received: 03/07/2025

Aceptado/accepted: 13/10/2025

(1) Francisco Aparicio Izquierdo University Institute of Automotive Research, Polytechnic University of Madrid.

Autores para correspondencia: b.valles@upm.es, enrique.alcala@upm.es, angel.martin@upm.es, david.rincond@upm.es y joel.valenzuela@upm.es





## 1. INTRODUCTION

Elevators are a mass transit service that moves hundreds of millions of people every day. Only in Spain, elevators make approximately 48 million trips every day and transport 9.5 million people. This is due to the low probability of serious injury in most incidents (Fig. q). However, it is a means of transportation in which various organizations continue to work to improve its already high safety standards.

Inclined elevators are a type of elevator that moves along the incline of the ground. These types of elevators are widely used, and can be used in shopping malls, subways, stations, and airports, as well as in residential areas or tourist locations with a certain gradient. This option has become an excellent alternative to traditional escalators, as it can be used to transport people with disabilities or people with reduced mobility. They also offer a competitive advantage over escalators, as they can more easily adapt to long distances. This type of elevator features a cabin, usually enclosed in glass, that allows passengers to remain upright, even

when the ground is inclined (Fig. 2).

Elevators are a very sensitive element in terms of safety, since a malfunction can cause serious injuries to users and even death. This is why they have a passive safety system installed (speed limiter and progressive or instantaneous safety gear) that comes into operation when the cabin overspeeds or the cables break,

causing the cabin to descend in free fall (Fig. 3).

The safety gears (5) are basically made up of a casing that is fixed to the cabin frame (7) (or the counterweight depending on the design), a mobile element -wedge or roller-mechanically linked (6) to the wheelhouse whose guided movement causes emergency braking by contact

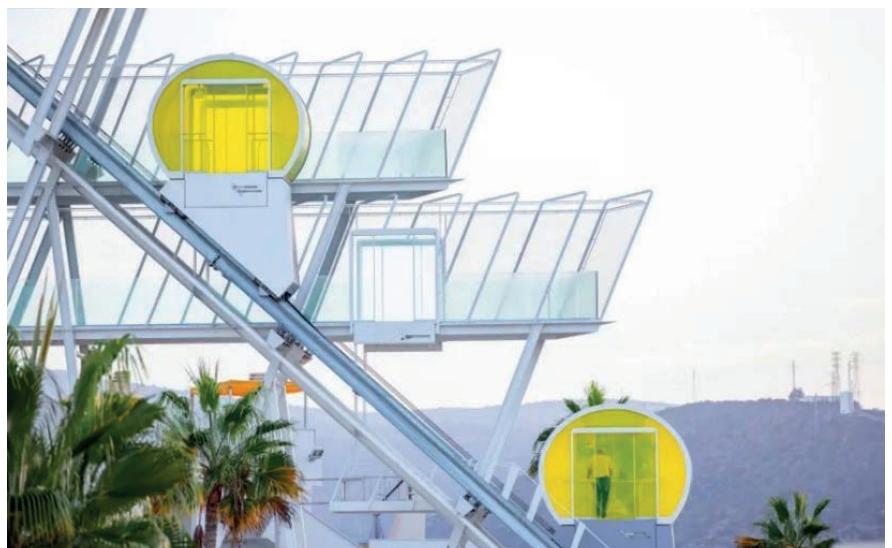


Figure 1. ThyssenKrupp elevator at the Riosol Island of Stars Hotel in Gran Canaria. Source: <https://www.tkelevator.com>.



Figure 2. Kone elevator in London Underground's Elizabeth Line. Source: <https://www.thenationalnews.com>

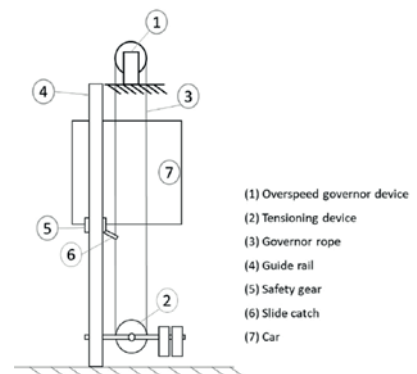


Figure 3. Diagram of an elevator's passive safety system. Source: prepared by the authors.

or wedging against the guides (4). In the case of instantaneous safety gears, very high decelerations occur during braking, while in progressive safety gears there is an elastic element that limits the deceleration in the cabin to 0.6 g. The UNE EN 81:20:2020 and UNE EN 81-50:2020 standards define, respectively, the safety rules for their construction and installation, as well as the inspections and tests that they must comply with in order to be approved.

In the case of elevators with an inclined trajectory, the type of safety gear used must have a special configuration, since, while ensuring a minimum level of vertical deceleration, the car will experience a certain level of horizontal deceleration. Therefore, this type of elevator requires different requirements than vertical elevators and is evaluated according

to the requirements defined in the UNE EN 81-22:2022 standard. The standard establishes two acceleration limits in the event of the emergency stop system being activated: a maximum horizontal acceleration limit, established to prevent passengers from colliding with the walls of the carriage; and a minimum vertical acceleration limit that guarantees that the safety gear has sufficient braking capacity to decelerate the carriage under safe conditions for occupants if fully loaded. Therefore, the inclination angle causes longitudinal accelerations/decelerations that differentiate the dynamics of both types of elevators (vertical and inclined). In section 5.6.8.4 of the UNE EN 81-22:2022 standard, the deceleration limits established at the moment of the safety gear action with nominal load are indicated:

$$a_h \leq 0.5 \cdot g \quad (1)$$

$$0.1 \cdot g \leq a_v \leq 1 \cdot g \quad (2)$$

Where  $a_h$  is the measure of horizontal acceleration and  $a_v$  is the measure of vertical acceleration.

In the case of vertical elevators, the UNE EN 81-50:2020 standard imposes a minimum deceleration of approximately 0.6 g, a deceleration value used to determine the maximum loaded weight that a given safety gear can stop. Comparing the requirements of both regulations, it is worth noting that, for inclined elevators, although the minimum required deceleration is lower, two upper limits are imposed for both vertical (1 g) and horizontal (0.5 g) deceleration. The limits imposed on inclined elevators promote safety by



Figure 4. Test platform



reducing the possibility of passengers colliding with the cabin walls, although they also pose a challenge for the system used in emergency braking, since very specific acceleration levels must be guaranteed.

For manufacturers of elevator safety components, developing an emergency braking system adapted to the requirements of inclined elevators is a handicap. In fact, there is a large amount of literature on the dynamic behaviour of elevators and their components (Pawel, 2017; Pullecchi, 2010; Tomé, 2022; Dapeng, 2022; Xu, 2013, and Wang, 2018), but no literature has been found on the behaviour of the elements used in the emergency braking of elevators with an inclined trajectory.

This article analyses the behaviour of the braking system of an inclined elevator when a progressive safety gear is used as the main element. This would represent a competitive advantage for current manufacturers, since it would allow them to develop new uses for an existing product and enter new markets without increasing production costs.

## 2. RESULTS

To conduct a feasibility study on a progressive safety gear on an inclined elevator and to determine the variability of its performances a test plan was generated considering the most influential variables for the design of an inclined elevator, such as the type of safety gear, the installation or not of a shock-absorbing element, the angle of inclination of the platform, and the weight of the cabin and passengers.

The proposed tests were conducted on the INSIA lateral inclination platform, where the elevator assembly was installed, complete with its rails, guides, safety gear system, and final compression dampers (Fig. 4). The platform's hydraulic drive made it possible to adjust the elevator's inclination angle to the established setpoints. The assembly image shows how the trolley's running rails are mounted on the inclined platform.

The combination of tests proposed for validation is summarized in table 1. The tests considered two different inclinations: 15 and 25 degrees, with two masses: one co-

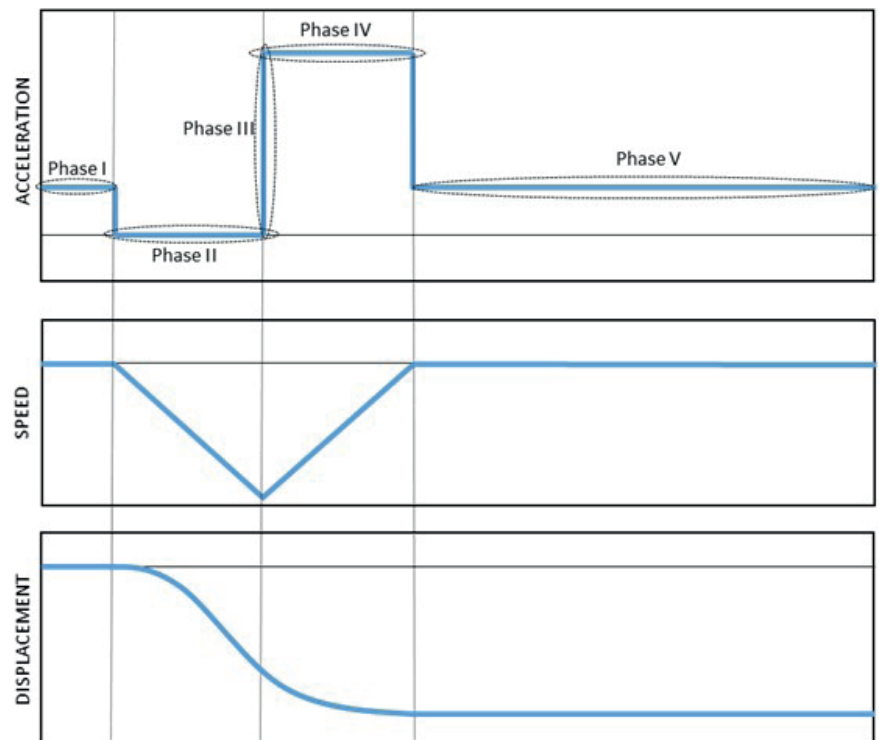


Figure 5. Acceleration, speed and displacement signals of a progressive safety gear in the process of free fall and braking.

responding to an empty cabin and the other one corresponding to the maximum load, depending on the inclination and safety gear. A different safety gear was used for each inclination.

The response of the progressive safety gear, in the case of being installed in an inclined elevator, is similar to that obtained in a vertical elevator (Alcalá, 2012) as can be seen in figure 5 and consists of the following phases:

- Phase I: Initial state, the system is motionless in static equilibrium.
- Phase II: Free fall until the elevator reaches overspeed.
- Phase III: Braking system activation when entering the speed limit.

ter's operating range.

- Phase IV: Deceleration of the cabin due to the friction force applied by the safety gear against the guide rail. If an additional element is present, it increases the braking distance in this phase.
- Phase V: Final state after the elevator stops.

Currently, manufacturers use hydraulic shock absorbers to meet the regulatory requirements defined in the UNE-EN 81-22:2022 standard, which governs the installation of inclined elevators. Therefore, it was decided to include in the test plan configurations that contemplated both the rigid connection between

Rehearsal	E01	E02	E03	E04	E05	E06
Elastic stop	YEAH	YEAH	Rigid	Rigid	YEAH	YEAH
Safety gear	SG1	SG1	SG2	SG2	SG2	SG2
Angle [°]	15	15	25	25	25	25
Mass [kg]	3,635	5,410	3,635	5,060	3,635	5,060

Table 1. Test plan.





Figure 6. Position of the sensors used during the tests.

the safety gear frame and the cabin frame, as well as the use of elastic elements between them.

Therefore, six tests were conducted at two different inclinations: 15 and 25 degrees, with two masses: one for the empty cabin and the other for the maximum load, depending on the inclination and safety gear. A different safety gear was used for each inclination.

Accelerometers and cable sensors were used to acquire data during the testing process to measure displacements and accelerations in all directions, as illustrated in the following image (Fig. 6).

To assess the feasibility and performance of using progressive safety gears as emergency braking elements for an inclined elevator, a wavelet analysis of the results obtained from the tests was performed to characterize the behaviour of these safety gears when subjected to natural decelerations in an inclined elevator.

Wavelet transform analysis is a tool that allows the analysis of signals in the time and frequency domains; therefore, it has some advantages over the Fourier transform (Pawel, 2017) (Sifuzzaman, 2009) and its modification based on window analysis. This method has been applied in various areas of engineering (Pawel, 2017; Sifuzzaman, 2009), since it is a multiresolution analysis that allows identifying patterns, breakpoints and discontinuities in a signal.

From the acceleration time curve  $Acc(t)$  obtained in each of the tests carried out at INSIA facilities, the Continuous Wavelet Transform (CWT) is generated (Kumar, 1997)

$$(Torrence, 1998): W_{s,n}(Acc) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{s} \Psi\left(\frac{t-n}{s}\right) \frac{(Acc(t_i) - \langle Acc \rangle)}{\sigma_{Acc}} \quad (3)$$

Where  $\Psi(t)$  represents the function called the mother wavelet or basic function. The parameters  $\langle Acc \rangle$  and  $\sigma_{Acc}$  are the means and standard deviations of the acceleration, and the subscripts syn represent the scale and time indices, respectively. The wavelet transform defined by equation (3) is called a continuous

wavelet transform (CWT) because the scale and time parameters assume continuous values.

$$\Psi(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\theta_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (4)$$

Where  $\theta_0$  is the central frequency or order of the wavelet and  $\eta$  is the renormalized time variable. To balance the time/frequency resolution, a value is adopted  $\theta_0 = 6$ , which defines six oscillations in the complex Morlet-type mother wavelet signal

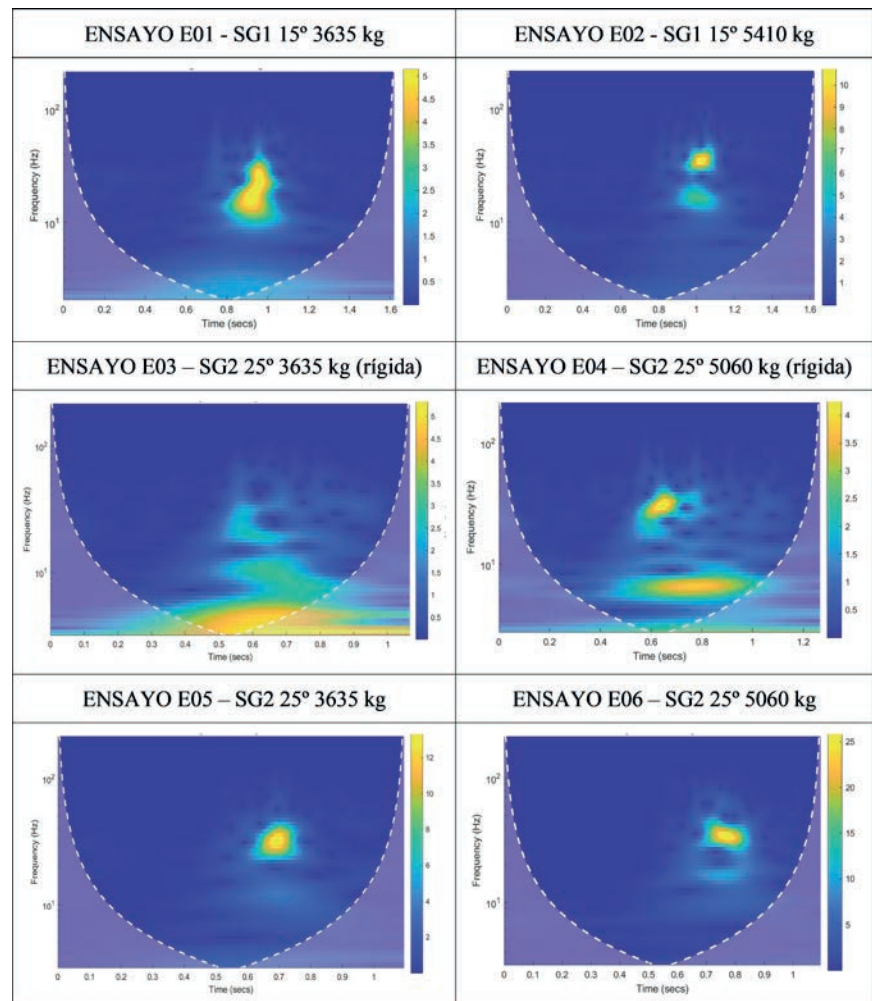


Figure 7. Wavelet analysis in the tests carried out.

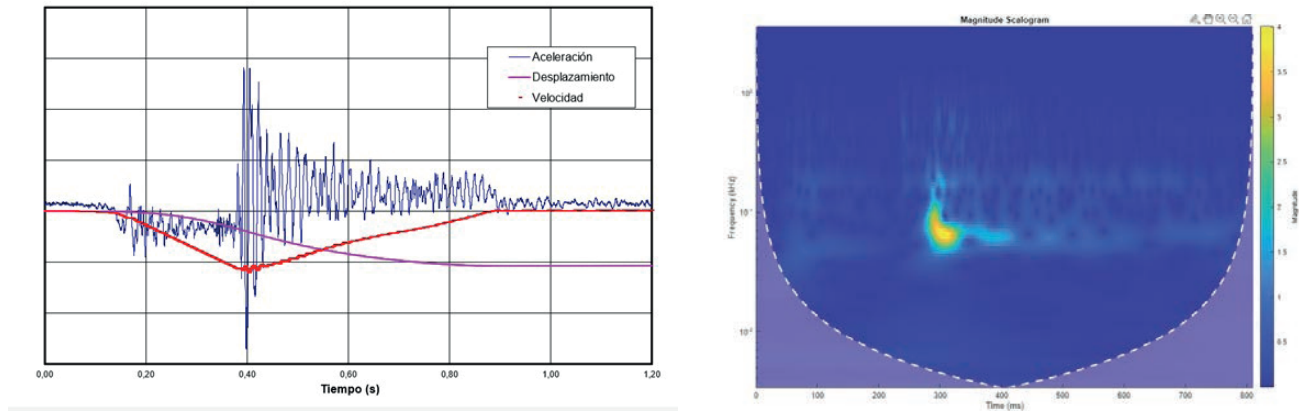


Figure 8. Wavelet analysis of the vertical elevator test for the same safety gear.

(Pawel, 2017).

The following figure shows the acceleration signals measured during the test transformed by CWT and presented with the corresponding wavelet power spectrum, PW (11).

$$P_W = |W_{s,n}|^2 \quad (5)$$

As it can be seen in figure 7, the spectrograms corresponding to the wavelet analysis allow the original signal to be broken down into frequency bands. Furthermore, the colour of each point indicates the magnitude of the signal at each instant and frequency. The area corresponding to high coefficient values appears in yellow, while the blue re-

gion is made up of low coefficients. The active braking region can be seen in the power spectra of the acceleration signals, corresponding to the yellow colour. It is significant to observe the change in intensity in the tests corresponding to the removal of the bumper (E03 and E04), since in these cases, the active braking zone of the safety gear is greater in time than in the rest of the tests, where an elastic bumper is used. A detailed examination of the results shows a change in the natural frequency for different angles and for different masses, but it is more evident in the case where the elastic bumper is removed.

To check whether the active braking region of a progressive safety gear has been modified when installed on an inclined elevator, compared to its original use on a vertical elevator, the spectrogram corresponding to the test curves of these progressive safety gears has been obtained when they were approved according to the UNE EN 81-50:2020 standard (Fig. 8).

As it can be seen, the active braking region that occurs in the safety gear during the vertical test is quite similar to that obtained during the inclined test without the use of additional elements. Furthermore, it is confirmed that the active braking in the vertical test, although very strong at the initial moment, it is maintained over time, which allows compliance with the vertical deceleration requirement established in the reference standard.

For a more exhaustive analysis, figure 9 shows the histograms cor-

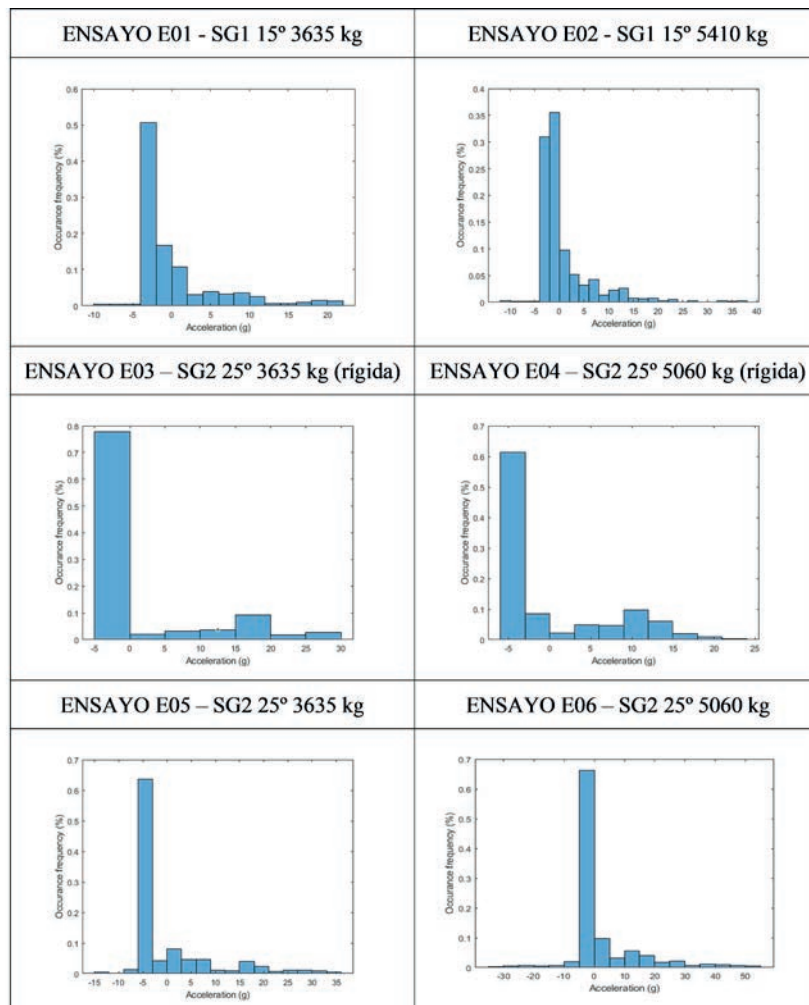


Figure 9. Histograms of the validation tests performed.

ponding to the signals used for the validation tests carried out. In this case, only the accelerations obtained during the braking of the inclined elevator's emergency system have been considered for study; the acceleration part has been eliminated to arrive at the speed limiter's action.

As it can be seen in the histograms corresponding to the cabin acceleration in the direction of travel, in the case of tests at an angle of 25 degrees, peaks of up to 5 g or more are produced, regardless of whether or not a bumper is fitted, while the maximum decelerations measured for an angle of 15 degrees do not exceed 4 g. Asymmetry can also be observed in the graphs due to the peculiarity of the inclined free-fall test, which establishes criteria in both vertical and longitudinal directions. In this case, the resultant of both accelerations, i.e., the acceleration in the direction of travel, is analyzed.

### 3. CONCLUSIONS

This study has demonstrated the feasibility of installing a progressive safety gear, an element that forms part of the passive safety system of a conventional elevator, as part of the braking system for inclined elevators.

The results obtained allow the manufacturer to turn a handicap into a new market opportunity, since an existing product can be repurposed, and there is no need to invest time and money in developing new solutions that meet the deceleration levels established by inclined elevator regulations.

The developed test plan has confirmed that in order to characterize the behaviour of the progressive safety gear in inclined elevators, it is necessary to evaluate its behaviour in variables as important as the angle of inclination and the weight of the cabin, since in the wavelet analysis performed, the active braking zone of the safety gear can be very different.

The wavelet analysis also reveals that progressive safety gears, when installed on inclined elevators, exhibit different behaviour depending on whether they are connected to the cabin frame rigidly or include

an elastic element. If an elastic stop is not installed, the active braking zone of the safety gear is larger, although the maximum deceleration values remain similar.

### ACKNOWLEDGMENTS

This work has been made possible thanks to funding from the Segvauto.5G-CM TEC-2024/ECO-277 project, subsidized by the Regional Ministry of Education, Science and Universities of the Community of Madrid, which is part of the 2024 call for R&D projects carried out in collaboration together with research groups from universities and research organizations in the Community of Madrid.

### REFERENCES

- Alcalá E et al. (2012). "Design of inclined elevators. Development and validation of mathematical models for the design of inclined elevators according to the draft ISO prEN 81-22:2010 standard". COIIM Journal, No. 56.
- Dapeng N et al. (2022). Operation performance evaluation of elevators based on condition monitoring and combination weighting method. *Measurement* 194, 111091.
- Kiyimik, MK, Guler I, Dizibuyuk A., Akin M (2004).: Comparison of STFT and wavelet transform methods in determining epileptic seizure activity in EEG signals for real-time applications. *Comput. Biol. Med.* 35, 603-616.
- Kumar P, Foufoula-Georgiou. E (1997). Wavelet analysis for geophysical applications *Rev. Geophys.*, 35, 385-412.
- Pawel L et al (2017). Braking deceleration variability of progressive safety gears using statistical and wavelet analyses. *Measurement* 110, 90-97.
- Pulecchi T et al. (2010). Digital filtering of acceleration data acquired during the intervention of a lift safety gears. *Measurement* 23, 455-468.
- Schewer L (2007). Validation metrics for response histories: perspectives and case studies. Windsor; Springer-Verlag London Limited.
- Shahidul I et al. A wavelet approach for precursor pattern detection in time series. *Journal of Electrical Systems and Information Technology* 5 (2018) 337-348.
- Sifuzzaman, M, Islam MR, Ali MZ (2009). Application of wavelet transform, and its advantages compared to Fourier transform. *J. Phys. Sci.* 13, 121-134.
- Sprague MA, and Geers TL (2004). A spectral-element method for modeling cavitation in transient fluid-structure interaction. *Mechanical Engineering, University of Colorado, Boulder, CO 80309-0427, USA Int. J. Numer. Meth. Engg.* 60:2467-2499.
- Tome M, et al. (2022). Automatic velocity measurement system applied to elevator overspeed governors. *Building Services Engineering Research and Technology*, 43(5):559-569.
- Torrence C, Compo GP (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 79, 61-78
- UNE EN 81-20:2022 Safety rules for the construction and installation of lifts - Lifts for transport of persons and goods - Part 20: Passenger and goods passenger lifts.
- UNE EN 81-50:2022 Safety rules for the construction and installation of lifts - Lifts for transport of persons and goods - Part 50: Design rules, calculations, examinations and tests of lift components.
- UNE EN 81-22:2022 Safety rules for the construction and installation of lifts - Lifts for transport of persons and goods - Part 22: Electric lifts with inclined path.
- Wang Q., et al (2018). MCU System-based Intelligent High-speed Elevator Door Operator Fault Analysis and Research. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 428, 012028.
- Xu B., et al (2013). Safety brake performance evaluation and optimization of hydraulic lifting systems in case of overspeed dropping. *Mechatronics Vol. 23*, 1180-1190.





El Sistema de Acreditación DPC de Ingenieros, realizado y gestionado por el COGITI, implanta un procedimiento de acreditación del desarrollo profesional continuo (DPC) bajo 4 niveles, que documentalmente valida y acredita la competencia profesional, compuesta por formación y experiencia adquirida a lo largo de la vida profesional del Ingeniero en el desarrollo de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial.

La acreditación como ingeniero, en cualquiera de los niveles, aporta a los profesionales beneficios intangibles, prestigio profesional, y beneficios tangibles, acceso a la bolsa de empleo de ingenieros acreditados, descuentos en formación, seguro profesional, etc.

La acreditación DPC de ingenieros es un título profesional, respaldado por la marca COGITI que transmite confianza y credibilidad a consumidores y empresas, y que aporta a aquél que lo ostente, prestigio, visibilidad profesional y el derecho a disfrutar de servicios exclusivos.

**Tu experiencia y formación**  
tienen un **valor**

## Beneficios de la acreditación



### Empleo

Da acceso a la "Bolsa de empleo de Ingenieros Acreditados" cuya función será la promoción de los perfiles de los ingenieros acreditados. Acceso a grupos de redes sociales profesionales del COGITI.



### Acceso a grado

El Sistema de Acreditación de ingenieros como instrumento para el reconocimiento de la experiencia profesional, y otros méritos por parte de las Universidades.



### Visibilidad profesional

Diploma acreditativo del nivel DPC, tarjeta acreditativa, incorporación en el Registro Profesional de Ingenieros Acreditados (RPIA), identificación pública de los ingenieros inscritos acreditados.



### Condiciones especiales SRC

La Acreditación modulará las prestaciones y coberturas del Seguro de Responsabilidad Civil, accediendo a condiciones específicas.



### Prestigio profesional

Sello de garantía avalado por el COGITI como órgano representativo de la Ingeniería Técnica Industrial Española que aporta una certificación de la formación y la experiencia a lo largo de la vida profesional.



### Descuentos en formación

Descuentos en las actividades formativas de la Plataforma on-line de formación del COGITI, existiendo además la posibilidad de descuentos adicionales en las acciones formativas impartidas por los Colegios.



### Movilidad UE

Válido en procesos de reconocimiento de cualificaciones para ingenieros que deseen desplazarse a trabajar a países UE. Asesoramiento directo del COGITI en la preparación de los dosieres de reconocimiento de cualificaciones profesionales.



### Certificado curricular

Certificación y validación de la veracidad del curriculum vitae del colegiado acreditado en cualquiera de los niveles.

# Effect of the cutting-edge radius on machining processes of the Ti6Al4V alloy

Efecto del redondeo de la arista de corte en procesos de mecanizado de la aleación Ti6Al4V

J. L. Cantero Guisández<sup>1</sup>, A. Guerra Sancho<sup>1</sup>, A. Sáez Álvarez<sup>1</sup> y M. H. Miguélez Garrido<sup>1</sup>

## Resumen

La microgeometría del filo de las herramientas de corte tiene un efecto determinante en su duración y en la calidad del acabado de la pieza. Actualmente, se están logrando avances significativos en la implementación de técnicas que permiten obtener con elevada precisión redondeos de arista de corte simétricos y asimétricos. Para aprovechar el potencial de estas tecnologías es necesario determinar el efecto de los distintos tipos de redondeo de filo sobre el rendimiento de la herramienta en función de los parámetros de corte y material mecanizado.

En este trabajo se han desarrollado modelos numéricos bidimensionales de procesos de mecanizado de la aleación Ti6Al4V considerando distintas preparaciones de filo y parámetros de corte. Estos modelos han sido validados a partir de resultados experimentales obtenidos de referencias científicas internacionales.

Los resultados obtenidos confirman la necesidad de emplear elevadas densidades de mallado para poder reproducir el efecto de las distintas preparaciones de filo y la relevancia de establecer redondeos de filo adecuados a cada proceso de mecanizado. El incremento del radio de la arista de corte incrementa la robustez de la herramienta frente a determinados tipos de desgaste como el astillado, pero provoca mayores esfuerzos de corte y temperaturas que aceleran otros mecanismos de desgaste como la abrasión y la difusión. Este efecto es especialmente relevante en los procesos de mecanizado de titanio debido a que este material se vuelve extremadamente reactivo por encima de aproximadamente 600 °C.

## Palabras clave

Análisis numérico, corte ortogonal, mecanizado, Ti6Al4V, Deform 2D.

## Abstract

The microgeometry of the edge of cutting tools has a determining effect on both their lifespan and the quality of the workpiece surface finish. Significant advancements are currently being achieved in implementing techniques that allow for obtaining highly precise cutting-edge rounding, both symmetric and asymmetric. To leverage the potential of these technologies, it is necessary to determine the effect of the different types of edge rounding on tool performance as a function of cutting parameters and machined material.

In this work, two-dimensional numerical models of Ti6Al4V alloy machining processes have been developed considering different edge preparations and cutting parameters. These models have been validated using experimental results obtained from international scientific references.

The results obtained confirm the necessity of using high mesh densities to reproduce the effect of the different edge preparations and the relevance of establishing edge rounding appropriate for each machining process. Increasing the cutting-edge radius enhances the tool's robustness against certain types of wear, such as chipping. On the other hand, it also causes higher cutting forces and temperatures, which accelerate other wear mechanisms like abrasion or diffusion. This effect is especially relevant in titanium machining processes because this material becomes extremely reactive above approximately 600 °C.

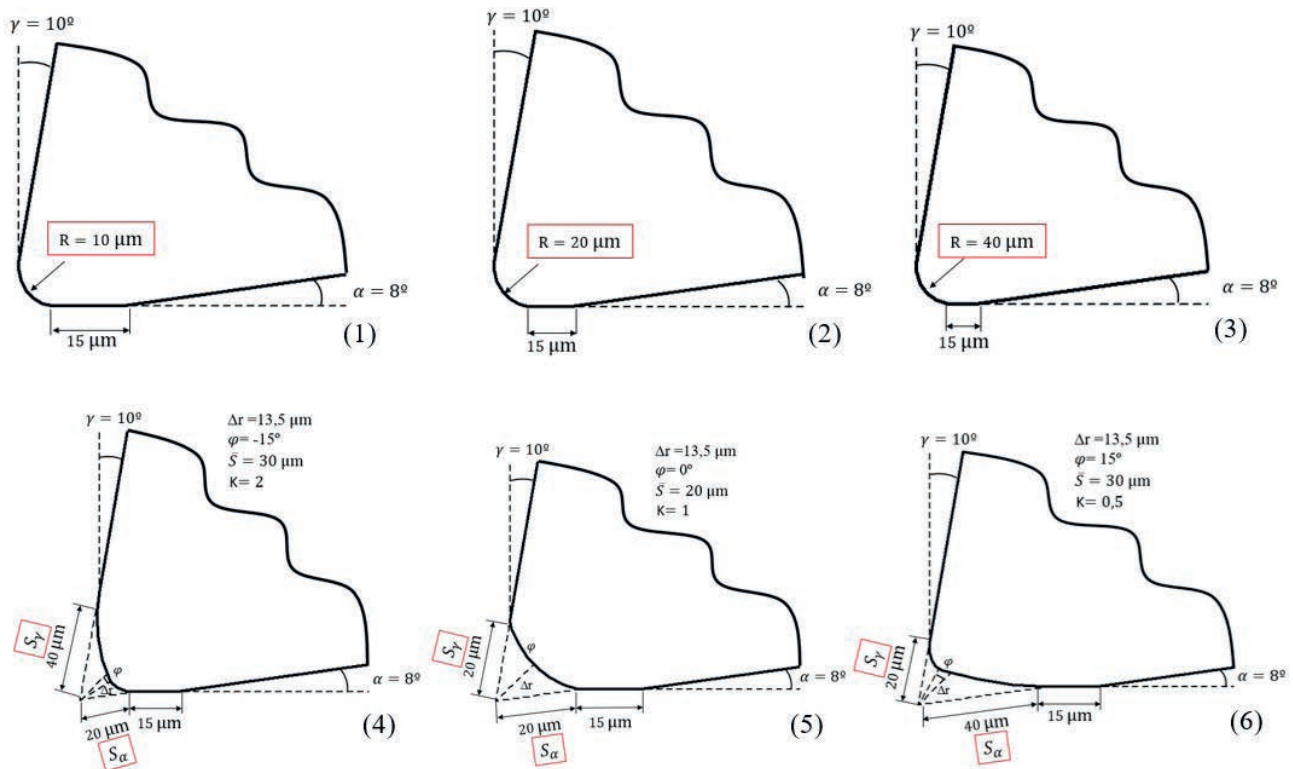
## Keywords

Finite element analysis, orthogonal cutting, machining, Ti6Al4V, Deform 2D.

Recibido/received: 03/07/2025

Aceptado/accepted: 14/10/2025

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid.  
Corresponding author: J.L. Cantero; e-mail: jcantero@ing.uc3m.es.



## 1. INTRODUCTION

One of the cutting tool characteristics that most influences the machining process is the cutting-edge microgeometry, which includes different parameters such as edge rounding, chamfering, and edge roughness. This work focuses on the analysis of the influence of edge rounding, considering both symmetric and asymmetric rounding, the latter characterized by having different rounding radii on the flank and rake faces.

Larger edge rounding is related to more robust tools and thus more resistant to wear. However, it must also be considered that variations in the edge geometry affect the material deformation and the heat generation in the cutting zone, leading to different temperature distributions in the material and the tool, as well as different pressure distributions in the tool-surface contact area. These thermomechanical effects significantly impact both the quality of the machined component and the severity of tool wear. Specifically, larger edge rounding is associated with poorer surface finishes on the workpiece and more aggressive conditions in the cutting zone for the tool. Asymmetric rounding can be an interesting option in some applications by allowing the combination of robust

edge geometries while maintaining reduced cutting forces and temperatures (Denkena & Biermann, 2014; Wyen & Wegener, 2010; Zhuang et al., 2021).

Numerous studies have shown that an adequate edge preparation can significantly prolong tool life, which contributes to the sustainability of cutting tools. For example, collaborative investigations conducted by CIRP partners evaluated various edge preparation methods in the milling of different materials, such as hardened and stainless steels, Inconel 718, and Ti6Al4V (Bouzakis, et al., 2014). These studies highlight the considerable benefits of edge preparation, especially for difficult-to-machine materials.

However, the effectiveness of the cutting-edge preparation depends on tailoring the design and process to the specific machining application, workpiece material, and thermomechanical load. The optimal cutting-edge microgeometry is largely determined by the material to be machined and the cutting conditions. Therefore, developing an adequate cutting-edge design requires extensive experimental research to optimize tool performance (Bassett, et al., 2012; Bergmann & Grove, 2018; Mativenga, et al., 2024).

With the aim of reducing the number of experimental campaigns, there

are approaches for designing and optimizing the cutting-edge microgeometry based on finite element simulations and statistical models (Biermann, et al., 2018; Li, et al., 2022; Özel & Zeren, 2007; Tiffe, et al., 2019).

In line with this approach, the present work focuses on the development of two-dimensional numerical models of orthogonal cutting machining processes of the Ti6Al4V alloy, considering different edge microgeometries and cutting parameters. These models have been validated using experimental results obtained by C.F. Wyen and K. Wegener (2010) for the orthogonal cutting of Ti6Al4V with rounded cutting edges in the range of 10 to 50 microns in radius, obtained by abrasive micro-blasting.

## 2. METHODOLOGY

For the validation of the developed numerical models, the experimental results shown in the article Influence of Cutting Edge Radius on Cutting Forces in Machining Titanium, by C. F. Wyen and K. Wegener (2010) were used. These tests consisted of turning operations with orthogonal cutting conditions, utilizing soluble cutting fluid cooling, and machining bars of the Ti6Al4V alloy. The magnitudes used for model validation were



the components of the cutting forces, which were recorded in the tests using a Kistler 9121 dynamometer. The tools tested were indexable tungsten carbide (WC-Co) insert tools manufactured with a rake angle  $\gamma = 10^\circ$ , a clearance angle  $\alpha = 8^\circ$ , and different edge preparations.

Table 1 shows the edge geometries, cutting parameters, and the corresponding cutting and thrust forces for the tests considered for model validation. As indicated in the table, the microgeometries correspond to symmetric edge rounding with a radius of 10, 20 and 40  $\mu\text{m}$ . These geometries and parameters were the ones initially modelled numerically to adjust and validate the model. Once the validation was performed, additional simulations were developed with asymmetric edge rounding geometries to determine the effect of these geometries on the main magnitudes involved in machining.

For the analysis of the numerical simulations, the variables most related to tool wear and thermomechanical damage in the machined component were considered:

- Components of the cutting forces (cutting [ $F_c$ ] and thrust [ $F_t$ ] force).
- Maximum temperature on the cutting zone.
- Pressure on the cutting tool.

### 3. DEFINITION AND VALIDATION OF THE NUMERIC MODEL

#### 3.1. Definition of the numeric model

A two-dimensional numerical model corresponding to the machining of the Ti6Al4V alloy has been developed

considering plane strain conditions. This type of modelling is an adequate approximation for modelling orthogonal cutting processes where the ratio between the depth of cut and the undeformed chip thickness is at least equal to 12. The model was defined in the DEFORM 2D programming environment based on a Lagrangian formulation with automatic remeshing, making it highly suitable for simulating processes involving large plastic deformations.

Workpiece definition: material, geometry, and mesh:

For the characterization of the workpiece material, information available in the DEFORM library for Ti6Al4V was used, which establishes the relationship between the main thermo-mechanical variables (stress, strain, strain rate, and temperature) through numerical values ordered in tables. Other material properties relevant for the simulations, such as the coefficient of thermal expansion, thermal conductivity, and specific heat for different temperatures, are also defined in the library. An elastoplastic material behaviour is established. Therefore, the material characterization used is representative of the Ti6Al4V alloy behaviour, but it is not possible to verify its suitability for the specific properties of the material bars used in the validation tests, as this information is not included in the article from which the experimental values are extracted (Wyen & Wegener, 2010).

The workpiece geometry in the model is rectangular, long (in the direction of the cutting motion), and high (corresponding to the direction

of the undeformed chip thickness).

For the workpiece meshing, isoparametric rectangular elements with four nodes were employed. Through a sensitivity mesh analysis, an adaptive meshing of the workpiece with four meshing zones of different densities was established as optimal (Fig. 1). In the chip formation zone (referred to as window 1 in figure 1), the highest mesh density was set, with element sizes of 5  $\mu\text{m}$ . The rest of the formed chip was meshed with 10  $\mu\text{m}$  elements of 10  $\mu\text{m}$  (window 2), with a sufficient density to allow analysis of the chip morphology. The machined surface was also meshed with a relatively high density, using 15  $\mu\text{m}$  elements (window 3) to allow analysis of temperatures and residual stresses due to machining. Finally, a coarser mesh was used for the rest of the material with an element size of 50  $\mu\text{m}$  (window 4). A total of approximately 10,000 elements were necessary for the material meshing.

Tool definition: material, geometry, and mesh:

Similar to the workpiece material, the information available in the DEFORM library was used for the characterization of the tool material, in this case, the one corresponding to the cutting material known as hard metal, consisting of tungsten carbide with cobalt as a binder (WC-Co). A rigid behaviour was established for the tool because its deformations are insignificant and do not significantly affect the simulation results.

Figure 2 shows the six modelled cutting-edge geometries: four with symmetric rounding and two with asymmetric rounding. Of the four symmetric rounding geometries, the first three are established with cutting edge radii of 10, 20, and 40  $\mu\text{m}$ . The last symmetric geometry is defi-

Cutting-edge geometries	Cutting process parameters		$F_c$ (N)	$F_t$ (N)
	$f_n$ (mm/rev)	$V_c$ (m/min)		
$r = 10 \mu\text{m}$	0.1	70	175	55
		30	185	62.5
	0.06	70	122.5	52.5
		30	120	50
$r = 20 \mu\text{m}$	0.1	70	180	85
	0.06	70	130	80
$r = 40 \mu\text{m}$	0.1	70	187.5	155
		30	205	150
	0.06	70	140	145
		30	147.5	137.5

Table 1. Cutting edge geometries, cutting process parameters, and cutting forces (validation tests of the model).  $V_c$ : cutting speed;  $f_n$ : feed rate;  $F_c$ : cutting force;  $F_t$ : thrust force.

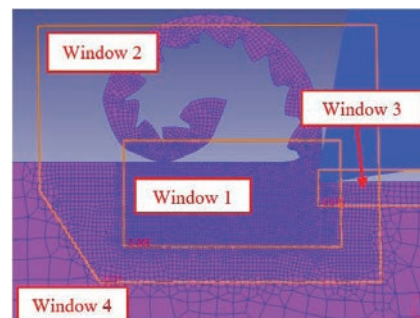


Figure 1. Windows that define the adaptive workpiece mesh.

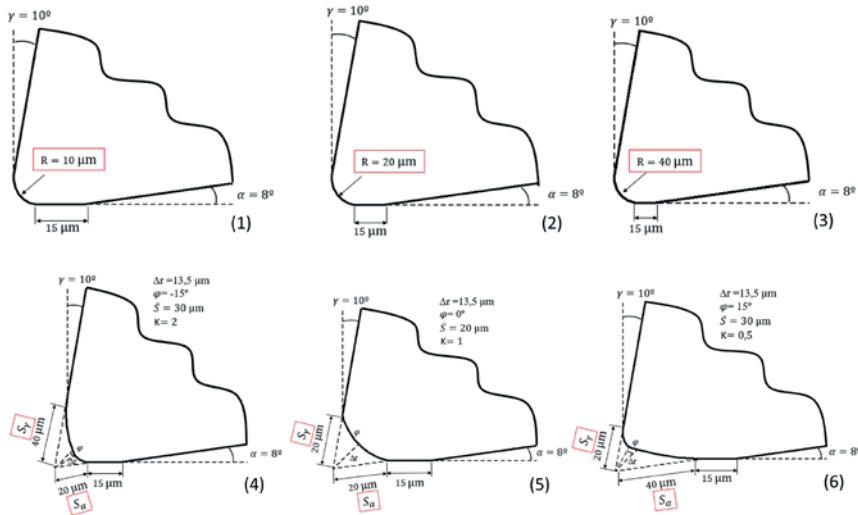


Figure 2. Cutting edge geometries considered in the numeric models: Symmetrical roundings with radii of 10  $\mu\text{m}$  (1), 20  $\mu\text{m}$  (2) and 40  $\mu\text{m}$  (3); Asymmetrical roundings with parameters  $S_a = 20 \mu\text{m}$  and  $S_y = 40 \mu\text{m}$  (4) and  $S_a = 40 \mu\text{m}$  and  $S_y = 20 \mu\text{m}$  (6); Symmetrical roundings with parameters  $S_a = 20 \mu\text{m}$  and  $S_y = 20 \mu\text{m}$  (5).

ned using the geometric parameters  $S_a$  and  $S_y$ , which are commonly used to define asymmetric rounding. For this last symmetric geometry, a value of 20  $\mu\text{m}$  was set for both parameters ( $S_a$  and  $S_y$ ), which corresponds to a cutting-edge radius of 16.91  $\mu\text{m}$ . Finally, the two asymmetric rounding modelled correspond respectively to the values ( $S_a = 20 \mu\text{m}$ ,  $S_y = 40 \mu\text{m}$ ) and ( $S_a = 40 \mu\text{m}$ ,  $S_y = 20 \mu\text{m}$ ).

Furthermore, as also reflected in figure 2, a flank wear of 15  $\mu\text{m}$  was added to the edge geometries, which corresponds to the wear that occurs in the first moments of machining, as reported by various authors. This initial wear is commonly referred to as edge stabilization or tool seating, and its value was adjusted to minimize the error of the numerical models.

For the tool meshing, elements similar to those used for the workpiece

meshing were employed. An adaptive mesh was defined using two windows: one with a dense mesh affecting the entire contact area of the tool with the chip and the machined surface, with an element size of 5  $\mu\text{m}$ , and another window encompassing the rest of the tool with an element size of 50  $\mu\text{m}$ . The total number of elements used for the tool mesh was 1,800 for all geometries.

Boundary conditions, tool-workpiece contact properties, and simulation conditions:

In the model, the cutting movement was established to be performed by the workpiece in the horizontal direction (X-axis), with its movement fixed in the Y-axis (except for the material forming the chip). The boundary conditions established for the tool consisted of preventing its movement in both directions.

The heat transfer coefficient to the environment was set at 200  $\text{N}/(\text{s}\cdot\text{m}\cdot^\circ\text{C})$  and the ambient temperature at 20  $^\circ\text{C}$ . However, these values are not very relevant since a specific sensitivity mesh analysis showed that, due to the extremely short simulation times (a few milliseconds), the effect of heat transfer to the environment is negligible.

The tool-material heat transfer coefficient was established at 45  $\text{N}/(\text{s}\cdot\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ , and the distribution of the heat generated at the interface was set at 50 % for the workpiece and 50 % for the tool.

For the material-tool contact, two friction laws were established depending on the zone considered. In the zone corresponding to the cutting edge and the rake face up to a point aligned with the undeformed chip thickness, an adhesion contact law with a shear factor  $m = 1$  was considered. On the rest of the surfaces, Coulomb friction type contact conditions with a coefficient  $\mu = 0.5$  were established. These conditions were defined based on the consulted scientific literature.

In relation to the simulation conditions, a 2  $\mu\text{m}$  feed per step was defined, which is suitable for the size of the elements used for meshing the chip formation zone.

### 3.2. Validation of the numeric model

As indicated in section 2, the validation of the numerical model was performed using the forces values experimentally obtained under the 10 conditions defined in Table 1. Figure 3 and figure 4 show the corresponding experimental and numerical cutting and thrust for-

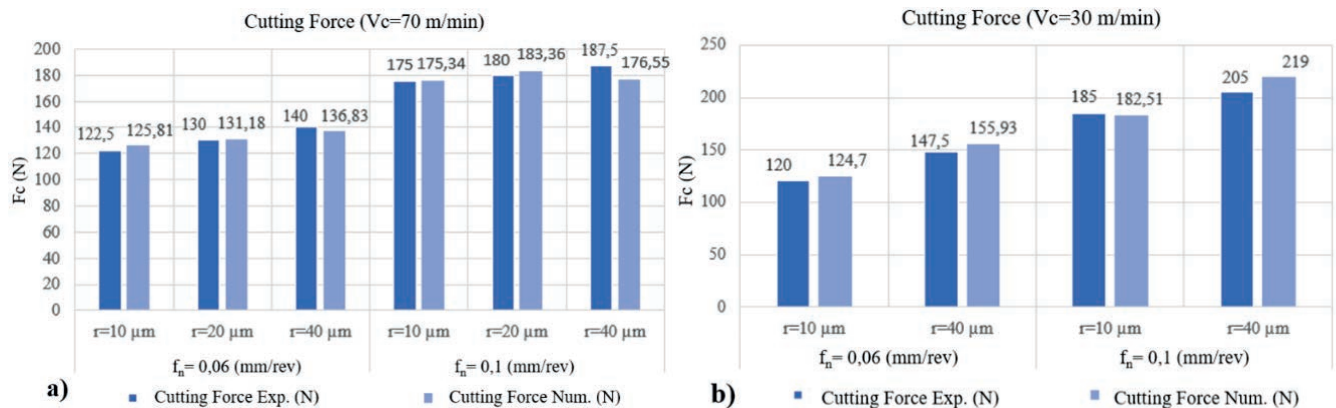


Figure 3. Experimental and numerically obtained cutting forces ( $F_c$ ) for the 10 conditions considered for model validation. a) Cutting force for cutting speed  $V_c = 70 \text{ m/min}$ ; b) Cutting force for cutting speed  $V_c = 30 \text{ m/min}$ .

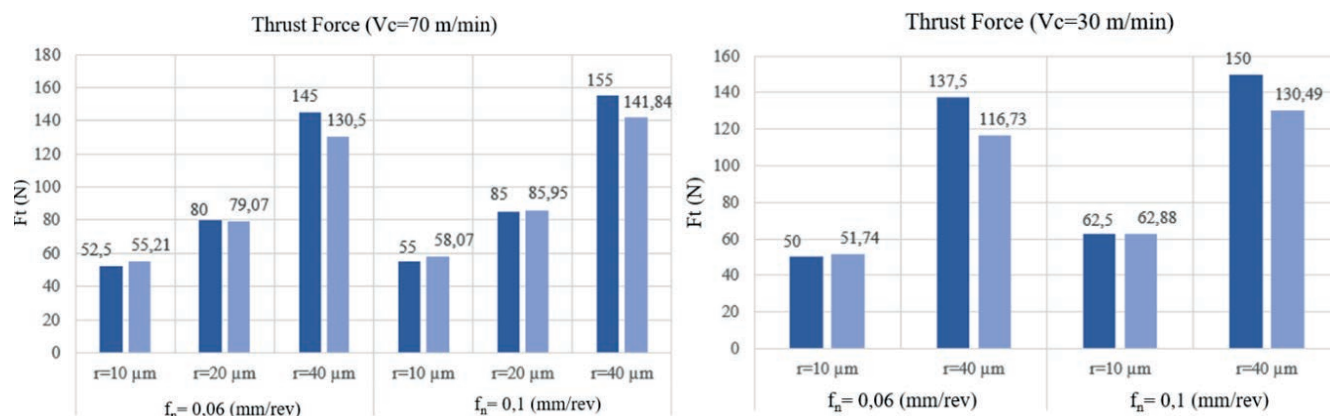


Figure 4. Experimental and numerically obtained thrust forces ( $F_t$ ) for the 10 conditions considered for model validation. a) Thrust force for cutting speed  $V_c = 70$  m/min; b) Thrust force for cutting speed  $V_c = 30$  m/min.

ce values, generally showing a good correlation. The relative prediction errors for the cutting force have an average value of 3.17 %, and those for the thrust force have an average value of 6.37 %. The maximum error reached was 15.11 % and occurred for the test with the tool having the largest rounding radius (40  $\mu m$ ) and the lowest cutting speed and feed rate (30 m/min and 0.06 mm/rev, respectively). These errors are reasonable for nume-

rical models of machining processes.

## 4. RESULTS

The main results obtained from the developed numerical models are shown below.

### 4.1. Cutting forces components

The graphs in figure 5 show the effect of the edge radius and feed rate for three of the symmetric edge rounding geometries.

The effect of increasing the edge radius results in a high rise in thrust force due to the ploughing force caused by the elastic recovery of the material on the tool's flank face. Specifically, the thrust force for the largest rounding is 2.4 times higher than the thrust force obtained with the tool of the smallest rounding. The cutting force is much less affected by the edge rounding radius.

The graphs in figure 6 show ana-

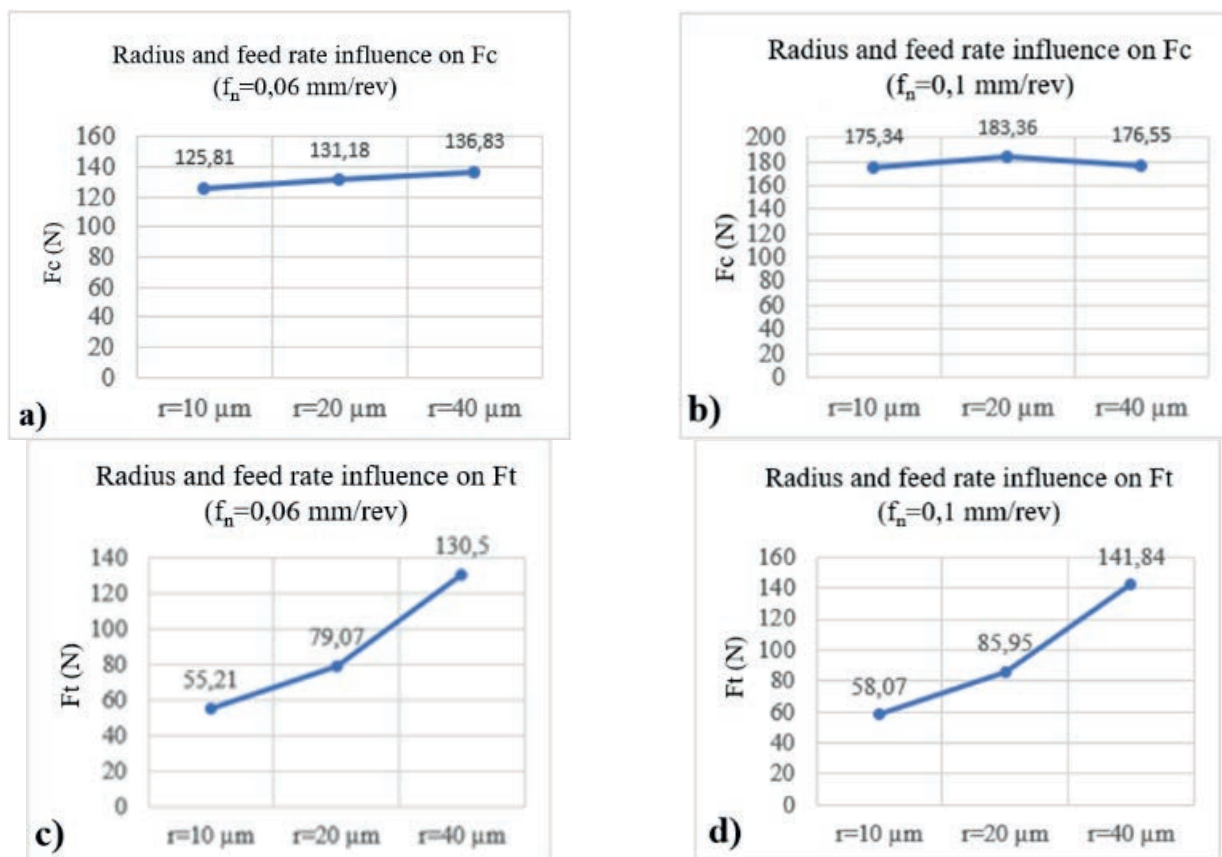


Figure 5. Influence of the cutting-edge radius and the feed rate on the cutting force and the thrust force for tools with symmetric rounding. a) Radius and feed influence on cutting force ( $F_c$ ) for the feed rate  $f_n = 0.06$  mm/rev; b) radius and feed influence on cutting ( $F_c$ ) for the feed rate  $f_n=0.1$  mm/rev; c) radius and feed influence on thrust force ( $F_t$ ) for the feed rate  $f_n=0.06$  mm/rev; d) radius and feed influence on thrust force ( $F_t$ ) for the feed rate  $f_n = 0.1$  mm/rev.



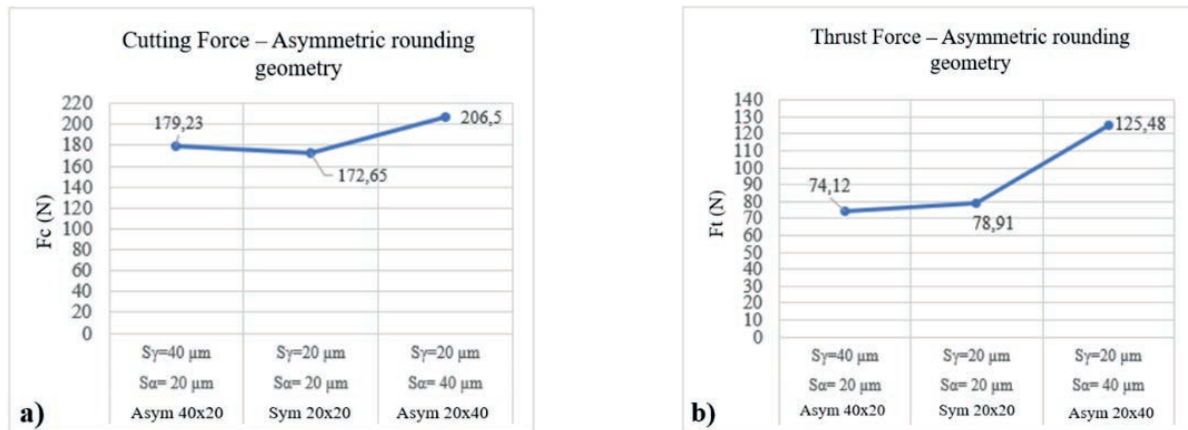


Figure 6. Influence of the edge geometry and the feed rate on the cutting force and the feed force for the 2 asymmetric rounded tools and the symmetric rounded tool of the same value. a) Cutting force ( $F_c$ ) results for the different asymmetric rounding geometries Figure 2: (4), (5) and (6); b) thrust force ( $F_t$ ) results for the different asymmetric rounding geometries figure 2: (4), (5) and (6).

logous information, but for the two

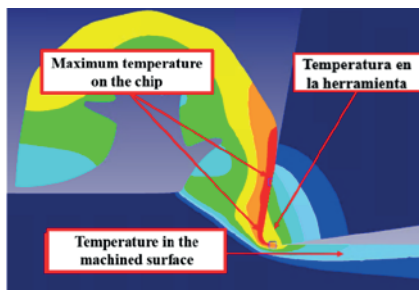


Figure 7. Temperature distribution in the cutting zone corresponding to the model with symmetric rounding of radius = 10  $\mu\text{m}$ ,  $V_c$  = 70 m/min and  $f_n$  = 0.1 mm/rev.

asymmetric edge rounding geometries and for the symmetric rounding geometry of the same value.

The most notable trend observed is that the asymmetric rounded tool ( $S_\alpha$  = 20  $\mu\text{m}$ ,  $S_\gamma$  = 40  $\mu\text{m}$ ) exhibits thrust and cutting forces very similar to the symmetric rounded tool ( $S_\alpha$  = 20  $\mu\text{m}$ ,  $S_\gamma$  = 20  $\mu\text{m}$ ). However, for the asymmetric tool geometry

( $S_\alpha$  = 40  $\mu\text{m}$ ,  $S_\gamma$  = 20  $\mu\text{m}$ ), the thrust forces obtained are a 60 % higher and the cutting forces are 18 % greater. This result confirms the advantage of using tools with asymmetric edge rounding (in this case with geometries that satisfy  $S_\gamma > S_\alpha$ ) because they allow for the combination of moderate cutting forces with increased edge robustness.

#### 4.2. Maximum temperature in the cutting zone

Due to the numerical simulations corresponding to extremely short cutting times (a few milliseconds), the temperature in the tool does not stabilize, reaching values much lower than those typical of titanium alloy machining. Therefore, the maximum temperatures in the cutting zone occur in the chip, specifically in the chip-tool contact area (Fig. 7).

Figure 7. Temperature distribution in the cutting zone corresponding to the model with symmetric rounding of radius = 10  $\mu\text{m}$ ,  $V_c$  = 70 m/min and  $f_n$

= 0.1 mm/rev.

Figure 8 shows the maximum temperatures reached in the cutting zone for different simulations performed with tools with symmetric rounding and with tools with asymmetric rounding.

For tools with symmetric rounding edges (Fig. 8a), it is observed that increasing the cutting speed from 30 m/min to 70 m/min results in maximum temperatures in the cutting zone that are up to 20 % higher. The increase in feed rate leads to much smaller temperature increases (a maximum increase of 5 %). Larger edge rounding radius cause increases in the maximum temperature of up to 16 %.

Regarding the effect of using asymmetric rounding, figure 8b shows as an example, for the simulations with a cutting speed of 70 m/min and a feed rate of 0.1 mm/rev, the maximum temperatures for the three edge geometries considered, with no significant effect being observed.

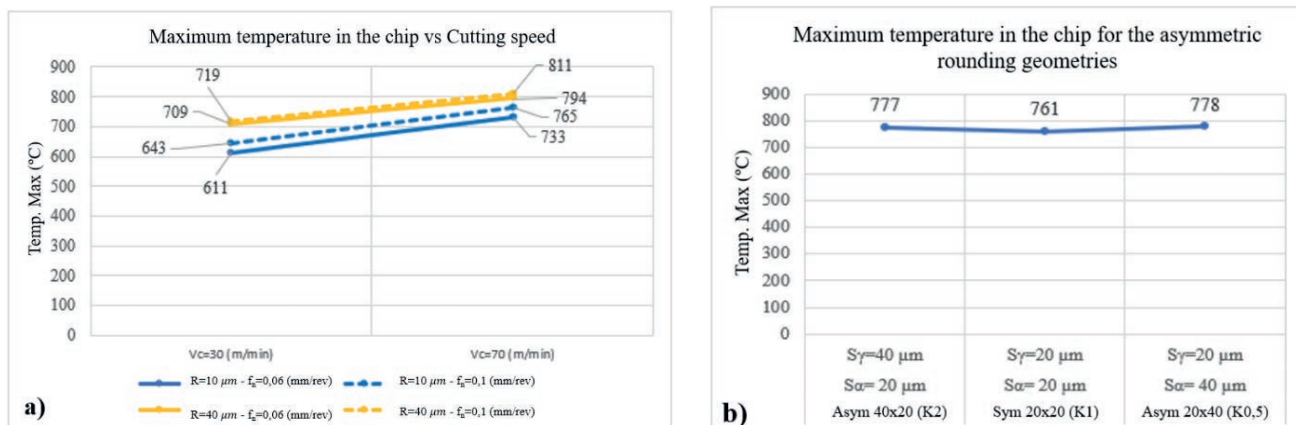


Figure 8. Maximum temperature reached in the cutting zone; a) for tools with symmetric rounding and b) for tools with asymmetric rounding (for the cutting parameters  $V_c$  = 70 m/min;  $f_n$  = 0.1 mm/rev).

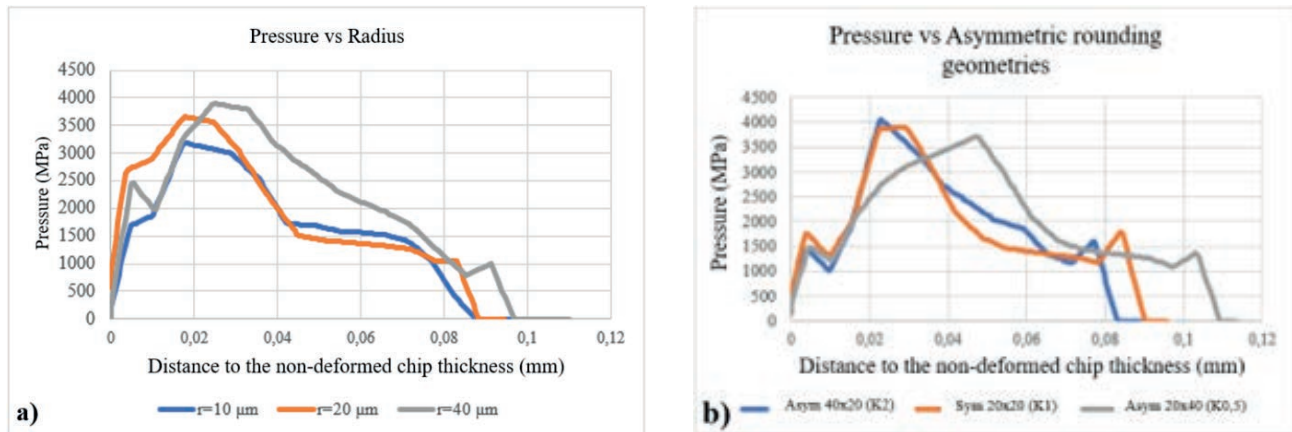


Figure 9. Normal pressure distribution as a function of the distance to the end of the machined surface-tool contact; a) for tools with symmetric rounding and b) for tools with asymmetric rounding.

### 4.3. Pressure on the cutting tool

Finally, the pressure exerted by the material on the tool, perpendicular to its profile, and distributed between the rake face and the flank face, is analysed. This magnitude is highly relevant due to its important effect on tool wear.

The behaviour is similar for the different cutting parameters considered, so the results corresponding to the simulations performed with  $V_c = 70\text{ m/min}$  and  $f_n = 0.1\text{ mm/rev}$  are shown as an example. Figure 9 shows how the pressure on the tool varies as a function of the distance to the point where the tool loses contact with the machined surface, for the different edge geometries considered.

Figure 9. Normal pressure distribution as a function of the distance to the end of the machined surface-tool contact; a) for tools with symmetric rounding and b) for tools with asymmetric rounding.

For tools with symmetric rounded edges (Fig. 9a), it is observed that the increase in the edge radius causes a small increase in the tool-material contact length and a significant increase in the maximum pressure value of up to 25 %.

Tools with asymmetric rounding (Fig. 9a) show less significant variations in the maximum pressure, being 9 % lower for the  $S_a = 40\ \mu\text{m}$  and  $S_\gamma = 20\ \mu\text{m}$  geometry. Nevertheless, this geometry presents a tool-material contact length almost 30 % greater than the one observed for the simulation with the  $S_a = 20\ \mu\text{m}$  and  $S_\gamma = 40\ \mu\text{m}$  geometry.

## 5. CONCLUSION

The main conclusions that can be drawn from the described work are the following:

- A two-dimensional numerical model corresponding to the machining of the Ti6Al4V alloy has been developed, considering different cutting-edge geometries with symmetric and asymmetric rounding. The experimental validation carried out generally indicates a good correlation, with average errors obtained for the cutting force of 3.16 % and for the thrust force of 6.37 %.
- The analysis of the machining forces confirms the value of using tools with asymmetric edge rounding, as appropriate configurations exhibit moderate machining forces combined with greater edge robustness.
- For tools with symmetric rounding, the maximum temperature in the cutting zone increases significantly as the edge radius increases. However, using asymmetric rounding does not have a relevant effect on this temperature.
- For tools with symmetric rounding, the maximum normal pressure exerted by the material on the tool increases by up to 25 % when the rounding radius is increased from 10 to 40  $\mu\text{m}$ . Tools with asymmetric rounding show less significant variations in the maximum pressure, but significant changes are observed in the tool-material contact length.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge the help and financial support of the State Research Agency (Agencia Estatal de Investigación) through Project PID2023-151610OB-C21 funded by MICIU/

AEI/10.13039/501100011033 and FEDER/UE.

Los autores agradecen la ayuda y el soporte financiero de la Agencia Estatal de Investigación a través del Proyecto PID2023-151610OB-C21 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 and FEDER/UE.

## REFERENCES

- Bassett, E., Köhler, J. & Denkena, B. (2012). On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of AISI1045 with coated WC-Co inserts. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 5(2), 108-126. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2012.03.004>
- Bergmann, B. & Grove, T. (2018). Basic principles for the design of cutting edge roundings. *CIRP Annals*, 67(1), 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.019>
- Biermann, D., Amuth, R., Hess, S. & Tiffe, M. (2018). Simulation based analysis and optimisation of the cutting edge micro shape for machining of nickel-base alloys. *Procedia CIRP*, 67, 284-289. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.214>
- Bouzakis, K. D., Bouzakis, E., Kombogiannis, S., Makrimalakis, S., Skordaris, G., Michailidis, N., et al. (2014). Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7(3), 264-273. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.05.003>
- Denkena, B. & Biermann, D. (2014). Cutting edge geometries. *CIRP*

- Annals, 63(2), 631-653. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.009>
- Li, B., Zhang, S., Du, J. & Sun, Y. (2022). State-of-the-art in cutting performance and surface integrity considering tool edge micro-geometry in metal cutting process. *Journal of Manufacturing Processes*, 77, 380-411. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.037>
- Mativenga, P., Schoop, J., Jawahir, I. S., Biermann, D., Kipp, M., Kilic, Z. M., et al. (2024). Engineered design of cutting tool material, geometry, and coating for optimal performance and customized applications: A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 52, 212-228. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.06.001>
- Özel, T. & Zeren, E. (2007). Finite element modeling the influence of edge roundness on the stress and temperature fields induced by high-speed machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35(3-4), 255-267. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0720-2>
- Tiffe, M., Afmuth, R., Saelzer, J. & Biermann, D. (2019). Investigation on cutting edge preparation and FEM assisted optimization of the cutting-edge micro shape for machining of nickel-base alloy. *Production Engineering*, 13(3-4), 459-467. <https://doi.org/10.1007/s11740-019-00900-8>
- Wyen, C. F. & Wegener, K. (2010). Influence of cutting-edge radius on cutting forces in machining titanium. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1), 93-96. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.056>
- Zhuang, K., Fu, C., Weng, J. & Hu, C. (2021). Cutting edge micro-geometries in metal cutting: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116(7-8), 2045-2092. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07558-6>



# Estudio del comportamiento vibratorio de vigas dañadas de material compuesto mediante redes neuronales artificiales

Study of the vibration behaviour of damaged composite beams using artificial neural networks

Patricia Rubio Herrero<sup>1</sup>, Belén Muñoz-Abella<sup>1</sup>, Inés Iváñez del Pozo<sup>2</sup>, Lourdes Rubio Ruiz de Aguirre<sup>1</sup>

## Resumen

Las vigas rotatorias son simplificaciones de componentes mecánicos más complejos, característicos de áreas estratégicas, como palas de aerogeneradores. Si la viga presenta un defecto, este modifica su comportamiento dinámico y los valores de las frecuencias naturales. En este estudio, se presenta una metodología basada en redes neuronales artificiales (RNA) que permite calcular el valor de las cuatro primeras frecuencias naturales de vigas dañadas de material compuesto que combinan pieles de polímeros reforzados con fibra de carbono y núcleo de nido de abeja en función de la velocidad de rotación y de las características del defecto (tamaño y localización). Los datos requeridos para entrenar la RNA se han obtenido a partir de un modelo numérico dinámico tridimensional de una viga sándwich que presenta una discontinuidad transversal en el núcleo. Las frecuencias naturales de la viga se han obtenido aplicando la transformada rápida de Fourier a las aceleraciones calculadas por el modelo. La RNA propuesta presenta una excelente alternativa para el análisis de la respuesta vibratoria de vigas sándwich dañadas, ya que es eficiente y fácil de usar, a la vez que tiene un bajo coste computacional.

## Palabras clave

Vigas rotatorias dañadas, frecuencias naturales, material compuesto, defecto en el núcleo y redes neuronales artificiales.

## Abstract

Rotating beams are simplifications of more complex mechanical components, characteristic of strategic areas, such as wind turbine blades. If the beam has a defect, this modifies its dynamic behaviour and natural frequency values. This study presents a methodology based on artificial neural networks (ANNs) that allows the calculation of the values of the first four natural frequencies of damaged composite beams formed by carbon fibre reinforced polymer ace-sheets and a honeycomb core as a function of the rotation speed and the characteristics of the defect (size and location). The data required to train the ANN has been obtained from a three-dimensional dynamic numerical model of a sandwich beam with a transverse discontinuity in the core. The natural frequencies of the beam have been obtained by applying the fast Fourier transform to the accelerations calculated by the model. The proposed ANN is an excellent alternative for analysing the vibrational response of damaged sandwich beams, as it is efficient and easy to use, while also having a low computational cost.

## Keywords

Damaged rotating beams, natural frequencies, composite material, core defect, and artificial neural networks.

Recibido/received: 03/07/2025

Aceptado/accepted: 27/10/2025

<sup>1</sup>Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid.

<sup>2</sup>Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad Carlos III de Madrid.

Autor para correspondencia: Patricia Rubio Herrero; e-mail: prubio@ing.uc3m.es.



Foto: Shutterstock.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables se distinguen por su reducido impacto ambiental ya que, a diferencia de los combustibles fósiles, no afectan al cambio climático. Una de las fuentes de energía renovables con mayor potencial es la energía eólica, cuyo crecimiento está experimentando un notable impulso. Las palas son uno de los elementos constitutivos principales de los sistemas de energía eólica. Su integridad estructural puede verse amenazada por la presencia de defectos, que pueden dar lugar a roturas catastróficas y a elevados costes de mantenimiento. Por ello, es fundamental contar con técnicas de detección de defectos que faciliten la implementación de planes de mantenimiento adecuados, evitando así pérdidas derivadas del fallo total del sistema.

Normalmente, al abordar el estudio dinámico de este tipo de elementos, las palas con geometrías complicadas se modelan habitualmente de manera simplificada utilizando vigas rotatorias. En las últimas décadas, numerosos autores han estudiado la detección de defectos en compo-

nentes mecánicos (Chen, 1988; Kim, 2003; Ozdemir, 2014; Lee, 2017; Valverde-Marcos, 2022; Bhat, 1986). No obstante, son pocos los estudios dedicados a la estimación de defectos en palas rotatorias dañadas. La presencia del defecto modifica el comportamiento dinámico de la viga y, entre otros, modifica los valores de las frecuencias naturales, por lo que su variación es habitualmente utilizada para determinar la aparición de un defecto. En el caso de las vigas rotatorias, el comportamiento dinámico en el plano de giro (chordwise) y fuera de él (flapwise), depende de la fuerza centrífuga que aparece debida a la rotación, y que es variable con la distancia al centro de giro. La aparición de esta fuerza introduce un aumento de la frecuencia natural en ambos planos (Chen, 1988; Bhat, 1986). Por otra parte, si la viga giratoria contiene un defecto, se produce un aumento de la flexibilidad que se traduce en la disminución de las frecuencias naturales. La compensación de ambos efectos puede dificultar la detección del daño (Chen, 1988).

Asimismo, la mayoría de las in-

vestigaciones se han centrado en el estudio de palas hechas de materiales convencionales (Lee, 2017; Valverde-Marcos, 2022; Bhat, 1986). Sin embargo, las palas de aerogeneradores normalmente se fabrican con materiales compuestos y la detección de fallos en vigas rotatorias de material compuesto dañado es un campo menos explorado (Kim, 2003; Ozdemir, 2014). Se suelen utilizar estructuras sándwich, formadas por pieles de laminados de fibra de vidrio (GFRP) y núcleos de espuma polimérica (foam). No obstante, con el aumento del tamaño de los aerogeneradores, surge la necesidad de emplear materiales más ligeros, pero igualmente resistentes para las palas, con el fin de reducir su peso. Por esta razón, en este estudio se ha optado por estructuras sándwich que combinan núcleos de nido de abeja (honeycomb) y pieles de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP). Para el núcleo, se propone el uso de núcleos de nido de abeja, que consisten en celdas unitarias unidas de forma similar a un panal de abejas, lo que minimiza la cantidad de material utilizado, re-

duciendo así el peso y proporcionando una excelente resistencia (Sezgin, 2008), y para las pieles, se proponen materiales compuestos de fibra de carbono (CFRP) que poseen un reducido peso y unas excelentes propiedades mecánicas (Marsh, 2005). En cuanto a la detección de defectos en vigas rotatorias fabricadas con este tipo de materiales, los autores no han encontrado estudios previos en la literatura disponible.

Las redes neuronales artificiales (RNA) son sistemas computacionales inspirados en la estructura y el funcionamiento del cerebro humano y el sistema nervioso biológico. Su propósito principal es aprender a partir de grandes cantidades de datos para reconocer patrones, clasificar información y predecir resultados, de una manera similar a como lo hace la inteligencia humana. Están compuestas por varias capas: una capa de entrada, capas intermedias denominadas ocultas y una capa de salida. A través de un proceso de entrenamiento aprenden a establecer la relación entre los datos de entrada y los de salida. Las RNA constituyen una herramienta ampliamente adoptada en el campo de la ingeniería por muchos investigadores y han demostrado ser útiles en la detección y en la identificación de defectos en componentes mecánicos (Sekhar, 2008; Youngho, 2012).

En este trabajo, se ha utilizado una RNA para determinar las frecuencias naturales de una viga rotatoria de material compuesto con pieles de polímeros reforzados con fibra de carbono y núcleo de nido de abeja que presenta una discontinuidad transversal en el núcleo. Para ello, se ha desarrollado un modelo 3D de elementos finitos en el código Abaqus/Implicit de una viga rotatoria de material compuesto y se han estudiado en detalle sus características vibratorias en función del tamaño, la localización de la discontinuidad y la velocidad de rotación. Se ha elegido la aceleración de un punto de la sección ubicado en el extremo de la viga como señal de salida del modelo numérico. La señal ha sido procesada para obtener las frecuencias de la viga rotatoria. A partir de los datos del modelo numérico, se ha derivado la RNA. La metodología propues-

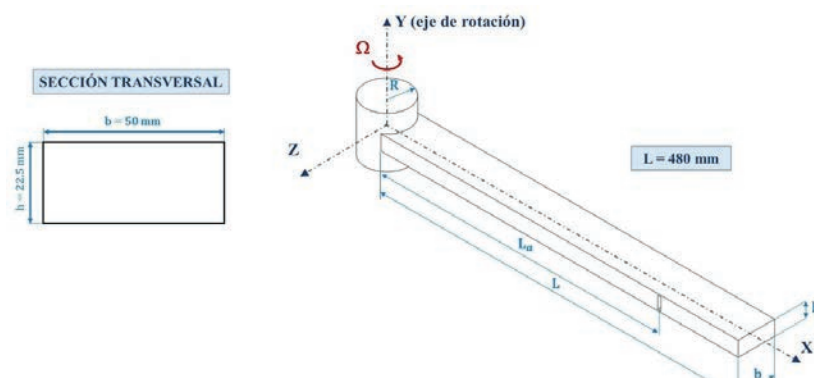


Figura 1. Modelo geométrico.

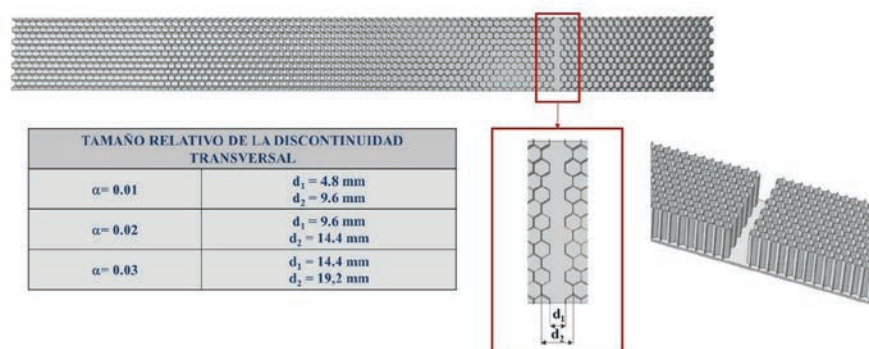


Figura 2. Diferentes tamaños de la discontinuidad transversal.

ta ofrece una excelente opción para analizar las vibraciones de vigas rotatorias dañadas fabricadas con estructuras sándwich formadas por pieles de CFRP y un núcleo de nido de abeja y se podría utilizar como base para el futuro desarrollo de un algoritmo de detección e identificación de defectos.

## 2. MODELO DE LA VIGA ROTATORIA DAÑADA

### 2.1 Modelo geométrico

Se ha considerado una viga rotatoria fabricada de material compuesto que combina pieles de laminados de fibra de carbono (CFRP) y núcleo de nido de abeja (*honeycomb*) de Nomex®, cuyas dimensiones pueden verse en la figura 1. La viga gira con sentido antihorario alrededor del eje de revolución Y con velocidad angular constante  $\Omega$  y presenta una discontinuidad en el núcleo a una distancia  $L_a$  del extremo de la viga.

Se ha analizado el comportamiento vibratorio en función de las siguientes variables:

- **El tamaño relativo de la discontinuidad  $\alpha = d_1/L$ .** Se han considerado diferentes tamaños

relativos de la discontinuidad en el núcleo:  $\alpha = 0, 0,01, 0,02$  y  $0,03$ ; el valor  $\alpha = 0$  corresponde a una viga intacta. La figura 2 muestra la geometría de la discontinuidad transversal.

- **La ubicación relativa de la discontinuidad  $\xi = L_a/L$ .** Se han considerado las siguientes ubicaciones:  $\xi = 0,14, 0,355, 0,57$  y  $0,785$ .
- **La velocidad de giro  $\Omega$ .** Se han considerado 8 velocidades de giro de la viga ( $\Omega = 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90$  y  $100 \text{ rad/s}$ ).

La viga sándwich está formada por dos pieles exteriores de CFRP y núcleo de nido de abeja de Nomex®. Las pieles constan de un laminado de 16 láminas de fibra de carbono en matriz epoxi, IM7/MTM-45-1 con una secuencia de apilamiento igual a  $[0/+45/90/-45]_2S$  (Ridgard, 2008). El núcleo de nido de abeja está fabricado en Nomex® con denominación ANA-3.2, y está formado por celdas hexagonales y huecas, con una densidad nominal de  $48 \text{ kg/mm}^3$  (Honeycom, 2023). En la tabla 1 se muestran las propiedades de las pieles y del núcleo. Las direcciones 1, 2 y 3 coinciden con las direcciones X, Y y Z, respectivamente.



Láminas fibra de carbono		Nomex®	
Densidad	1.600 kg/m³	Densidad	1.500 kg/m³
Módulo de Young $E_1$	173 GPa	Módulo de Young $E_1$	3,95 GPa
Módulo de Young $E_2 = E_3$	73,6 GPa	Módulo de Young $E_2$	5,05 GPa
Coefficiente de Poisson $\nu_{12}$	0,32	Coefficiente de Poisson $\nu_{12}$	0,2
Coefficiente de Poisson $\nu_{13} = \nu_{23}$	0,5	Módulo de cortadura $G_{12}$	1,6 GPa
Módulo de cortadura en el plano $G_{12}$	3,89 GPa	Módulo de cortadura $G_{13}$	1,6 GPa
Módulo de cortadura fuera del plano $G_{13}$	3,89 GPa	Módulo de cortadura $G_{23}$	1,6 GPa
Módulo de cortadura fuera del plano $G_{23}$	2,94 GPa		

Tabla 1. Propiedades de las pieles y del núcleo

2.2 Modelo numérico

El estudio numérico se ha llevado a cabo mediante el código de elementos finitos Abaqus Implicit dynamics (Abaqus, 2007). Se ha realizado un modelo 3D dinámico de la viga sándwich rotaria. El modelo consta de varios sólidos con diferentes propiedades y tamaños (Fig. 3A):

- **Viga sándwich:** con propiedades de sólido deformable que, a su vez, presenta dos regiones bien diferenciadas de materiales diferentes (pieles de material compuesto y núcleo de nido de abeja de Nomex®) (Fig. 4). Su longitud es de 480 mm.
- **Parte rígida:** con propiedades de sólido que permite simular un eje físico de rotación. Su longitud es de 30 mm.

Ambos sólidos se unen con una interacción tipo *tie*, nomenclatura de Abaqus, que impide el desplazamiento relativo entre ambos. De igual

manera, como se puede ver en la figura 3B, las pieles y el núcleo de la viga sándwich se unen mediante una interacción *tie*.

La velocidad de giro se ha modelado como un campo predefinido constante de velocidad angular sobre toda la viga y se ha definido un tiempo de simulación de los modelos suficiente para estudiar siete revoluciones completas de la viga, ya que con estas se alcanza la convergencia de los resultados, y se genera un dato cada 100  $\mu$ s.

Con relación al mallado, se han utilizado tres tipos de elementos (Fig. 4). Para la parte rígida, se han usado elementos rígidos triangulares lineales de tres nodos (R3D3 según la nomenclatura de Abaqus). Para las pieles, se han utilizado elementos hexaédricos de ocho nodos, de integración reducida y control de *hourglass* (SC8R según la nomenclatura

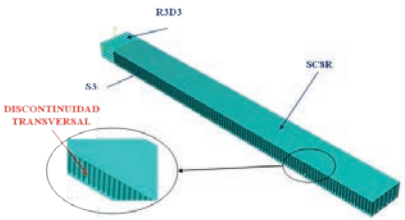


Figura 4. Mallado utilizado.

tura de Abaqus). Por último, para el modelado del núcleo de nido de abeja, se han utilizado elementos tipo membrana (Shell) triangulares lineales de tres nodos (S3 según la nomenclatura de Abaqus). La malla del modelo comprende, aproximadamente, 100.000 elementos y 160.000 nodos. Para determinar su tamaño adecuado se ha realizado un análisis de sensibilidad hasta observar una convergencia de los resultados.

2.3 Obtención de las frecuencias

La obtención de las frecuencias naturales a partir del modelo numérico se ha realizado mediante un análisis en el dominio de la frecuencia de las aceleraciones en la dirección Y del extremo libre de la viga. La figura 5 muestra un ejemplo de la aceleración obtenida para una viga que presenta un agujero de tamaño relativo  $\alpha = 0,01$  y que gira a  $\Omega = 60$  rad/s.

En las primeras revoluciones de la viga hay una etapa transitoria de mayor amplitud en el histórico de aceleración. Obsérvese que la escala de los ejes se ha modificado para facilitar la comprensión de cada fase. El procesamiento de la señal se ha hecho mediante la transformada rá-

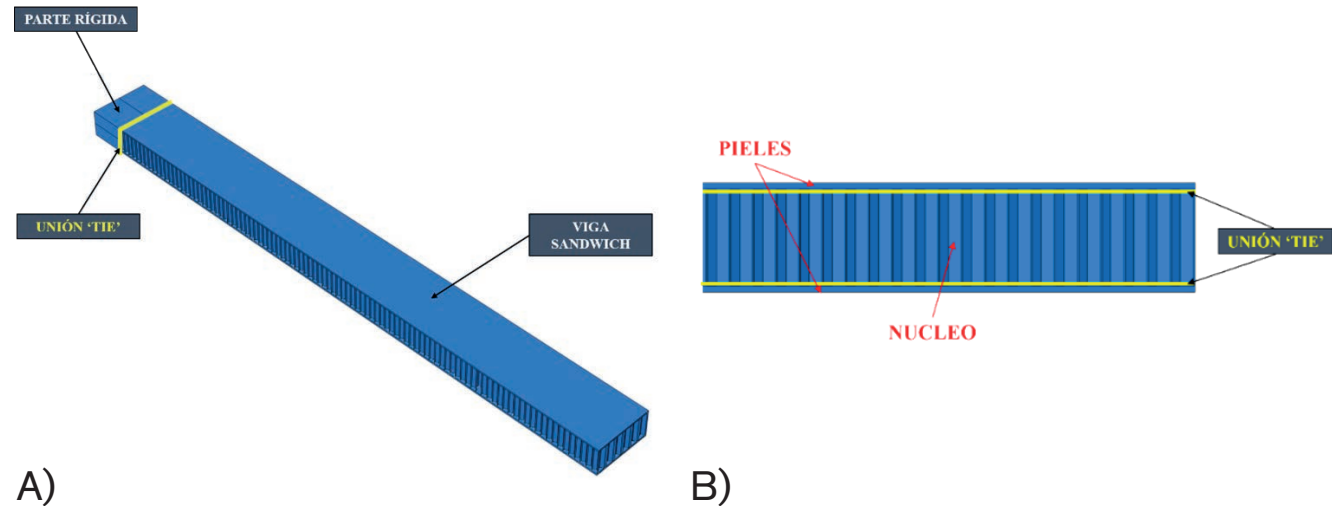


Figura 3. Detalle de las partes que componen la viga sándwich.



Modo	$w$ (Hz)	$w$ Pourriahi <i>et al.</i> (Hz)	Error relativo (%)
Modo 1	1.244,5	1.235,2	0,75
Modo 2	3.062,5	3.041,5	0,69
Modo 3	5.336,1	5.377,1	0,77

Tabla 3. Comparación con las frecuencias obtenidas por Pourriahi et al. (Pourriahi et al., 2022)

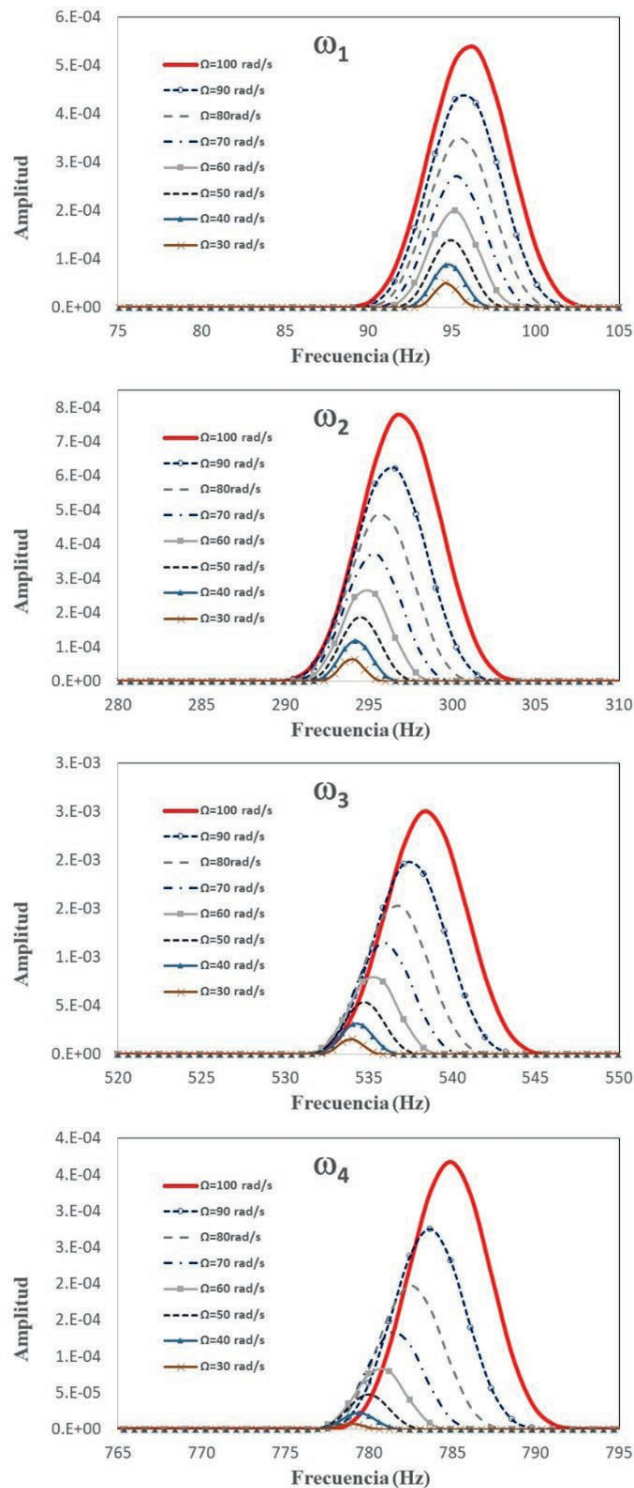


Figura 7. Frecuencias naturales y sus amplitudes para las diferentes velocidades de rotación de una viga con un defecto de  $\xi = 0,785$  y  $\alpha = 0,02$ .

#### 4. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MODELO NUMÉRICO

Una vez validado el modelo numérico, se obtuvieron las cuatro primeras frecuencias naturales para todos los casos considerados. En la figura 7 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos para la localización del defecto  $\xi = 0,785$  y para su tamaño  $\alpha = 0,02$ . Se ha representado la amplitud en función de la frecuencia para las cuatro primeras frecuencias naturales para las distintas velocidades de giro. Se puede observar cómo a medida que aumenta la velocidad de giro incrementa el valor de la amplitud y de frecuencia natural, lo que tiene sentido, ya que al aumentar la velocidad de giro, se incrementa la rigidez de la viga. Esta diferencia es más notable a partir de la segunda frecuencia natural. Estos resultados son análogos a los obtenidos para la viga intacta y para el resto de vigas dañadas.

A continuación, para analizar la influencia del tamaño y la ubicación de la discontinuidad, se ha representado la frecuencia en función de la localización de la discontinuidad para sus distintos tamaños relativos. La figura 8 muestra un ejemplo de los resultados para las cuatro frecuencias naturales y para la velocidad de rotación  $\Omega = 100$  rad/s. A la vista de los resultados, que son análogos a los obtenidos para las demás velocidades de rotación, puede concluirse lo siguiente:

- Para todos los casos considerados, la presencia de la discontinuidad transversal reduce el valor de las frecuencias naturales debido a un aumento de la flexibilidad local (Dimarogonas, 1996).
- En el caso de la primera frecuencia natural, se observa que el efecto del defecto es menor cuanto más alejado se encuentra del eje de giro.
- Para la segunda frecuencia natural se observa que para  $\xi = 0,14$  se encuentra el mínimo en el valor de la frecuencia para todos los tamaños, mientras que en alrededor de  $\xi = 0,355$  la frecuencia no sufre ninguna variación en función de la gravedad del defecto. Esto puede deberse a la presencia de un nodo en esa localización.
- En cuanto a la tercera frecuencia natural, se puede ver que el míni-



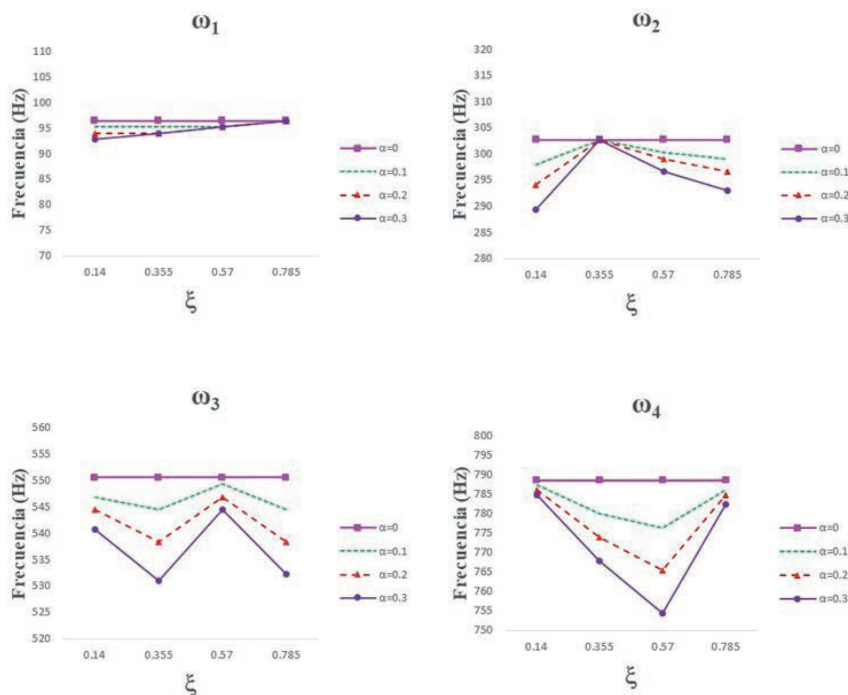


Figura 8. Frecuencias naturales en función de la posición relativa de la discontinuidad para los diferentes tamaños de la discontinuidad y para la velocidad de rotación  $\Omega = 100$  rad/s.

mo en el valor de la frecuencia se encuentra para todos los tamaños para las localizaciones  $\xi = 0,355$  y  $\xi = 0,785$ , mientras que en  $\xi = 0,57$  la frecuencia apenas varía en función de la gravedad del defecto también debido a la presencia de un nodo cercano a esa localización.

- Por último, para la cuarta frecuencia natural, el mínimo en el valor de la frecuencia para todos los tamaños se encuentra en la ubicación  $\xi = 0,57$ . En las localizaciones  $\xi = 0,14$  y  $\xi = 0,785$  la frecuencia prácticamente no varía con el tamaño de la disconti-

nuidad.

- En resumen, observando en conjunto las gráficas de la figura 8, se puede deducir que las frecuencias naturales son posibles parámetros válidos en la detección de defectos en vigas rotatorias siempre que estén localizadas en posiciones que no estén cercanas a aquellos puntos en los que no hay variación de las frecuencias naturales en función del tamaño del defecto.

## 5. APLICACIÓN DE LA RNA

Las RNA son una herramienta matemática versátil que ha demostrado

ser efectiva en la resolución de diversos problemas de ingeniería, entre otras aplicaciones. Su utilidad radica en su capacidad para identificar patrones y relaciones entre datos de entrada y salida. Estas redes buscan imitar el funcionamiento de los sistemas neuronales biológicos y están formadas por unidades denominadas neuronas. Cada neurona recibe múltiples entradas ( $I_i$ ), que pueden provenir de fuentes externas o de otras neuronas dentro de la red. Luego, combina estas entradas y genera una salida. La salida ( $O$ ) se determina mediante una función de activación aplicada al resultado de la suma ponderada de todas las entradas, es decir, cada entrada ( $I_i$ ) se multiplica por un peso asociado ( $w_i$ ), y a este sumatorio se le añade un valor de sesgo ( $b$ ) (Fig. 9). De esta manera, la relación matemática entre las entradas y la salida se expresa como (1):

$$O = f(\sum w_i \cdot I_i + b) \quad (1)$$

En este trabajo se ha empleado una red perceptrón multicapa (MLP). Este tipo de red neuronal está compuesta por una capa de entrada, una o varias capas ocultas y una capa de salida. Por lo general, cada neurona de una capa se conecta con todas las neuronas de la siguiente capa. El proceso comienza con el entrenamiento de la red, utilizando un conjunto de datos conocidos como patrones de entrenamiento. Durante esta fase, los patrones se procesan repetidamente, ajustando progresivamente los pesos de las conexiones hasta alcanzar un conjunto óptimo que genere respuestas satisfactorias. En este caso, se ha optado por el algoritmo de retropropagación para el entrenamiento, ya que es el más utilizado en redes perceptrón multicapa debido a su simplicidad y eficacia. Los datos disponibles se han dividido aleatoriamente en tres grupos, utilizados para el entrenamiento, la validación y la prueba de la red, que constan del 70%, el 15% y el 15% de los datos, respectivamente. Hay cuatro entradas (tamaño del defecto, localización del mismo, velocidad de giro y orden de frecuencia) y una salida (frecuencia natural).

Las variables utilizadas para comprobar la precisión de la red han sido el error cuadrático medio (ECM),

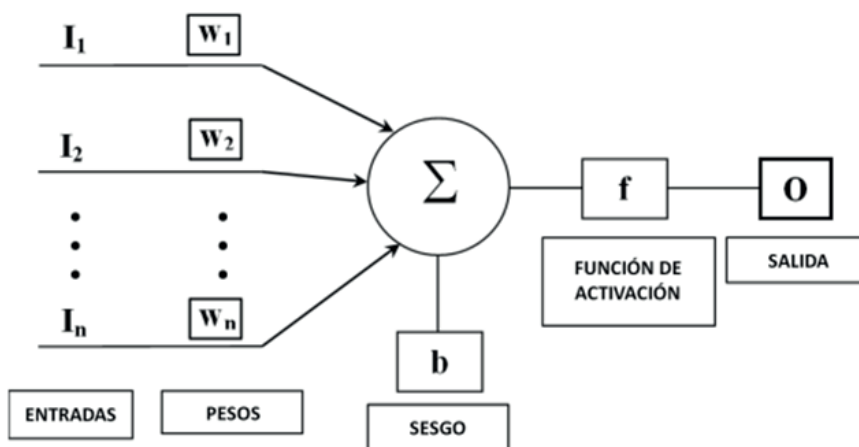


Figura 9. Esquema de una neurona.

$\Omega$ (rad/s)	$\xi$	$\alpha$	Orden de la frecuencia	$\omega_{num}$	$\omega_{est}$	Error (%)
96	0,635	0,1	1	95,21	95,57	0,38
			2	299,07	299,66	0,19
			3	550,54	542,84	1,39
			4	776,37	784,26	1,02
67	0,405	0,3	1	92,77	93,22	0,49
			2	301,51	301,19	0,11
			3	521,24	534,79	2,60
			4	780,03	746,44	4,30

Tabla 4. Comparación con valores no utilizados en el entrenamiento de la RNA

calculado según la expresión (2) y el coeficiente de correlación  $R^2$ . Los mejores resultados se han obtenido con una red con una capa oculta, con 35 neuronas con un error cuadrático medio  $ECM = 2,02 \cdot 10^{-6}$  y un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,99$ .

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^{est} - y_i)^2 \quad (2)$$

## 6. VALIDACIÓN DE LA RED NEURONAL ARTIFICIAL PROPUESTA

La verificación de la RNA propuesta se ha realizado comparando, en primer lugar, los resultados obtenidos con los datos numéricos de referencia y, en segundo lugar, con datos que no se han utilizado en su entrenamiento.

### 6.1 Comparación con los datos numéricos de referencia

En la figura 10 se muestran los ejemplos de la comparación entre los resultados de la red propuesta y los datos numéricos de referencia para la tercera y la cuarta frecuencia natural y para las localizaciones de la discontinuidad  $\xi = 0,355$  y  $0,785$ . Se han representado los valores de la frecuencia en función del tamaño del defecto para las tres velocidades de rotación  $\Omega = 30, 60$  y  $90$  rad/s. Se puede observar que la concordancia entre los resultados obtenidos por la red y los numéricos es muy buena. Los resultados de la comparación correspondientes a otras localizaciones

y a otras velocidades de giro son muy similares. Además, se ha calculado el error relativo medio (ERM) entre los resultados obtenidos con la red y los datos de referencia, de acuerdo con la ecuación (3). Teniendo en cuenta todos los casos considerados, el error obtenido es del 2%.

$$ERM(\%) = 100 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i^{est} - y_i}{y_i^{est}} \right| \quad (3)$$

### 6.2 Comparación con valores no usados en el entrenamiento de la red

Para comprobar la robustez y precisión de la RNA propuesta se han comparado los resultados obtenidos con ella con valores no utilizados en el entrenamiento. Para ello, se han seleccionado aleatoriamente dos casos de vigas con características diferentes de las utilizadas para su entrenamiento y se han calculado las cuatro frecuencias para cada caso. En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos. Como puede observarse, el error es pequeño, en ninguno de los casos el error es superior al 4,5 %.

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una RNA que permite estimar los valores de las cuatro primeras frecuencias naturales de vigas de material compuesto con pieles de polímeros reforzados con fibra de carbono y

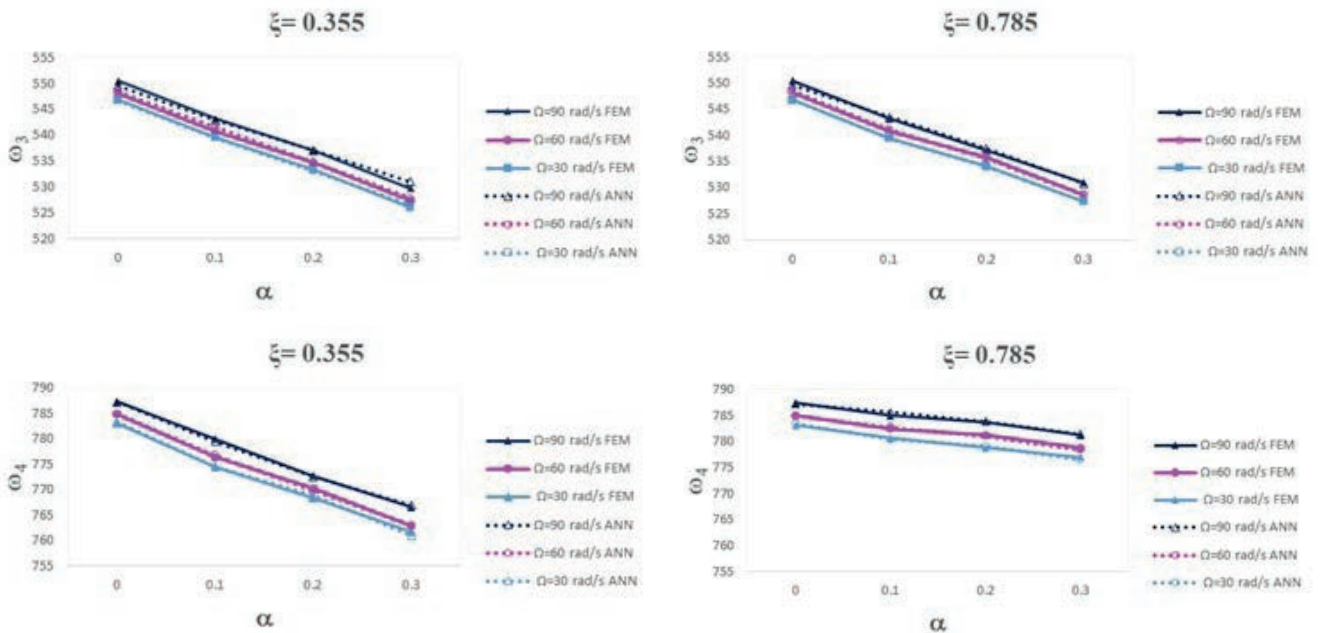


Figura 10. Comparación con valores utilizados en el entrenamiento de la RNA.

núcleo de nido de abeja dañada en función de la velocidad de rotación, el tamaño y la localización del defecto. Los datos de entrada para realizar el entrenamiento de la RNA se han conseguido a partir de un modelo numérico dinámico 3D de una viga sándwich con una discontinuidad transversal en el núcleo. La metodología propuesta ofrece muy buenos resultados. Si los valores estimados por la red se comparan con los datos utilizados para la formulación de la red, el error relativo medio es del 2%. Si la comparación se realiza con valores obtenidos del modelo numérico, diferentes de los utilizados en la elaboración de la red, la estimación, como era de esperar, es ligeramente peor, pero en ningún caso supera el 4,5%. Por tanto, la RNA propuesta representa una alternativa muy efectiva para analizar la respuesta vibratoria de vigas sándwich dañadas, y destaca por su eficiencia, facilidad de uso y bajo costo computacional.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abaqus (2007). Abaqus theory manual, version 6.7, in: Dassault Systemes Inc.
- Bhat RB (1986). Transverse vibrations of a rotating uniform cantilever beam with tip mass as predicted by using beam characteristic orthogonal polynomials in the Rayleigh-Ritz Method. *Journal of Sound and Vibration* 105(2):199-210.
- Chen LW, Chen CL (1988). Vibration and stability of crack thick rotating blades. *Computers Structures* 28: 67-74.
- Dimarogonas AD (1996). Vibration of cracked structures: A state of the art review". *Engineering Fracture Mechanics* 55 (5): 831-57.
- Honeycomb Core & Flex-Core Material & Manufacturers. Disponible en: <https://www.toraytac.com/products/adhesives-and-core/honeycomb-core> (consultado el 17 de julio de 2023).
- Kim SS, Kim JH (2003). Rotating composite beam with a breathing crack. *Composite Structures* 60:83-90.
- Lee JW, Lee JY (2017). In-plane bending vibration analysis of a rotating beam with multiple edge cracks by using the transfer matrix method. *Meccanica* 52:1143-57.
- Marsh G (2005). Wind turbines. How big can they get? *Refocus* 6 (2):22-8.
- Norton MP, Karczub DG (2003). Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers. Second edition, Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- Ozdemir O, Kaya MO (2014). Energy Derivation and Extension-Flapwise Bending Vibration Analysis of a Rotating Piezo-laminated Composite Timoshenko Beam. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 21:477-89.
- Pourriahi V, Heidari-Rarani M, Isfahani AT (2022). Influence of geometric parameters on free vibration behavior of an aluminium honeycomb core sandwich beam using experimentally validated finite element models. *Journal of Sandwich Structures & Materials* 24 (2):1449-69.
- Ridgard C (2008). Complex Structures for Manned/ Unmanned Aerial Vehicles. Delivery Order 0019: Low Temp Composite Processing Mechanical Property Data. Air Force Research Laboratory.
- Sekhar A (2008). Multiple cracks effects and identification. *Mechanical Systems and Signal Processing* 22: 845-78.
- Sezgin EF (2008). Mechanical Behaviour and Modeling of Honeycomb Cored Laminated Fiber/Polymer Sandwich Structures. Thesis (Master), Izmir Institute of Technology.
- Valverde-Marcos B, Muñoz Abella B, Rubio L, Rubio P (2022). Influence of the rotation speed on the dynamic behaviour of a cracked rotating beam. *Theoretical and applied fracture mechanics* 117:103209.
- Youngho K, Junyoung J, Wanjo R, Dong-Whan C (2012). Multiple defect diagnostics of gas turbine engine using SVM and RCGA-based algorithms. *Journal of Mechanical Science and Technology* 26(5):1623-32.



# Plan Ingenia el futuro

Ahora más que nunca, la unión hace la fuerza



**FORMACIÓN online de COGITI**



**PORTAL DE LICITACIONES  
EUROPEAS**



**SOFTWARE TÉCNICO**



**NORMAS UNE PARA FABRICACIÓN  
EPIS (descarga gratuita)**



**REVISTA TÉCNICA INDUSTRIAL  
en abierto**



**CUESTIONARIO**



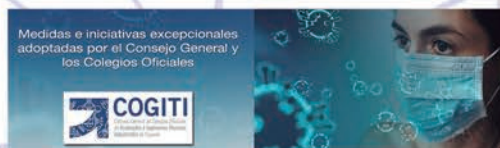
**INFORMACIÓN ACTUALIZADA**



**ACREDITACIÓN DPC Ingenieros**



**WEBINAR Y TV EDUCATIVA**



**ACTUACIONES SOLIDARIAS COLEGIOS**



**YOUNG ENGINEERS**



**CLUB COGITI**

# El I Congreso Nacional de Ingeniería INGEFUTUR25 reafirma el papel clave de la profesión en el desarrollo industrial de España

**La ciudad de Valencia se convirtió durante los días 12 y 13 de diciembre en el epicentro de la Ingeniería española, en un encuentro histórico que ha reunido a cerca de 400 congresistas, junto a los decanos de los Colegios de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales, y representantes institucionales, empresariales y del ámbito de la ingeniería, con el objetivo de analizar los grandes desafíos estratégicos que marcarán el futuro de la profesión y de la industria de nuestro país.**

INGEFUTUR25 ha sido el primer gran foro nacional en reivindicar el papel fundamental de la ingeniería del ámbito industrial en la construcción del futuro de nuestro país. Con una alta participación y consenso, el Congreso dejó patente que dicho futuro pasa por una ingeniería fuerte, innovadora y conectada con los desafíos globales.

El Congreso ha sido organizado por el Consejo General de la Ingeniería Técnica Industrial de España (COGITI) y el Colegio de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales de Valencia, en el marco del 175º aniversario de la Ingeniería Técnica Industrial, consolidándose como un punto de encuentro clave para el debate técnico, profesional y estratégico del sector, y reafirmando el papel fundamental de los ingenieros técnicos industriales en la transformación industrial, energética y digital de España. Esta efeméride ha servido para poner en valor una trayectoria histórica estrechamente vinculada al desarrollo industrial del país y, al mismo tiempo, proyectar el papel estratégico de la profesión ante los grandes procesos de transformación económica, energética, tecnológica y social que afronta España.

La inauguración institucional del Congreso ha contado con la participación del vicepresidente segundo y consejero para la Recuperación Económica y Social de la Comunitat Valenciana, Vicente Martínez Mus, quien ha señalado que, tras una fase de reconstrucción ágil basada en la planificación y la voluntad política, el principal reto es ahora consolidar la recuperación. En este contexto,

ha destacado la importancia de la prevención, el desarrollo de infraestructuras resilientes y el compromiso de los equipos técnicos.

También ha participado en el acto inaugural el comisionado para la Reindustrialización del Ministerio de Industria y Turismo, Jaime Peris, quien ha puesto en valor el papel estratégico de la ingeniería en los procesos de recuperación, modernización industrial y transformación económica del país.

El presidente de COGITI, José Antonio Galdón, ha destacado la extraordinaria acogida de INGEFUTUR25, un encuentro en el que participan los 49 Colegios de la profesión y que "supone un hito en la historia de nuestra profesión". Galdón ha subrayado que este primer congreso "nos permite conmemorar 175 años de trayectoria, reafirmar nuestros orígenes y valorar la evolución

de una profesión que ha estado siempre al servicio del progreso del país". Pero ha remarcado, sobre todo, que INGEFUTUR25 "nace para trazar con claridad el rumbo de la Ingeniería del mañana, identificar los grandes desafíos tecnológicos, sociales y energéticos que tenemos por delante y consolidar una visión común que fortalezca a la profesión y a nuestras organizaciones colegiales".

Por su parte, el decano de COGITI Valencia, Tomás Játiva, ha señalado la importancia del enfoque técnico y social del encuentro: "Celebrar este primer Congreso Nacional en Valencia tiene un significado especial. La mesa sobre la DANA refleja el compromiso de la ingeniería con la sociedad: analizar lo ocurrido, aprender de ello y proponer soluciones reales. La Ingeniería Técnica Industrial debe estar en el centro de la



Representantes institucionales y autoridades en la inauguración del Congreso INGEFUTUR25, el pasado 12 de diciembre en el auditorio del hotel Balneario Las Arenas, en Valencia.



planificación, la prevención y la innovación, y este Congreso ha sido una muestra clara de ello.”

### Mesa redonda “Innovación al servicio de la prevención: soluciones tecnológicas frente a la DANA”

Uno de los momentos relevantes del Congreso, en su jornada del viernes 12 de diciembre, ha sido la mesa redonda dedicada a la DANA, coincidiendo en fechas cercanas con su primer aniversario, donde se han analizado los avances y carencias detectados a partir de las propuestas del documento elaborado por COGITI Valencia y Femeval, “Leciones DANA aprendidas: Reflexiones sobre Instalaciones e Industria”. El debate, de carácter técnico y constructivo, se ha centrado en la prevención, la coordinación de emergencias y la necesidad de infraestructuras más resilientes, digitalización y refuerzo de redes. Asimismo, se ha subrayado el papel clave de la ingeniería, la seguridad industrial y la colaboración público-privada para mejorar la respuesta ante futuros episodios extremos.

La mesa estuvo moderada por Tomás Játiva, decano de COGITI Valencia, y en ella participaron Raúl Mérida, comisionado para la Recuperación de la Conselleria de Medio Ambiente, Infraestructura y Territorio de la Generalitat Valenciana; Empar Martínez Bonafé, secretaria general de FEMEVAL (Federación Empresarial Metalúrgica Valenciana); Ignacio García, jefe de Proyecto Ilumina ID-IBERDROLA, y José Antonio Mata, delegado en la Comunidad Valenciana de NEDGIA.

Desde un enfoque riguroso y constructivo, los expertos abordaron cuestiones clave como la prevención, la coordi-

nación en situaciones de emergencia, el diseño de infraestructuras más resilientes, la digitalización de los sistemas de control y el refuerzo de redes e instalaciones críticas.

### Retos de la ingeniería y la industria

Durante el Congreso se han abordado los principales retos que marcarán el futuro de la ingeniería y la industria, con especial atención a la transformación verde y digital, la inteligencia artificial, la eficiencia energética y los nuevos modelos energéticos sostenibles.

La primera ponencia estuvo a cargo de Zora Kovacic, investigadora de la Universitat Oberta de Catalunya (UOC), sobre “La transformación verde y digital en la UE”. En segundo lugar, José María Felguera, gerente y consultor de SCHUMPIT, habló sobre “Inteligencia artificial generativa en la ingeniería”. A continuación, Roberto Rincón, director de la Oficina Técnica UPRO, hizo una breve intervención sobre “UPRO-Programa de Formación en Competencias Digitales”; José Carlos Pardo, presidente de la Mutualidad MUPITI, con una intervención titulada “MUPITI: protege tu trayectoria, impulsa tu profesión”; Susana Pascual, CEO de PixelsHub, con la ponencia “Digital Decode: descifrando el proceso de la digitalización”; Ginés Ángel, presidente de la Asociación de Empresas de Eficiencia Energética, habló sobre “El sistema CAE como motor de la electrificación”; y Álvaro Reyes, manager de Eurecat, centró su ponencia en el “Hidrógeno verde en la industria: usos reales y retos tecnológicos”.

La investigadora de la Universitat Oberta de Catalunya (UOC), Zora Kovacic, ha ofrecido una visión crítica sobre la doble transición verde y digital impul-

sada por la Unión Europea, destacando el valor de la digitalización para la gobernanza ambiental y la toma de decisiones basada en datos. Susana Pascual, CEO de Pixelshub, ha puesto el foco en el factor humano, recordando que la transformación digital es, sobre todo, un cambio cultural que debe situar a las personas en el centro.

En el ámbito energético, Álvaro Reyes, manager de Eurocat, ha analizado el papel del hidrógeno verde como vector estratégico para la desfosilización de la industria, señalando tanto sus aplicaciones actuales como su potencial futuro y los retos pendientes. Asimismo, Ginés Ángel, presidente de la Asociación de Empresas de Eficiencia Energética, ha presentado el sistema CAE como una herramienta clave para impulsar la electrificación, mejorar la eficiencia energética y acelerar la sustitución de tecnologías fósiles.

La inteligencia artificial ha tenido también un protagonismo destacado con la intervención de José María Felguera, gerente de Schumpit, quien ha defendido que la IA generativa no sustituye al ingeniero, sino que multiplica su valor, al optimizar procesos, aumentar la productividad y reforzar la toma de decisiones estratégicas.

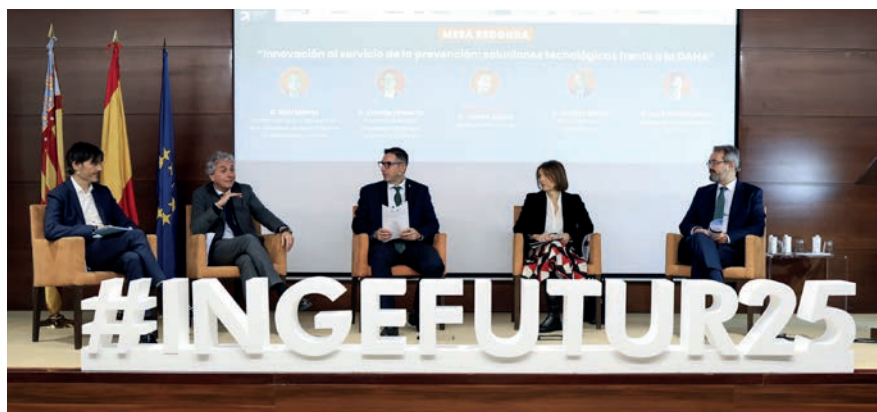
### Mesa redonda: “Desafíos en el sector industrial”

La jornada del viernes 12 de diciembre contó con otra mesa redonda sobre “Desafíos en el sector industrial”, que estuvo moderada por José Antonio Galdón Ruiz, presidente de COGITI, y en la que participaron Alfredo Berges, presidente de la Asociación Española de Normalización (UNE); José Miguel Guerrero, presidente de Confederación Española de Organizaciones Empresariales del Metal (CONFEMETAL); Alberto Ruiz, Director General de Programas Industriales del Ministerio de Industria y Turismo, y Borja Pelllicer, CEO Bet Solar.

La mesa redonda se centró en los desafíos del sector industrial, abordando la competitividad, la sostenibilidad, la digitalización y la atracción de talento, y subrayando la necesidad de colaboración entre administraciones, empresas y profesionales.

### Ponencia «Power-skills para ingenieros»

La jornada del viernes terminó con la po-



Mesa redonda «Innovación al servicio de la prevención: soluciones tecnológicas frente a la DANA», moderada por Tomás Játiva, decano de COGITI Valencia.





Mesa redonda «Desafíos en el sector industrial», moderada por el presidente de COGITI, José Antonio Galdón Ruiz.



Imagen del momento en el que suben al escenario las mujeres ingenieras presentes en el auditorio del Congreso.

nencia de Miguel Ángel Díaz, psicólogo y presidente de la Asociación Nacional de Inteligencia Emocional, con su ponencia titulada “Power-skills para ingenieros”, que habló sobre la importancia de las power skills y de la inteligencia emocional en el ejercicio de la ingeniería, destacando que las competencias personales y relacionales son cada vez más determinantes para liderar equipos y gestionar el cambio.

Las ponencias y mesas de debate también han podido seguirse en streaming, permitiendo el acceso remoto a todos los contenidos y ampliando el alcance del Congreso a profesionales de todo el territorio nacional.

#### Pleno del COGITI y conclusiones de los grupos de trabajo

El encuentro ha culminado, la jornada del sábado 13 de diciembre, con la celebración del Pleno de COGITI, en el que han participado los decanos de los Colegios Oficiales de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales y la Junta Ejecutiva del Consejo General de la

Ingeniería Técnica Industrial de España.

Una vez finalizado el pleno, los nueve grupos de trabajo que han estado trabajando durante las últimas semanas en temas de relevancia y actualidad para la profesión, expusieron sus conclusiones ante el auditorio del Congreso, con base a unos principios rectores. Además del Grupo de Trabajo de Ejercicio Libre (GTLE), que se reúne de forma periódica, intervinieron los grupos de trabajo correspondientes a los temas de Inteligencia Artificial (IA), Ley de Industria, Ley de Ingeniería, Definición de Ejercicio de la Profesión, Función Pública, Posicionamiento de la Marca Ingeniería, Vocaciones y Mujeres en la Ingeniería, y Nuevos Colegiados.

#### Clausura y Manifiesto de la Ingeniería

Una vez finalizadas las intervenciones de los portavoces de los grupos de trabajo, se dio paso a la clausura del congreso. Tomás Játiva, decano de COGITI Valencia, expresó que “llegamos al final del Congreso con la certeza de que la Ingeniería Técnica Industrial tiene un pasado,

un presente y, sobre todo, un futuro”. A lo que añadió que “este congreso es el punto de partida de un espacio común para seguir reflexionando, colaborando y avanzando todos juntos. Debemos tener un discurso común, una misma dirección. Y debemos estar orgullosos de lo que fueron, de lo que somos y de lo que serán nuestros ingenieros técnicos industriales, así como de la marca ingeniero y COGITI”.

Como colofón, el presidente de COGITI, José Antonio Galdón, presentó el “Manifiesto de la Ingeniería Técnica Industrial”, que fija una hoja de ruta y los objetivos para modernizar y fortalecer la profesión.

El Manifiesto se apoya en principios como la unidad profesional, la excelencia técnica y ética, la innovación, la sostenibilidad y la cohesión territorial. Entre sus ejes estratégicos destacan la necesidad de que haya una ley de la ingeniería, la reforma de la Ley de Industria, el acceso de los graduados en Ingeniería al Grupo A1 de la Función Pública, el impulso de las vocaciones STEM —especialmente femeninas—, la integración responsable de la Inteligencia Artificial y la modernización digital de los colegios profesionales.

“Hoy es un día para estar realmente satisfechos de una profesión que, viendo el trabajo que han hecho los grupos de trabajo, con el resultado que han dado, y siendo la primera vez que hemos sido capaces de reunir no sólo a decanos, sino también a los miembros de las juntas de gobierno, se merece todo un reconocimiento y aplauso. Es un día, el 13 de diciembre, y una ciudad histórica porque nace un nuevo camino para toda la ingeniería de la rama industrial”, señaló.

Además, recordó que fue en junio de 2021 cuando se aprobó el documento “Reflexiones de la profesión”. “Ese día decidimos cuál era nuestra prioridad. El futuro no se espera, se construye, y nosotros estamos aquí para construir el futuro”, concluyó.

Con esta primera edición, INGEFUTUR25 se consolida como un foro de referencia nacional y con vocación de continuidad, reafirmando el papel esencial de la Ingeniería Técnica Industrial como motor de la transformación industrial, energética y digital de España, y subrayando que el futuro de la industria pasa, de manera ineludible, por la ingeniería. Más información en [www.cogiti.es](http://www.cogiti.es).



José Carlos Pardo, presidente de MUPITI; Raúl Mérida, comisionado para la Recuperación de la Conselleria de Medio Ambiente, Infraestructura y Territorio de la Generalitat Valenciana; José Antonio Galdón Ruiz, presidente de COGITI; Vicente Martínez Mus, vicepresidente segundo y conseller para la Recuperación Económica y Social de la Comunitat Valenciana; Tomás Játiva, decano de COGITI Valencia, y Jaime Peris, comisionado para la Reindustrialización del Ministerio de Industria y Turismo (de izquierda a derecha).



Comité técnico del I Congreso Nacional de Ingeniería: José Antonio Galdón, presidente de COGITI; Enrique Zaro, decano de COGITI Aragón; José Luis Langa, secretario de COGITI Valencia; Miquel Damés, coordinador del Congreso; Tomás Játiva, decano de COGITI Valencia; Rafael Álvarez, decano de COGITI Valladolid (ingenierosVA), y Pablo San Juan, interventor de COGITI (de izda. a dcha.).

## INGITE presenta el III Informe sobre los estudios universitarios de Ingeniería en España

### La caída de vocaciones y el auge de titulaciones sin atribuciones profesionales ponen en riesgo el futuro de la Ingeniería en nuestro país.

El Instituto de Graduados en Ingeniería e Ingenieros Técnicos de España (INGITE), cuyo presidente, José Antonio Galdón Ruiz, lo es también del COGITI, ha presentado el III Informe "Análisis de los estudios universitarios en Ingeniería", una radiografía exhaustiva de la situación de las titulaciones de Ingeniería en España elaborada a partir de los últimos datos publicados por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (octubre 2025).

El estudio revela una realidad preocupante: las vocaciones y los egresados en Ingeniería han experimentado un descenso constante durante las últimas décadas, comprometiendo la capacidad del país para responder a los retos tecnológicos, industriales y de transición energética que ya están afectando al modelo productivo.

Este escenario evidencia la urgencia de avanzar hacia una Ley de la Ingeniería que modernice el marco profesional, ordene la oferta formativa y elimine la fragmentación actual en el marco de estudios universitarios.

### Un 33% menos de vocaciones

Según el informe, el número de estudiantes matriculados en titulaciones de Ingeniería ha caído un 33% desde

el periodo 2002-2003. Mientras en 1985-1986 los estudios de Ingeniería representaban el 14% del total universitario, alcanzaron su máximo en 2002-2003 con un 24%, para descender hasta el 17% en el curso 2024-2025. "Este retroceso consolida una tendencia estructural que pone en riesgo la disponibilidad de profesionales cualificados en sectores estratégicos. España no puede permitirse un déficit de talento técnico justo cuando más lo necesita. El número de ingenieros que finaliza sus estudios es hoy insuficiente para atender las demandas de la industria, la digitalización y la transición ecológica", advierte José Antonio Galdón Ruiz, presidente de INGITE.

### La presencia de mujeres en Ingeniería: avances significativos, pero todavía insuficientes

Aunque la participación femenina en la Ingeniería sigue siendo reducida, los datos muestran una evolución positiva que no debe pasar desapercibida. Las mujeres representan actualmente el 23,13% del alumnado de Grado y el 28,32% en Máster, cifras que continúan siendo minoritarias pero que han avanzado de forma constante en la última década.

De hecho, el número de matriculadas en Grados de Ingeniería ha crecido un 36,63% en diez años, y en el caso de los Grados no habilitantes el

aumento alcanza un llamativo 76,49%. En términos de resultados académicos, también se aprecia un desempeño destacado: las egresadas en Grado han aumentado un 20% en nueve años, superando el ritmo de crecimiento de los hombres.

### Más titulaciones, pero no habilitantes para ejercer la profesión

El informe evidencia otro fenómeno de creciente impacto: una tasa de abandono de los estudios que ronda el 50% y la proliferación de titulaciones no habilitantes. En titulaciones de Grado en Ingeniería, el 53% no otorgan atribuciones profesionales. INGITE alerta de que esta expansión, en muchos casos desvinculada de las necesidades del sistema profesional y productivo, "genera confusión entre los estudiantes y merma la garantía de calidad y seguridad que requieren las profesiones reguladas de Ingeniería".

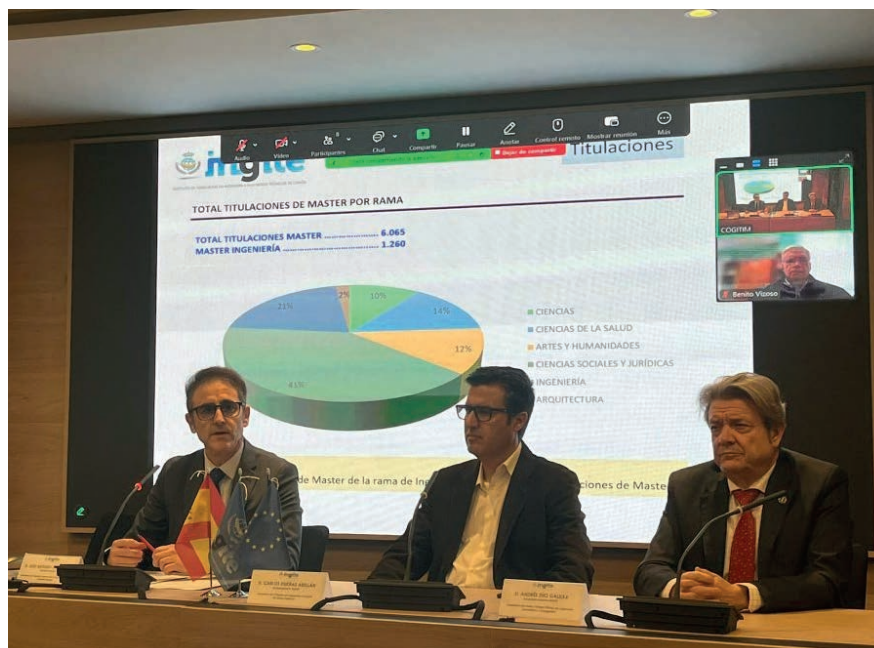
### Un reto país: garantizar suficiente talento técnico para el futuro

El Instituto de Graduados en Ingeniería e Ingenieros Técnicos de España considera urgente adoptar medidas decididas para reforzar las vocaciones STEM, mejorar la orientación académica, asegurar la calidad y atribuciones de las titulaciones de Ingeniería y planificar la oferta universitaria en función de las necesidades reales del país.



En todos estos aspectos, resulta necesaria una Ley de Ingeniería que proponga un marco regulador estable que devuelva claridad, atractivo y seguridad al itinerario formativo-profesional de la Ingeniería. "No es solo una reivindicación profesional; es una cuestión de Estado. Sin ingenieros suficientes y bien formados, España no podrá afrontar sus grandes desafíos: sostenibilidad, innovación, digitalización, industria, energía y seguridad", concluye el presidente de INGITE.

La presentación del informe ha estado a cargo del presidente de INGITE y COGITI, José Antonio Galdón Ruiz; el presidente del Colegio de Obras Públicas e Ingenieros Civiles, Carlos Dueñas Abellán; y el presidente del Colegio Oficial de Ingeniería Geomática y Topográfica, Andrés Díez Galilea.



Presentación del III Informe sobre los estudios universitarios de Ingeniería en España.

## El presidente de COGITI presenta el proyecto de Ley de la Ingeniería a los estudiantes de la AERRAITI

José Antonio Galdón Ruiz, presidente de COGITI, participó el pasado 5 de noviembre en el LXXIII Congreso organizado por la Asociación Estatal de Representantes de Alumnos de Ingeniería del Ámbito Industrial (AERRAITI), que se celebró del 5 al 9 de noviembre en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada (UGR), y al que asistieron los delegados de estudiantes de ingeniería de la rama industrial de universidades de todo el país.

Una vez más, y como es habitual cada vez que la AERRAITI celebra sus congresos anuales, el presidente de COGITI aceptó la invitación de los alumnos para participar con una charla en esta destacada cita estudiantil. En esta ocasión, centró su intervención en la "Ley de la Ingeniería", muy reivindicada y promovida por los estudiantes del ámbito de la ingeniería, por lo que suscitó un gran interés entre ellos.

Ya en abril de 2024, la Asamblea General del Instituto de Graduados en Ingeniería e Ingenieros Técnicos de España (INGITE), cuyo presidente es también José Antonio Galdón, en el debate final, y como conclusión

al informe presentado «Análisis de los Estudios universitarios en España», del citado Instituto, se concluyó que es necesario que exista una Ley de la Ingeniería en España que ponga orden a la situación actual.

Además, el pasado mes de junio, la sede del COGITI acogió una reunión con representantes de alumnos y directores de Escuelas de Ingeniería para analizar problemáticas comunes. Entre ellas, se expuso la difícil situación que sufren muchos alumnos que terminan un Grado blanco en Ingeniería que no les habilita para el ejercicio profesional, viéndose obligados a cursar un Máster habilitante, u otro Grado habilitante, retrasando sin sentido el acceso al mercado laboral.

Los representantes de alumnos coinciden en señalar que existe una falta de información previa a la matriculación, para saber si el Grado que eligen les habilita para la profesión o no. «A veces, cuando por fin te enteras, ya estás matriculado y no tiene solución», manifiestan. Por ello, apuestan por una "Ley de Ingeniería" que ponga orden en la situación actual.

En este sentido, el presidente de COGITI e INGITE, José Antonio Galdón Ruiz, comentó que «con una Ley de la Ingeniería, se podría establecer un marco único, unificado e integrado para el ejercicio de la Ingeniería en España», y por ello, en la citada reunión, se les ofreció a los alumnos y directores un borrador de texto de dicha Ley, para que fuese analizado.

Tras su ponencia, los alumnos pudieron preguntar y charlar con José Antonio Galdón acerca de los temas tratados en ella, y sobre otros asuntos que les preocupan como futuros ingenieros.



José Antonio Galdón, presidente de COGITI, en el LXXIII Congreso de la AERRAITI.



# Jornada informativa «La profesión de Ingenieros Técnicos Industriales ante la entrada en vigor del sistema VERI\*FACTU»

Más de 700 profesionales participaron en el webinar gratuito sobre las nuevas obligaciones en materia de facturación electrónica, organizado por el COGITI el pasado 2 de diciembre, en el marco del sistema estatal de verificación de facturas, impulsado por la Agencia Tributaria, Verifactu, cuya implantación será obligatoria a partir del 1 de enero de 2027.

A partir esa fecha, todas las empresas sujetas al Impuesto sobre Sociedades deberán cumplir con la nueva normativa fiscal relativa a la emisión de facturas, conocida como sistema VERI\*FACTU. Esta obligación se extenderá a los profesionales individuales —como los ingenieros técnicos industriales que operan como personas físicas— a partir del 1 de julio de 2027.

La normativa exige el uso de sistemas informáticos que permitan remitir automáticamente los registros de facturación a la Agencia Tributaria, o bien optar por una modalidad que garantice la conservación, integridad y trazabilidad de dichos registros, entre otros requisitos técnicos.

Este cambio representa una transformación significativa en la relación fiscal



entre los contribuyentes y la Administración, marcando el inicio de un proceso de digitalización que tanto empresas como profesionales deben comprender, adoptar y aprovechar.

Con el objetivo de analizar el impacto de esta nueva normativa desde la perspectiva de los ingenieros técnicos industriales —ya sean autónomos o sociedades— y resolver las dudas que pudieran surgir, se organizó la citada sesión informativa.

La jornada se llevó a cabo en un formato híbrido, telemático (a través de la retransmisión en streaming, previo registro), y presencial en el

Colegio de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales de Madrid (COGITIM).

La presentación de la jornada sobre las novedades en materia de facturación y el Reglamento VERI\*FACTU, estuvo a cargo del presidente de COGITI, José Antonio Galdón Ruiz, y tuvo como ponente a Javier Hurtado, inspector de Finanzas del Estado, exdirector del Departamento de inspección Financiera y Tributaria y miembro del Grupo de Trabajo de facturación AEAT.

Por su parte, el economista Valentín Pich, fue el moderador de esta jornada informativa.

## Participación de COGITI en el acto de presentación de la Cátedra de Competencias Digitales impulsada por la UPM

La Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, (ETSII UPM), en colaboración con Upro, el Programa Formativo de Competencias Digitales en el ámbito de los Colegios Profesionales, han celebrado, el pasado 4 de diciembre, la jornada «Competencias digitales del presente, para profesionales del futuro», en la que ha participado José Antonio Galdón Ruiz, presidente de COGITI.

En este acto se presentó oficialmente la nueva Cátedra de Competencias Digitales, iniciativa con varias líneas estratégicas: la creación del Observatorio

de Competencias Digitales y Talento, el desarrollo de marcos de referencia basados en estándares internacionales, el impulso de actividades formativas y divulgativas, y la promoción de la investigación aplicada. En este marco, el encuentro acogió a Upro, impulsado por Red.es y Unión Profesional, como ejemplo de iniciativas alineadas con los fines de la Cátedra.

Upro, que ya cuenta con más de 60.000 estudiantes inscritos, comenzó en octubre de 2025 y finalizará en junio de 2026. El programa tiene como objetivo capacitar a cerca de 80.000 estudiantes en competencias clave como

digitalización, inteligencia artificial y herramientas tecnológicas aplicadas a sus respectivos sectores. Upro está dirigido principalmente a profesionales colegiados y dispone además de un cupo del 30% destinado a titulados no colegiados, siempre que dispongan de una titulación que les habilite para acceder a una de las corporaciones colegiales adheridas al Programa.

La jornada incluyó también una mesa redonda sobre «La importancia de las competencias digitales en el ámbito profesional», en la que participó José Antonio Galdón, presidente del COGITI, quien señaló que «la digitalización está

modificando de manera profunda el ejercicio de las ingenierías y exige reforzar la capacitación digital para responder a los retos de productividad, eficiencia y competitividad del sector».

#### Upro: contenidos adaptados para profesionales

Upro ofrece formación transversal y aplicable desde el primer día, con especial foco en inteligencia artificial, ciberseguridad y nuevas herramientas digitales. Abarca un itinerario completo que incluye desde la gestión del tiempo, el liderazgo digital y las metodologías ágiles, hasta el uso avanzado de herramientas colaborativas como Microsoft 365, Google Workspace, Power BI, Power Platform y CRM.

Se trata de una formación sin coste, flexible, práctica y sectorial, con un programa de 150 horas —40 comunes y



110 específicas según cada ámbito profesional— en modalidad híbrida flexible (online y presencial), accesible 24/7 a través de una plataforma intuitiva y gamificada. Incluye tutoría personalizada

y contenidos alineados con el Marco Europeo de Competencias Digitales (DIGCOMP 2.2).

Más información en [www.cogiti.es](http://www.cogiti.es).

## Presentación del estudio sociológico “Percepción ciudadana sobre el riesgo de incendios en las fachadas de los edificios”

La jornada de presentación del estudio sociológico “Percepción ciudadana sobre el riesgo de incendios en las fachadas de los edificios”, celebrada el pasado 20 de noviembre, ha contado con la participación de COGITI, Fundación Fuego, la Asociación de Consorcios y Servicios de Bomberos de España y AFELMA, en una mesa redonda en la que se analizó la importancia de estos resultados para la seguridad en la edificación y la rehabilitación sostenible.

Una amplia mayoría de los españoles expresa una profunda preocupación por el uso de productos que favorezcan la propagación del fuego en los edificios en caso de incendio, y reclama una mayor exigencia normativa para mejorar la seguridad en la edificación. Así lo refleja el estudio sociológico “Percepción ciudadana sobre el riesgo de incendios en las fachadas de los edificios”, elaborado por NC Report para el Observatorio de Nuevos Riesgos de Incendio.

Los datos muestran que nueve de cada diez españoles (91%) están preocupados por la posibilidad de que sus edificios contengan productos combustibles que puedan favorecer la propagación del fuego. Estos resultados reflejan una tendencia común en todo el país



José Antonio Galdón Ruiz, presidente de COGITI, participa en la presentación del estudio sociológico elaborado por el Observatorio de Nuevos Riesgos de Incendio.

hacia una mayor demanda de seguridad frente a incendios en la edificación.

José Antonio Galdón, presidente del Consejo General de la Ingeniería Técnica Industrial de España (COGITI) destacó que “los datos del estudio son muy reveladores: la ciudadanía percibe que el uso de materiales combustibles en las fachadas no solo compromete su seguridad, sino también el valor económico de sus viviendas. Esta preocupa-

ción evidencia la necesidad de actualizar la normativa y, además, avanzar hacia una revisión técnica del parque edificado existente, especialmente en edificios de uso sensible, como hospitales, colegios o residencias de mayores. Solo así podremos identificar riesgos que hoy pasan desapercibidos y garantizar rehabilitaciones que protejan tanto la seguridad como el patrimonio de las personas”.



# Los universitarios muestran su talento en la V edición de MotorMadridStudent

**Estudiantes de Ingeniería de las universidades madrileñas se dieron cita, un año más, en una nueva edición de MotorMadridStudent, organizado por el Colegio Oficial de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales de Madrid (COGITIM). Todos ellos forman parte de los denominados “equipos de motor” de las universidades que se preparan para participar en las competiciones internacionales de Formula Student y MotoStudent.**

Un total de 15 equipos de 9 universidades madrileñas, formados por más de 500 estudiantes de diferentes ramas de ingeniería y otras carreras universitarias, participaron, el pasado 30 de septiembre, en la V edición de MotorMadridStudent, en el mítico Circuito de Madrid Jarama – Race. El objetivo era mostrar los prototipos que han diseñado para competir en Formula Student y MotoStudent. Se trata de las competiciones universitarias más importantes a nivel internacional, en las que los alumnos aplican los conocimientos adquiridos durante sus estudios universitarios en un proyecto industrial, mediante el diseño, desarrollo y fabricación de un prototipo para la competición real.

De este modo, los alumnos tienen la oportunidad de poner en práctica los conocimientos adquiridos, al tiempo que adquieren experiencia para ejercer en el futuro una profesión en la que deberán enfrentarse al reto que exige el desarrollo de tecnologías punteras y una movilidad sostenible.

Además, una vez finalizan sus estudios, los estudiantes que han formado parte de estos equipos de motor, ad-

quieran una mayor visibilidad y potencial para las empresas que demandan ingenieros. Se trata, por tanto, de una magnífica “carta de presentación”, ya que supone un gran escaparate para que las empresas puedan ver, además de los proyectos, el talento de los futuros ingenieros y, en este sentido, puedan “captarlo”.

En numerosos casos, las universidades cuentan con dos equipos: uno que desarrolla el prototipo para la competición Formula Student, y otro que lo hace para MotoStudent. En otras ocasiones, sin embargo, se centran solo en una de estas dos pruebas.

Tecnología, innovación, talento y sostenibilidad fueron las señas de identidad de la V edición de MotorMadridStudent, un evento único en el ámbito de la ingeniería, donde los equipos han mostrado los prototipos propulsados por energía no contaminante, ya sea eléctrica o de propulsión de combustión con biocombustibles 100% renovables (0 % emisiones netas).

Con esta iniciativa, el COGITIM, con el patrocinio de la Comunidad de Madrid, busca destacar el talento de la

ingeniería madrileña en automoción, al mismo tiempo que fortalece el tejido industrial y la competitividad empresarial. El evento reúne a universidades públicas y privadas que imparten algún Grado en Ingeniería de la rama Industrial, así como empresas asociadas de entidades tan destacadas como, la Asociación de Empresas del Metal (AECIM), la Asociación de Empresas del Sector de las Instalaciones y la Energía (AGREMIA) y de la Asociación Profesional de Empresarios de Instalaciones Eléctricas y de Telecomunicaciones (APIEM), consolidando un ecosistema colaborativo entre educación y sector productivo.

Al evento asistieron 4.000 personas, de las cuales 2.300 eran estudiantes madrileños de Formación Profesional (rama Tecnología) y Bachillerato Tecnológico, quienes tuvieron la oportunidad de participar en todas las actividades programadas y conocer de primera mano la oferta formativa de titulaciones STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas) de las universidades de la Comunidad de Madrid.





## Fomento de las vocaciones en Ingeniería

MotorMadridStudent persigue, además de fomentar vocaciones en ingeniería, mostrar a los estudiantes las múltiples salidas profesionales que ofrece el sector en la región. Como parte de la programación, los jóvenes visitaron la zona de la Dirección General del Servicio de Empleo Pú-

blico de la Comunidad de Madrid, donde accedieron a la Oficina de Empleo Móvil y recibieron asesoramiento personalizado de manera dinámica, además de conocer el Plan de Empleo Joven y sus ventajas.

## Los equipos muestran sus prototipos para la competición

Los jefes de equipo o team leaders son fundamentales para el buen funciona-

miento de los equipos. Técnica Industrial ha entrevistado a algunos de ellos para conocer cómo es el trabajo que desarrollan y los principales retos a los que se enfrentan sus equipos.

El denominador común de todos ellos es la ilusión por aplicar los conocimientos adquiridos durante sus estudios en este tipo de proyectos.

# Jaime de Carvajal Torres

Team leader de ISC FS Racing Team



## ¿Cuántas personas componen vuestro equipo?

Nuestro equipo, ISC FS Racing Team, lo componen 84 integrantes de la Universidad Pontificia Comillas. La mayoría son estudiantes de ingeniería de ICAI, aunque también contamos con estudiantes de carreras de humanidades de ICADE.

## ¿Cuáles son las principales características e innovaciones tecnológicas del prototipo que habéis diseñado y fabricado?

Presentamos el IFS-07, el monoplaça eléctrico Formula Student más rápido y ligero de la historia del ISC FS Racing Team, equipo de la Universidad Pontificia Comillas ICAI. Contamos con un equipo de estudiantes de ingeniería que han concebido, diseñado y fabricado este coche que pesa solamente 210 kg, y cuenta con 80 KW de potencia. En el concepto del IFS-07 encontramos innovaciones como un paquete aerodinámico que consta de rear, side y front wing de fibra de carbono; un ligero y estilizado chasis tubular de acero, un sistema optimizado de suspensión con bujes mono-tuerca, y un concepto renovado de acumulador con sistema de refrigeración.

El coche está listo para seguir dejando huella. Mientras tanto, el ISC FS ya

está en marcha para dar vida al IFS-08.

## ¿Habéis participado en competiciones? ¿Cuál ha sido el palmarés?

Durante las últimas temporadas, el equipo ha pasado por todo tipo de competiciones internacionales, entre las cuales se incluyen Formula Student Germany (Hockenheimring), Formula Student Spain (Circuito de Barcelona-Catalunya) y Formula Student Italy (Circuito de Riccardo Paletti).

Entre los logros del equipo destacan el primer puesto en Business Plan de Formula Student Italy y el 15º puesto en el Overall de Formula Student Spain, de entre más de 80 equipos internacionales.

## ¿Desde cuándo eres team leader y qué supone para ti tener esta responsabilidad en el equipo? ¿Cuáles son tus principales funciones?

He asumido el rol de team leader desde el inicio de esta temporada 2025-2026. La responsabilidad en esta situación es máxima, y la intento orientar siendo la figura de liderazgo desde el ejemplo de compromiso y esfuerzo que hace falta para ser miembro de un equipo de Formula Student. Mis principales funciones son dirigir el equipo tanto en decisiones técnicas como en el ámbito de gestión: contacto con patrocinadores, organización de los tiempos del proyecto, definir las dinámicas de trabajo, y mantener la motivación y el compromiso de todos los integrantes del equipo creando un buen ambiente a nivel personal y laboral.

## ¿A qué retos o dificultades os enfrentáis?

Uno de los mayores retos de cualquier equipo de Formula Student es la gran rotación de plantilla que sufre el equipo todos los años. Esto supone dedicarle mucha atención a retener el conocimien-

to adquirido dentro del equipo a lo largo de los años. Este año hemos sufrido una rotación excepcionalmente grande, por lo que hemos implementado sesiones de iniciación para que nuestros miembros se pongan al día y empezar a trabajar lo antes posible.

## ¿Cuáles son los próximos proyectos de vuestro equipo?

El objetivo de nuestro proyecto y de nuestro equipo este año es terminar el nuevo prototipo en tiempo récord para disponer del mayor margen posible para hacer testing. Con ello seremos capaces de analizar los potenciales fallos del coche y encontrar soluciones antes de la etapa de competición en verano.

## ¿Qué valor tiene para vosotros, como estudiantes, participar en MotorMadridStudent?

MotorMadridStudent tiene un valor incalculable para nosotros, tanto a nivel de experiencia como de labor de futuros ingenieros. Es la manera más real que encontramos durante el año de acercarnos a la dinámica de competición, donde ponemos a prueba el trabajo de toda una temporada y donde encontramos sentido a nuestro esfuerzo. Es una manera de cerrar el ciclo. Además, es una oportunidad enorme para darnos a conocer a los aficionados del motor y a la gente que no conoce todavía el proyecto Formula Student.

## ¿A qué te gustaría dedicarte cuando finalices tus estudios?

Me gustaría dedicarme al mundo de la competición en motorsport. Por ahora remonto hacia la Formula 1, pero las disciplinas abarcan muchísimas más categorías donde también me gustaría desarrollarme como ingeniero técnico y en las que estaría más que contento de ser parte.

# Carolina Tank

Team leader de UPM MotoStudent Electric



## ¿Cuántas personas componen vuestro equipo?

Actualmente está formado por alrededor de 35 estudiantes procedentes de distintas escuelas de la Universidad Politécnica de Madrid, que colaboramos de manera multidisciplinar en el desarrollo del prototipo.

## ¿Cuáles son las principales características e innovaciones tecnológicas del prototipo que habéis diseñado y fabricado?

Nuestro prototipo, la EME25-E, continúa la línea del modelo anterior, aprovechando los buenos resultados y la experiencia acumulada en la pasada edición. Hemos centrado nuestros esfuerzos en optimizar el rendimiento del motor, componente común a todos los equipos, que además se mantendrá en la competición durante los próximos seis años. Nuestra filosofía de equipo se centra en identificar el cuello de botella en lo que no podemos cambiar, los componentes que nos da la competición, para que el desarrollo del prototipo comparta el mismo potencial con el resto de los equipos. Por ello, entender y controlar su comportamiento desde esta edición era clave para consolidar una base técnica sólida que nos permita enfocar los próximos desarrollos hacia otras áreas en el futuro.

Para lograrlo, hemos diseñado y fabricado un banco de potencia propio, lo que nos permite realizar mediciones y optimizar los mapas motor directamente en la universidad, sin depender de desplaza-

mientos a circuito. Esta herramienta reduce significativamente los costes y tiempos por ensayo, además de facilitarnos un trabajo más continuo y preciso.

En el ámbito aerodinámico, un año más hemos tenido la oportunidad de realizar ensayos en el túnel de viento del Instituto de Microgravedad Ignacio Da Riva, con más de 18 horas de pruebas experimentales que, junto con las simulaciones CFD, han permitido lograr una reducción del 10 % en el coeficiente de drag respecto a la EME23-E.

El resto de los departamentos ha trabajado en la reducción de peso —más de 7 kg menos respecto a la versión anterior— y en la mejora de la fiabilidad general del prototipo.

## ¿Habéis participado en competiciones? ¿Cuál ha sido el palmarés?

Hemos participado en todas las ediciones de la categoría Electric de la competición MotoStudent, y hasta ahora no se nos ha dado mal. En ninguna edición se ha bajado del podio en carrera, así que esta edición esperamos poder mantenerlo.

La edición de 2018 es la más reseñable, se consiguió el premio Best Design además del podio en carrera.

La pasada edición de 2023 obtuvimos un segundo puesto en carrera, además de batir el récord histórico de velocidad máxima de la competición, alcanzando los 216 km/h en la recta de MotorLand Aragón. Creemos que estos resultados reflejan la importancia del trabajo aerodinámico realizado, teniendo en cuenta que todos los equipos competimos con el mismo motor.

Además, hace unos años participamos en el MEC (MotoEngineering Cup), un pequeño campeonato disputado por equipos de MotoStudent siguiendo el calendario del CIV, que se paró tras la irrupción del COVID.

En general tenemos la idea de sacarle más rendimiento a los prototipos, la carrera de MotoStudent se disputa una única vez cada dos años y se le podría sacar más partido a los prototipos.

## ¿Desde cuándo eres team leader y qué supone para ti tener esta responsabilidad en el equipo? ¿Cuáles son tus principales funciones?

Asumí el rol de team leader al finalizar la edición anterior, en octubre de 2023. Para mí, liderar el equipo supone una gran responsabilidad y crecimiento personal. El alcance del proyecto depende directamente de la capacidad de gestión, liderazgo y cohesión que seamos capaces de generar.

Aunque a menudo los retos parezcan técnicos, en realidad gran parte del trabajo pasa por coordinar a las personas. La moto es el resultado visible, pero detrás hay un enorme esfuerzo humano y de equipo. Creo que la función principal de un team leader es amplificar la sintonía del grupo y mantener la orientación al éxito compartido.

## ¿A qué retos o dificultades os enfrentáis?

El equipo funciona casi como una pequeña empresa. Más allá de los desafíos técnicos, el verdadero límite está en los recursos económicos, instalaciones y logísticos. Sin el apoyo de nuestros patrocinadores y colaboradores institucionales, muchos de nuestros desarrollos no serían posibles.

Este año contamos con el gran respaldo del Grupo Ibereólica Renovables, gracias al cual hemos podido desarrollar el banco de potencia. Sin su apoyo, habría sido impensable. También enfrentamos el reto de formar perfiles polivalentes, capaces no solo de resolver problemas de ingeniería, sino también de comunicarse eficazmente con empresas y entidades, algo esencial para el crecimiento del proyecto.

## ¿Cuáles son los próximos proyectos de vuestro equipo?

Nuestro objetivo más inmediato es la VIII edición de MotoStudent International Competition, donde competiremos en la categoría Electric frente a unos 50 equipos de 20 países. Sabemos que hemos desarrollado una moto claramente superior a la EME23-E y tenemos buenas sensaciones, aunque desconocemos el nivel del resto de participantes. Esa incertidumbre forma parte de la emoción de la competición.

### ¿Qué valor tiene para vosotros, como estudiantes, participar en MotorMadridStudent?

Una parte fundamental del espíritu del equipo es inspirar vocaciones STEM entre los más jóvenes. MotorMadridStudent es un escenario perfecto para acercar la ingeniería al público y mostrar de forma tangible todo lo que se puede lograr desde la universidad.

Personalmente, me enorgullece contribuir a visibilizar el papel de la mujer en la ingeniería y servir de referente para las chicas que aún están decidiendo su futuro; que sepan que también pueden estar aquí.

Además, este evento es una gran oportunidad para dar visibilidad a nuestros patrocinadores y al trabajo que se realiza puertas adentro de la UPM, en un entorno tan emblemático

como el Circuito de Madrid Jarama-RACE.

### ¿A qué te gustaría dedicarte cuando finalices tus estudios?

Actualmente estoy acabando mis estudios de máster en robótica y voy a comenzar un doctorado en Ingeniería Mecánica en la UPM. No tengo claro si intentaré seguir por la docencia, pero es algo que no descarto.

## Diego González García

Team leader de UPM MotoStudent Petrol



### ¿Cómo se llama vuestro equipo? ¿Cuántas personas lo componen?

Nuestro equipo está formado por aproximadamente 120 estudiantes de la Universidad Politécnica de Madrid, provenientes de distintas escuelas y especialidades de ingeniería: mecánica, electrónica, diseño industrial, ingeniería naval, aeroespacial, o automática, entre otras. Nuestra diversidad nos permite abordar el diseño y fabricación de la motocicleta desde una perspectiva multidisciplinar, combinando conocimientos técnicos con una fuerte orientación práctica e innovadora.

### ¿Cuáles son las principales características e innovaciones tecnológicas del prototipo que habéis diseñado y fabricado?

El prototipo se diseña completamente desde cero en cada edición, incorporando las lecciones aprendidas de proyectos anteriores. Este año, uno de los retos más ambiciosos que hemos asumido ha sido el diseño y desarrollo de un sistema de suspensión delantera alternativo, no conven-

cional. Tras un análisis exhaustivo de geometría, dinámica de motocicleta y comportamiento en circuito, optamos por implementar una suspensión tipo Hossack.

La suspensión Hossack, muy similar a la "duolever" de BMW, es una alternativa avanzada a la tradicional horquilla telescópica. En este sistema, la dirección y la suspensión están desacopladas, lo que permite una mayor libertad en la geometría del tren delantero. Entre sus principales ventajas destacan la mejora de la estabilidad en frenadas fuertes y paso por curva, al separar las fuerzas de dirección de las de suspensión; la reducción potencial de la masa no suspendida, lo que mejora la respuesta dinámica de la moto; una mayor precisión en el comportamiento del tren delantero y una sensación de conducción más estable en condiciones extremas; y la reducción potencial del peso de la moto y de la altura del centro de gravedad, lo que la hace más ágil y fácil de pilotar.

La implementación de este sistema ha supuesto un gran desafío, ya que nos obligó a rediseñar por completo el chasis. Desarrollamos internamente un chasis híbrido tipo sándwich, combinando aluminio y fibra de vidrio, con el objetivo de reducir el peso total del prototipo sin comprometer la rigidez estructural.

Gracias a la colaboración con empresas como Valmoldes, que se ha encargado del mecanizado de piezas, y Lasertek, que ha fabricado las chapas de aluminio necesarias, pudimos fabricar los componentes principales del chasis.

Posteriormente, el proceso de laminado y ensamblaje se realizó en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, contando con el apoyo de sus laboratorios, personal técnico y profesores. Esta infraestructura universitaria ha sido clave en el desarrollo del proyecto.

Este nuevo conjunto de geometría + suspensión Hossack + chasis híbrido nos ha permitido aumentar significativamente la velocidad de paso por curva, y reducir los tiempos por vuelta en varios segundos con respecto a los tiempos que marca su predecesora en nuestros circuitos de test, lo cual representa una mejora competitiva muy relevante. Los pilotos han alabado su chasis, y lo intuitivo y fácil que resulta de llevar rápido.

Además, este año hemos incorporado diversas innovaciones centradas en la reducción de peso y la mejora del rendimiento del motor, como un colín autoportante fabricado íntegramente en fibra de carbono; un sistema de alerones aerodinámicos para mejorar la estabilidad a alta velocidad y una admisión tipo RAM-Air rediseñada, que mejora la presión dinámica del aire y, por tanto, la eficiencia del llenado del motor.

Estas mejoras se suman a un enfoque constante en la optimización, tanto a nivel mecánico como electrónico, haciendo de nuestro prototipo uno de los más avanzados desarrollados hasta la fecha por el equipo.

### ¿Habéis participado en competiciones? ¿Cuál ha sido el palmarés?

Este año hemos utilizado el Campeonato Nacional de Velocidad de Portugal (CNV) como banco de pruebas



para validar varios de los sistemas que posteriormente hemos implementado en nuestro nuevo prototipo. Participamos con la EME23-P, nuestra moto de la edición anterior, en la categoría Premoto3, logrando resultados muy positivos.

Conseguimos varios séptimos puestos y un sexto puesto en carrera en los circuitos de Estoril y Portimão, enfrentándonos a equipos con mayor experiencia en competición y maquinaria de alto nivel. Estas participaciones nos han servido no solo para competir, sino para adquirir datos reales de comportamiento en pista y mejorar la puesta a punto del nuevo prototipo.

Actualmente, nos encontramos en plena preparación para competir con nuestra nueva moto, la EME25-P, en dos citas clave: el 19 de octubre en MotorLand Aragón, durante la competición MotoStudent International Competition 2025, y el 26 de octubre en la última prueba del CNV, nuevamente en Estoril.

En la edición anterior de MotoStudent, con la EME23-P, obtuvimos un séptimo puesto en carrera, lo que supuso una gran mejora respecto a ediciones anteriores. Este año, con todas las innovaciones técnicas introducidas y la experiencia acumulada en pista, aspiramos a superar ese resultado.

**¿Desde cuándo eres team leader y qué supone para ti tener esta responsabilidad en el equipo? ¿Cuáles son tus principales funciones?**

Hace casi tres años que tomé las riendas del equipo. Desde entonces, el grupo ha pasado de 25 a más de 110 miembros, gracias al esfuerzo conjunto y a la creación de un ambiente de trabajo muy unido y motivador. Para mí es un orgullo formar parte del equipo y, sobre todo, liderarlo. Es una experiencia que me ha hecho crecer tanto a nivel personal como profesional.

Mis principales funciones están relacionadas con la planificación y gestión de proyectos: definir objetivos, controlar el presupuesto del equipo, coordinar los diferentes departamentos, y asignar tareas y responsabilidades. Aun así, intento mantenerme siempre cerca de la parte técnica, colaborando en el diseño y desarrollo de componentes y apoyando a los miembros

cuando surgen problemas de ingeniería o fabricación.

**¿A qué retos o dificultades os enfrentáis?**

El principal reto del equipo es diseñar y fabricar una moto que sea segura, competitiva y fiable. Hablamos de una motocicleta que supera los 200 km/h, pesa menos de 90 kg y es pilotada al límite por un piloto. Cada detalle cuenta, y el margen de error es mínimo.

Esto implica un gran trabajo de diseño, simulación y fabricación, además de una coordinación constante entre los distintos departamentos. Otro gran desafío es la gestión de recursos: dependemos en gran parte del apoyo de patrocinadores, que nos ayudan con materiales, componentes y procesos de fabricación. Sin ellos, sería imposible llevar el proyecto delante de una manera competitiva.

**¿Cuáles son los próximos proyectos de vuestro equipo?**

Este año hemos dado un paso importante al comenzar a competir fuera de MotoStudent, participando en otras pruebas y eventos del ámbito universitario y nacional. Nuestro objetivo es seguir creciendo como equipo de competición, desarrollando motos cada vez más avanzadas y participando en carreras más exigentes.

A medio plazo, queremos consolidar una estructura estable que nos permita competir regularmente, formar a más estudiantes en ingeniería aplicada al motorsport y seguir representando a nuestra universidad, la Universidad Politécnica de Madrid, en el panorama internacional.

**¿Qué valor tiene para vosotros, como estudiantes, participar en MotorMadridStudent?**

MotorMadridStudent es una oportunidad enorme para dar visibilidad a nuestro trabajo y mostrar al público, empresas y universidades lo que somos capaces de hacer como estudiantes de ingeniería. Nos permite crear contactos con la industria, encontrar nuevos patrocinadores y, sobre todo, compartir experiencias con otros equipos que viven la misma pasión por la competición y la tecnología.

Además, es una forma de aprender a comunicar el proyecto, algo que a menudo se descuida en el ámbito técnico, pero que resulta esencial en el mundo profesional.

**¿A qué te gustaría dedicarte cuando finalices tus estudios?**

Personalmente, me apasiona el motorsport. Me encantaría poder dedicarme durante unos años al desarrollo de motos o coches y al trabajo en circuitos, formando parte de un equipo de competición.



# Roser Roca-Toha

Directora General y CEO de Airbus GeoTech

## “Un buen liderazgo tecnológico combina visión estratégica y profundidad técnica”

### Mónica Ramírez

Desde un pequeño pueblo de los Pirineos catalanes hasta la dirección de una de las divisiones más estratégicas de la industria aeroespacial europea. Roser Roca-Toha ha construido una trayectoria marcada por la curiosidad científica, la vocación internacional y el liderazgo tecnológico, convirtiéndose en una de las voces de referencia del sector aeronáutico y espacial.

Ingeniera de Sistemas de Telecomunicaciones y actual directora general y CEO de Airbus GeoTech, la filial digital de Airbus Defence & Space en España, Roca-Toha lidera desde Barcelona soluciones avanzadas de análisis geoespacial, inteligencia artificial y vigilancia de la Tierra. Su carrera dentro del grupo Airbus se ha desarrollado a lo largo de más de dos décadas y cinco países, ocupando posiciones clave en ingeniería, programas aeronáuticos, ventas y dirección global de negocio.

Formada en la Universitat Politècnica de Catalunya, y con estudios internacionales (Electrónica y Telecomunicaciones en ENSEEIHT -Toulouse- y formación ejecutiva en finanzas por la Columbia Business School -Nueva York-), su perfil combina profundidad técnica y visión estratégica. Esa dualidad le ha permitido participar en hitos como el desarrollo del A380, proyectos de satélites y pseudo-satélites estratosféricos o el impulso de sistemas aéreos no tripulados de nueva generación en Europa.

Reconocida con el Premio DonatíC 2024 y seleccionada por Forbes como una de las 100 mujeres más influyentes de Catalunya, Roca-Toha defiende un liderazgo comprometido con el impacto social de la tecnología y la promoción de vocaciones STEM.

Roser Roca-Toha forma parte del elenco de las profesionales que han sido elegidas para participar en la



Roser Roca-Toha

**“Durante mi primera experiencia, en Airbus, me sentía como una hormiguita participando en algo grande, muy grande: diseñando sistemas de aviónica para el avión comercial más grande del mundo, el A380”**

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.

En esta entrevista repasa su recorrido profesional, analiza los retos del sector aeroespacial y lanza un mensaje claro a las nuevas generaciones: la ingeniería es una herramienta clave para transformar el mundo.

### Ingeniera de Sistemas de Telecomunicaciones por la Universidad Politécnica de Cataluña. ¿Qué le hizo decidirse por realizar estudios de ingeniería?

Crecí en un pueblo pequeño de los Pirineos catalanes, sin referentes de ingeniería cercanos. Era una niña tímida, pero muy comprometida en mis estudios. En la escuela de mi pueblo, tuve la gran suerte de tener fantásticos profesores que cuando vieron que las matemáticas me gustaban y se me daban bien, me animaron a estudiar una ingeniería. A ellos les debo que me inspiraran a estudiar tecnología. Las telecomunicaciones en particular las escogí por la curiosidad acerca de la ciencia que no se puede ver a simple vista, pero que mejora nuestras vidas. Las comunicaciones satelitales, por ejemplo, me parecían ciencia ficción, y yo quería saber más sobre algo tan increíble.

### ¿Cómo recuerda su etapa inicial en el ámbito profesional?

Mi primera experiencia profesional ya fue en el extranjero, en el Reino Unido y en Francia. Durante mi primera experiencia, en Airbus, me sentía como una hormiguita participando en algo grande, muy grande: diseñando sistemas de aviónica para el avión comercial más grande del mundo, el A380.

Aprendí al lado de profesionales excepcionales. Yo seguía siendo una joven tímida, así que observaba mucho, escuchaba y aprendía. A pesar de mi corta experiencia como ingeniera, desde el inicio en Airbus se

me dio mucha confianza y responsabilidad: tenía que manejar unos seis proveedores de aviónica, definir los requerimientos de diseño, hacer las auditorías técnicas de los sistemas, y diseñar la campaña de ensayos en laboratorio y vuelo para poder certificar los sistemas.

Tuve momentos realmente mágicos, como la entrada en servicio del A380, apoyando esas primeras operaciones, realizar ensayos en vuelo por todo el mundo, y también la certificación del primer sistema de comunicaciones por satélite de banda ancha de la historia de la aviación.

Esas primeras experiencias en ingeniería revelaron mi pasión por el sector aeroespacial, y a partir de ahí, fui avanzando pasito a pasito en otras disciplinas.

**Especializada en el sector aeronáutico y aeroespacial, actualmente lidera la filial de Airbus dedicada a soluciones digitales de espacio y geoespaciales. ¿Cuáles son las principales funciones que desempeña?**

En nuestra filial, somos el equipo de referencia en Airbus, a escala mundial, de análisis de geoinformación satelital y de desarrollo de tecnología para la vigilancia de la Tierra desde la estratosfera.

Por un lado, basado en tecnología de IA y deep learning, mi equipo extrae datos, información e inteligencia en modo digital, de las imágenes que recibimos de los satélites de Airbus, como Pleiades Neo. A partir de esas imágenes podemos, por ejemplo, hacer el mapeado de fronteras, de ciu-

**“Los próximos años serán el escenario de un avance tecnológico acelerado en Europa, tanto lo que se refiere a drones como el sector aeroespacial de manera general. El conocimiento que estamos desarrollando es clave para la soberanía tecnológica europea”**

dades e incluso de datos de vegetación.

Por otro lado, nuestro equipo de ingenieros desarrolla la carga de pago (el sistema de electrónica embarcado) de pseudo-satélites que operan en la estratosfera, a 76.000 pies. Son sistemas con una resolución de hasta 18cm, a tiempo real. Con esta tecnología podemos quedarnos fijamente en un punto, o podemos por ejemplo seguir una trayectoria, y un plan de vuelo, como si fuera un avión.

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

Hay dos cosas que me inspiran a diario de mi trabajo: mi equipo, y el impacto de nuestra tecnología para la sociedad. Tengo la suerte de estar rodeada por un equipo tan humano, como profesional. Aprendo de ellos cada día, en valores, en compromiso y también de su experiencia técnica, su manera de diseñar soluciones tecnológicas muy compleja, colaborando con equipos internacionales. Disfrutamos trabajando juntos, y esa complicidad para mí es muy importante.

Por otro lado, nuestro trabajo ayuda la sociedad en los momentos más críticos. Durante la DANA, por ejemplo, siendo capaces de extraer información muy rápido para poder tomar decisiones de apoyo a las operaciones. Y, por otro lado, haciendo análisis geoespacial de seguridad para proteger a la población civil en caso de emergencias. La tecnología desarrollada por Airbus también ayuda a los agricultores a hacer un mejor seguimiento de sus cultivos, o a empresas, para poder certificar que sus productos no proceden de bosques en deforestación.

**Además, creó el departamento de marketing de Sistemas Aéreos No Tripulados de Airbus, en Alemania, y ha liderado proyectos tecnológicos por Airbus en Europa, América, Oriente Medio y África. ¿Qué puede contarnos sobre ello?**

Los Sistemas Aéreos no Tripulados (UAS, por sus siglas en inglés) ya son clave para el presente y el futuro de Europa. Particularmente, los UAS con capacidades más avanzadas, como el Eurodrone, necesitan de una colaboración entre naciones, y sus

**“En nuestra filial, somos el equipo de referencia en Airbus, a escala mundial, de análisis de geoinformación satelital y de desarrollo de tecnología para la vigilancia de la Tierra desde la estratosfera. Basado en tecnología de IA y deep learning, mi equipo extrae datos, información e inteligencia en modo digital, de las imágenes que recibimos de los satélites de Airbus, como Pleiades Neo”**

industrias.

Cuando creé el departamento de Marketing de Producto de UAS, esa colaboración transnacional era clave para mí, debíamos estar cerca de nuestras naciones cliente, y por eso me rodeé de un equipo internacional, basado en cuatro países europeos distintos. También era un equipo diverso, con 5 nacionalidades, distintos backgrounds y paridad de género.

El departamento de marketing ejerce una función muy importante: debe ser cercano a los clientes y conocedor de las necesidades del mercado y usuarios, para decidir las capacidades prioritarias de desarrollo y transmitirlo así a las oficinas de diseño.

Fue un momento histórico, donde se firmó el desarrollo del Eurodrone entre 4 países distintos, el primer pseudo-satélite de ala fija de Airbus, el Zephyr, tuvo su primer vuelo (Record Guinness) y se avanzaron las charlas para desarrollar en España el dron de capacidades tácticas avanzadas, el SIRTAP.

¿Sabías que la envergadura de las alas del Eurodrone es casi como la de un A320? ¡Son drones muy muy grandes!



**¿Cómo valora la situación de este sector en la actualidad? ¿Cómo cree que evolucionará en los próximos años?**

Los UAS han llegado para quedarse. A pesar de que son aún los grandes desconocidos para la mayor parte de la población, ya nos están ayudando, capturando mucha información en tiempo real para ayudarnos a tener un buen conocimiento de las condiciones de nuestro entorno.

Los próximos años serán el escenario de un avance tecnológico acelerado en Europa, tanto lo que se refiere a drones como el sector aeroespacial de manera general. El conocimiento que estamos desarrollando es clave para la soberanía tecnológica europea.

**¿Cuáles son los principales retos y dificultades a los que se enfrenta el sector?**

Hoy en día tenemos dos retos principales en el sector aeroespacial: la fragmentación de soluciones en Europa, y la dependencia tecnológica de otros países fuera de la UE. Pero, de todo reto sale una oportunidad. Estamos trabajando para desarrollar tecnología aeroespacial desde Europa para Europa, y eso ya está creando mucho empleo y conocimiento que se va a poder aplicar a otros sec-

**“Una de las edades clave son de los 10 a los 14, cuando nuestros jóvenes empiezan a elegir asignaturas opcionales y vías especializadas. Ese es el momento donde tenemos que acercar nuestras chicas a referentes tecnológicas inspiradoras, humanas y cercanas, y a ser muy vigilantes con comentarios adversos al riesgo, y naturalizar la ciencia”**

tores tecnológicos también.

Por otro lado, la situación geopolítica actual ha impulsado una voluntad de colaboración europea para desarrollar las capacidades más avanzadas, también en casa.

**Recientemente ha recibido varios reconocimientos por su labor, como el Premio Dona TIC 2024, y ha sido reconocida por Forbes como una de las 100 mujeres más influyentes de Cataluña (2025), entre otros. ¿Qué suponen para usted estos reconocimientos?**

Gratitud, honor y también mucha responsabilidad. Ambos reconocimientos han sido sorpresas inesperadas. Los entiendo como el resultado del gran trabajo en equipo de mi empresa, no solo el mío.

Es responsabilidad porque un día te levantas, apareces en el periódico y sientes que te has convertido en una referente. Me gustaría utilizarlo para poder inspirar acción positiva, generosidad, para acercar la tecnología a nuestra realidad diaria, a las mujeres, y para poder demostrar que las chicas nacidas en entornos alejados y rurales también podemos llegar lejos.

**En la actualidad, se aprecia una falta de vocaciones femeninas en ciertas áreas, especialmente en las STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas), ¿a qué piensa que es debido? ¿Qué iniciativas o medidas considera que podrían llevarse a cabo para lograr una mayor presencia femenina en las carreras técnicas?**

Despertar y acompañar vocaciones STEM forma parte de las actividades que hago, a título personal, que más me enorgullecen.

Los estereotipos desgraciadamente crecen en nuestra sociedad de manera inconsciente. Hay que darles conciencia para poderlos invertir. Una de las edades clave son de los 10 a los 14, cuando nuestros jóvenes empiezan a elegir asignaturas opcionales y vías especializadas. Ese es el momento donde tenemos que acercar nuestras chicas a referentes tecnológicas inspiradoras, humanas y cercanas, y a ser muy vigilantes con comentarios adversos al riesgo, y naturalizar la ciencia. El lado de la ciencia que más apela a las chicas es el

**“Despertar y acompañar vocaciones STEM forma parte de las actividades que hago, a título personal, que más me enorgullecen”**

impacto para poder mejorar el mundo: soluciones sostenibles, soluciones para ayudar la sociedad...

**¿Qué mensaje transmitiría a las jóvenes estudiantes en este sentido?**

¡Que las necesitamos! Si quieren que este mundo sea mejor, la ciencia es un camino fundamental. También quiero decirles que esto no va de ser perfectas en todo lo que hacen. Se abre camino cometiendo errores, y hay que normalizar que un error no es fracaso, sino un aprendizaje, entrenamiento para el pensamiento crítico y tecnológico.

**El pasado mes de noviembre, la exposición “Mujeres Ingenieras de Éxito”, organizada por UAITIE, se trasladó a Lleida, concretamente al Institut d'Estudis Ilerdencs (IEI), primero, y al Parque Agrobiotech, después. La muestra cuenta con la representación de 31 referentes femeninas de la ingeniería, y su incorporación ha sido la más reciente, precisamente en la exposición de Lleida. ¿Qué opina de esta iniciativa? ¿Qué valores pueden aportar a la sociedad este tipo de propuestas?**

Son precisamente estas iniciativas las que visibilizan las referentes que tanto necesitamos. Ojalá muchos padres, madres, abuelos, abuelas... traigan a sus adolescentes a verla para que descubran que las ingenieras somos personas normales, pero que hacemos grandes cosas.

**Por último, ¿cuáles son sus próximos proyectos?**

Mi proyecto personal y profesional va a seguir relacionado con el desarrollo de tecnología europea. Es mi brújula. Sería un honor seguir apoyando a Airbus, como empresa europea que es, liderando esos desarrollos en casa.

# Seguro Complementario **Mupiti Accidentes**

**No puedes  
poner la vida  
en pausa**



**pero  
sí puedes  
protegerte por  
20<sup>euros</sup>  
¡AL AÑO!**

**Mupiti Accidentes** es el seguro diseñado para ser tu primera opción de cobertura básica para tus familiares en caso de fallecimiento por accidente, o para ti en caso de incapacidad por accidente. Por una mínima cuota al alcance de cualquier bolsillo, puedes disfrutar de la garantía y tranquilidad de reducir las consecuencias que un accidente pueda tener para ti o los tuyos.

Riesgos cubiertos	Cobertura básica	Cobertura doble
Fallecimiento por accidente	21.000€	42.000€
Incapacidad permanente absoluta por accidente	36.000€	72.000€
Incapacidad permanente parcial por accidente	Hasta 18.000€	Hasta 36.000€
Incapacidad permanente total por accidente	18.000€	36.000€
Prima anual	20,11€	40,22€

**EL SEGURO DE ACCIDENTES  
AL ALCANCE DE TODOS**

Infórmate en el teléfono  
**695 448 517**

También en  
maria.correa@mupiti.com  
www.mupiti.com







Tecnología médica. Fuente: Messe Frankfurt GmbH / Jean-Luc Valentin.

## FRANKFURT

### >> Comienza la cuenta atrás de TECHTEXTIL, la principal feria internacional de textiles técnicos y materiales no tejidos

La principal feria internacional de textiles técnicos y materiales no tejidos muestra toda la gama de textiles técnicos, textiles para prendas funcionales y tecnologías textiles en Techtextil 2026, que se celebrará del 21 al 24 de abril en Messe Frankfurt (Alemania).

Cada dos años, Techtextil reúne la completa gama internacional de fibras, textiles técnicos, materiales no tejidos y textiles para prendas funcionales. Representa una plataforma global de primer orden para investigadores, ingenieros, fabricantes y usuarios de textiles de uso técnico con aplicaciones en diferentes industrias, como la arquitectura, industria automotriz, construcción, indumentaria, protección contra riesgos, aviación y aeronáutica, medicina, la industria del mueble y el deporte. Se celebra en paralelo con Texprocess, la feria internacional de procesamiento de textiles y materiales flexibles, que muestra las últimas máquinas, instalaciones, procesos y servicios para las industrias de la confección y del calzado, entre otras industrias textiles.

Los textiles técnicos y los no tejidos se pueden utilizar de forma versátil. Techtextil reúne todas las áreas de aplicación. Aquí es donde los fabricantes de automóviles se reúnen con los diseñadores de moda y los ingenieros médicos con los especialistas del sector.

El alto número de inscripciones y la gran cantidad de nuevos expositores auguran un gran éxito en Techtextil y Texprocess 2026. Son tiempos turbulentos para la industria: la recesión, las exigencias de sostenibilidad y los desafíos geopolíticos presionan a los participantes del mercado con un comportamiento de compra moderado, inversiones limitadas o complejos ajustes de procesos. La respuesta de la industria: innovación y soluciones excepcionales. Ya sean nuevas ideas de materiales, procesos eficientes o desarrollos sostenibles, las principales plataformas para presentarlos son las ferias líderes mundiales Techtextil y Texprocess en Fráncfort. Esto también se refleja en el alto

interés actual por participar. Los expositores aprovechan esta oportunidad para posicionarse globalmente y prepararse para el futuro. Además de las grandes empresas habituales, en 2026 participará un número excepcionalmente elevado de nuevos expositores.

El excelente nivel de reservas demuestra que la industria busca más que nunca una visibilidad. La clave reside en encontrar los socios adecuados para impulsar innovaciones y aprovechar las oportunidades de mercado.

## BARCELONA

### >> Exposólidos, Expofluidos y Polusólidos 2026: todo preparado para la gran cita de la tecnología aplicada a los procesos industriales

Las ferias Exposólidos, Expofluidos y Polusólidos 2026 ultiman los preparativos para su celebración conjunta los días 10, 11 y 12 de febrero en La Farga de L'Hospitalet (Barcelona).

El Salón de la Tecnología y el Procesamiento de Sólidos es la principal feria del sur de Europa especializada en la manipulación y procesamiento de sólidos, materiales a granel, polvos secos, semi sólidos, y separación de sólidos y líquidos. Por su parte, el Salón de la Tecnología y el Proceso de Fluidos es una feria única en Europa especializada en la tecnología para gestionar los fluidos en los procesos industriales. Por último, el Salón de la Tecnología para la Captación y Filtración es un evento internacional único en el mundo especializado en tecnología para la captación y filtración de emisiones en procesos.

Convertidas en un referente europeo, estas tres ferias vuelven a consolidarse como punto de encuentro estratégico para la industria. En esta edición, la organización ha logrado la ocupación completa del espacio expositivo, confirmando la confianza del sector. De este modo, más de 200 empresas nacionales e internacionales participarán en esta nueva edición, en la que mostrarán las últimas innovaciones en procesamiento de sólidos, gestión de fluidos, y sistemas de captación y filtración industrial.



Además de la zona expositora, el evento cuenta también con un destacado programa técnico. En este sentido, se llevarán a cabo conferencias especializadas, presentaciones de casos reales, sesiones TechTalks y zonas temáticas centradas en la sostenibilidad, la eficiencia energética y la digitalización industrial.

Entre las actividades destacadas figura también la conferencia del reconocido economista y divulgador Marc Vidal, titulada "Economía y Tecnología: ¿Llegas a tiempo al futuro?" (inscripción gratuita), que se celebrará el 12 de febrero a las 15:30 h en la Sala Polivalente de La Farga de L'Hospitalet. En su intervención, Marc Vidal abordará temas relacionados con los grandes cambios económicos propiciados por las tecnologías emergentes, los desafíos que enfrentan las empresas industriales en procesos de digitalización y automatización, y cómo profesionales y organizaciones pueden adaptarse para aprovechar las oportunidades que abre esta nueva era.

## BARCELONA

### >> ADVANCED FACTORIES: la mayor feria de robótica y automatización industrial del sur de Europa

La décima edición de Advanced Factories, el evento líder en automatización, robótica y tecnologías 4.0 del sur de Europa, se celebrará del 5 al 7 de mayo de 2026 en Fira de Barcelona, cumpliendo así una década de impulso de las plantas de producción hacia modelos más integrados, eficientes y competitivos. Bajo el lema "Next-Gen of Automation", Advanced Factories convertirá Barcelona en el epicentro de la industria avanzada a nivel comunitario, en un contexto global de transformación geopolítica que exige reforzar la competitividad y la autonomía del continente.



Durante tres días, más de 680 firmas expositoras presentarán sus últimas soluciones tecnológicas en automatización industrial, mantenimiento predictivo, IoT y ciberseguridad, robótica, impresión 3D, inteligencia artificial, cloud industrial, machine learning, software industrial, big data, visión artificial y eficiencia energética, para acercarlas a los más de 33.000 directivos industriales que visitarán la feria. En esta edición, además, se pondrá un foco especial en sectores como la intralogística y los sistemas de integración de la producción que impulsan la digitalización del ámbito manufacturero, aspectos clave para optimizar la eficiencia operativa en compañías de todos los tamaños y sectores.

ADVANCED FACTORIES 10 YEARS EXPO & CONGRESS

5-7 mayo 2026  
Fira de Barcelona

**NEXT-GEN OF AUTOMATION**

IA | IoT | Automation | Robotics | Intralogistics | Greentech | IT/OT

www.advancedfactories.com

En paralelo, se desarrollará el Industry 4.0 Congress, el mayor foro de Industria 4.0 en Europa, que reunirá a más de 420 expertos internacionales en 5 auditorios simultáneos para compartir más de 200 experiencias industriales, innovaciones tecnológicas y estrategias para impulsar la productividad y competitividad del tejido industrial. El congreso abordará las últimas tendencias y avances para sectores clave como la alimentación, farmacéutica, automoción, ferroviaria, textil, metalúrgica, electrónica, bienes de consumo, así como la aeroespacial y naval.

Además, se organizarán foros especializados por temáticas, entre los que destacan el de Robótica, Inteligencia Artificial, Ciberseguridad, Greentech o 3D Printing. También habrá summits profesionales dirigidos a los diferentes perfiles asistentes, como el CEO Summit, el Plant Manager Summit y el CIO Summit.

Entre los temas más relevantes que se explorarán destaca la convergencia entre los sistemas de información (IT) y los sistemas de producción (OT), un factor fundamental para construir fábricas más eficientes, flexibles y resilientes. Esta integración permite una visión en tiempo real de toda la cadena de valor, facilita la automatización de procesos, mejora la capacidad de respuesta ante incidencias, y optimiza el uso de recursos y energía, posicionándose como una prioridad estratégica para la industria manufacturera actual.

### HANNOVER

#### >> HANNOVER MESSE: la mayor plataforma para la transformación industrial se celebrará en abril

Hannover Messe 2026, la feria industrial líder mundial, se celebrará del 20 al 24 de abril de 2026 en el recinto ferial de Hannover (Alemania), reuniendo a empresas de ingeniería mecánica, eléctrica y digital para mostrar soluciones de automatización, digitalización y sostenibilidad industrial. Se trata de una plataforma clave para la tecnología industrial, la innovación y la creación de redes de contacto a nivel internacional, con acceso a mercados y tendencias clave, que este año tendrá a Brasil como país invitado.

Más de 3.500 empresas expositoras de los sectores de la ingeniería mecánica, la industria eléctrica y digital, y la energía

se reúnen para presentar soluciones de cara a una producción competitiva y sostenible. Las principales áreas de exposición son Automatización y Digitalización, Energía e Infraestructura Industrial, e Investigación y Transferencia de Tecnología.

Hannover Messe es, por tanto, un evento de networking para expertos internacionales, responsables en la toma de decisiones de inversión, y usuarios. Con visitantes de más de 150 países, la feria ofrece la mayor plataforma para la transformación industrial. Los expositores obtienen mayor alcance, contactos de alta calidad y acceso a mercados a los que de otro modo sería difícil llegar.

En esta importante feria se deciden las inversiones en automatización, digitalización y sostenibilidad. Los expositores se reúnen con responsables de la toma de decisiones de la ingeniería mecánica, ingeniería eléctrica, automoción y otros sectores clave de la industria manufacturera.

Además, en este evento se dan cita sectores de alta tecnología como la aeroespacial y la médica, que dependen de tecnologías de vanguardia y nuevos materiales. También tienen su espacio las industrias química, farmacéutica y alimentaria, obligadas constantemente a innovar y cumplir con las regulaciones, así como las industrias de TI, reciclaje, investigación y seguridad, que están configurando la transformación industrial.

La inteligencia artificial (IA) es una tecnología clave para la competitividad de Europa. Su aplicación en la fabricación está transformando radicalmente los procesos y modelos de negocio, permitiendo así una producción competitiva, eficiente e inteligente. Por ello, en la próxima feria de Hannover, la IA será un tema recurrente en todos los pabellones y ocupará un lugar central en casi todos los stands.

Por otra parte, Hannover Messe cuenta ya con casi 80 ponentes de todo el mundo en el escenario central. En la feria, ofrecerán información exclusiva sobre su trabajo, compartirán conocimientos prácticos y ofrecerán una orientación clara sobre el futuro de la industria. Entre ellos se encuentran líderes de opinión, ejecutivos, científicos y políticos que, con valentía y espíritu innovador, están forjando nuevos caminos, contribuyendo así al desarrollo de la producción industrial.

#### España será el país invitado de Hannover Messe 2027

Hannover Messe 2027 contará con España como "Partner



Fuente: Hannover Messe.





España y Alemania firman el Memorándum de Entendimiento, el pasado mes de noviembre en Madrid.

country 2027". Jordi García Brustenga, secretario de Estado de Industria del Ministerio de Industria y Turismo de España, y Marco Siebert, director de Relaciones Internacionales de Hannover Messe, han firmado, el pasado mes de noviembre, un Memorándum de Entendimiento, en la sede de la Confederación Española de Organizaciones Empresariales (CEOE), en Madrid, en un acto en el que también ha estado presente Thomas Jarzombek, secretario parlamentario del Ministerio de Transformación Digital y Modernización del Gobierno de Alemania.

"España y Alemania comparten una sólida relación industrial basada en la confianza y una visión común para el futuro económico de Europa. La participación de España como país socio en la Hannover Messe 2027 refleja la fortaleza de nuestro tejido empresarial y nuestro compromiso con una industria más sostenible, tecnológica, digital y competitiva. Para España, es un honor fortalecer esta cooperación estratégica y seguir impulsando juntos el crecimiento industrial en Europa", ha señalado Brustenga.

Por su parte, Jochen Köckler, presidente del Consejo de Administración de Deutsche Messe, ha destacado que "España es el país socio ideal para la Hannover Messe 2027. No solo desempeña un papel de liderazgo en tecnologías de futuro, como la electromovilidad y el hidrógeno verde, sino que también está comprometida con una industria digital y sostenible. En tiempos de convulsión global, la estrecha colaboración con España adquiere una importancia estratégica. Esta combinación convierte a España en un socio clave para Alemania, Europa y la comunidad global en el camino hacia una industria sostenible, digitalizada y competitiva".

## MÁLAGA

### >> Expo AgriTech 2025 congregó a más de 8.000 profesionales consolidando Málaga como epicentro de la innovación agrícola

A lo largo de tres días, en Expo AgriTech 2025 se han presentado 604 soluciones pioneras en maquinaria avanzada, sistemas de riego inteligente, agroenergía, agricultura de precisión y biofertilizantes para mejorar la rentabilidad de los cultivos.

Los 8.149 profesionales y agricultores que han asistido a la feria han podido descubrir las últimas novedades en maquinaria avanzada y soluciones digitales con las que incrementar la rentabilidad, eficiencia y calidad de sus explotaciones. La cita ha generado un impacto de más de 7 millones de euros y ha posicionado a Málaga en el epicentro de la innovación agrícola en Europa.

Además, el encuentro ha albergado distintas zonas inmersivas como la Explotación 4.0, el Olivar 4.0 y el Invernadero Tech, donde se ha mostrado las oportunidades de la adopción tecnológica en los distintos tipos de cultivo. A su vez, se han desarrollado actividades, de la mano de La Vega Innova, incluyendo un hackathon, en el que se ha lanzado un desafío sobre la gestión de cultivos subtropicales, y una formación de poda del almendro con realidad virtual.

Del mismo modo, la feria ha acogido el Congreso AgriTech 4.0, el mayor foro de innovación agrícola de Europa, que ha citado a 412 ponentes. En sus auditorios, los expertos han desgranado las iniciativas digitales que están ayudando a la modernización del sector, como la IA, la robótica o la sensórica. También, han puesto el foco en el potencial de la agricultura regenerativa para mejorar la salud del suelo, en las novedades del mercado de carbono y en las estrategias para atraer talento en la agricultura, a partir de voces como las de los agroinfluencers.

#### La IA como motor de transformación del campo

Entre las tecnologías que más se han tratado en el Congreso AgriTech 4.0, la inteligencia artificial ha ocupado un lugar central por la revolución que ha supuesto en todas las actividades económicas, sin ser la agricultura una excepción. Sobre ello, Marcos Urarte, presidente de la consultora Pharos, ha asegurado que "representa uno de los mayores desafíos para la humanidad. Ya no debemos verla solo como una herramienta, sino como una estrategia".

Siguiendo con las perspectivas de futuro, Urarte ha asegurado que el campo estará marcado por la escasez de recursos hídricos y naturales. "Será necesario reinventar el sector, apoyándonos en la tecnología y en algoritmos capaces de optimizar decisiones. La inteligencia artificial, experta en detectar patrones, dotará a los agricultores de herramientas para adaptarse a estos nuevos desafíos", ha concluido.





# Marc Isambard Brunel, el ingeniero que venció al río Támesis y sentó las bases de la tunelación moderna

**Revolucionario, visionario y perseverante: así fue Marc Isambard Brunel, el ingeniero anglo-francés cuya obra más célebre, el Túnel del Támesis, a su paso por Londres, marcó un antes y un después en la historia de la ingeniería civil. A pesar de enfrentarse a dificultades técnicas, económicas y personales, su legado perdura en cada metro excavado bajo las grandes ciudades del mundo.**

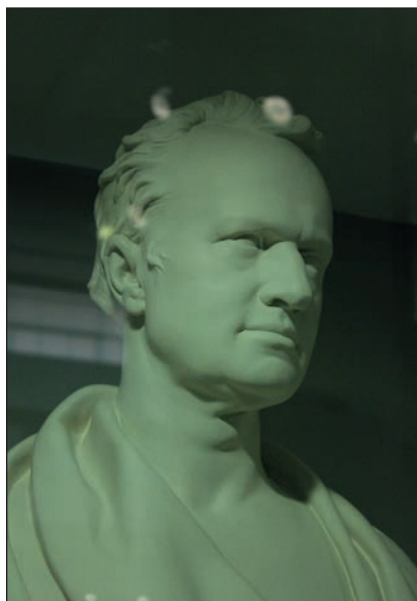
**Mónica Ramírez**

Marc Isambard Brunel fue el ingeniero que soñó bajo el agua. En la historia de la ingeniería moderna hay nombres que resuenan con fuerza por sus monumentales logros. Entre ellos, el de Isambard Kingdom Brunel es quizás uno de los más reconocibles. Sin embargo, su padre, Marc Isambard Brunel, fue un verdadero pionero cuyo genio técnico y determinación abrieron literalmente caminos donde antes solo había imposibles. Su legado más famoso, el Túnel del Támesis, fue una hazaña sin precedentes que sentó las bases de la ingeniería subterránea contemporánea.

## De Normandía a Nueva York: el inicio de una vida marcada por la técnica

Marc Isambard Brunel nació en 1769 en Hacqueville, Normandía, en el seno de una familia agrícola acomodada. Como segundo hijo, se esperaba que siguiera una carrera religiosa, pero desde joven mostró un talento especial por el dibujo, las matemáticas y la música. A los once años fue enviado a un seminario en Ruan, donde en lugar de latín y teología, desarrolló habilidades como carpintero naval. Su pasión lo llevó pronto a embarcarse como cadete en una fragata francesa, viajando a las Indias Occidentales y construyendo incluso sus propios instrumentos de navegación.

Pero su vida dio un giro drástico con la Revolución francesa. Leal a la monarquía, Brunel se vio forzado a huir tras expresar públicamente su desaprobación del juicio de Luis XVI. En 1793, embarcó rumbo a los Estados Unidos, dejando atrás a Sophia Kingdom, una joven inglesa de la que se había enamorado.



Busto de Marc Isambard Brunel (Museo de Ciencias, Londres). Fuente: Stephen Dickson, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons.

## Ingeniero jefe y visionario

En Nueva York, Brunel se abrió camino rápidamente. Se implicó en planes de infraestructura como un canal entre el río Hudson y el lago Champlain, y en 1796 fue nombrado ingeniero jefe de la ciudad. Diseñó arsenales, muelles y fábricas, aunque gran parte de su obra fue destruida durante las revueltas posteriores. A pesar de estos logros, su mente ya estaba orientada hacia Europa: enterado de las dificultades de la Marina Real británica para fabricar bloques de polea, diseñó un sistema mecánico para automatizar su producción. Con esta idea zarpó hacia Inglaterra en 1799.

## Revolución mecánica

Reencontrado con Sophia, que había sobrevivido a los horrores del Terror revolucionario, se casaron en Londres. Juntos tuvieron tres hijos, incluido el

famoso Isambard Kingdom Brunel. En el ámbito profesional, Marc colaboró con el ingeniero Henry Maudslay para construir máquinas de precisión que revolucionaron la fabricación naval: por primera vez, la producción de bloques para barcos se mecanizaba, permitiendo multiplicar por diez la capacidad productiva.

Estas máquinas, instaladas en los astilleros de Portsmouth, fueron una revolución industrial en sí mismas, aunque el Almirantazgo tardó años en pagarle por su contribución. Esta tónica de genialidad técnica enfrentada a la burocracia y la falta de apoyo económico marcaría buena parte de su vida.

## Ingeniero prolífico en tiempos difíciles

A lo largo de su carrera, Brunel diseñó aserraderos, maquinaria para producir chapados de madera y sistemas para fabricar botas militares en masa. Su nombre fue reconocido en instituciones científicas de toda Europa: la Royal Society británica, la Academia Sueca de Ciencias y la Academia Estadounidense de las Artes y las Ciencias, entre otras. Pero sus finanzas no fueron tan estables como su prestigio: en 1821 fue encarcelado por deudas. Solo la intervención del gobierno británico —alertado por su posible emigración a Rusia— le devolvió la libertad.

## El Túnel del Támesis: una obra monumental y temeraria

A principios del siglo XIX, Londres se expandía con una rapidez vertiginosa, y el comercio fluvial del Támesis congestionaba los muelles y dificultaba la comunicación entre las dos orillas del río. Las rutas de superficie estaban saturadas, y no existían aún puentes suficientes

en la zona este de la ciudad para aliviar el tráfico. La necesidad de una solución subterránea era evidente, pero la idea de excavar bajo un río navegable se consideraba, en aquel entonces, casi suicida.

La experiencia previa de otros ingenieros había sido desalentadora. En 1805, un intento liderado por Richard Trevithick —el proyecto Thames Archway— había fracasado tras múltiples inundaciones. El consenso técnico era que atravesar el lecho del Támesis, compuesto de arcilla blanda y traicioneras arenas movedizas, era impracticable.

Pero Marc Isambard Brunel pensaba lo contrario. Desde hacía años había trabajado en una idea revolucionaria, inspirada en un organismo marino que minaba la madera de los cascos de los barcos: el teredo navalis, también conocido como "broma". Este gusano xilófago, dotado de una cabeza dura en forma de concha, perforaba la madera mientras se protegía de los colapsos del material. Brunel, con visión biomimética, desarrolló a partir de esta observación su invención más trascendental: el escudo tunelador.

### El escudo tunelador: innovación sin precedentes

Patentado en 1818, el "shield" de Brunel fue una obra maestra de la ingeniería mecánica. Se trataba de una estructura metálica de forma rectangular, dividida en doce marcos verticales, colocados uno junto al otro, como los tomos de una estantería. Cada marco contenía a su vez tres compartimentos superpuestos, de manera que el escudo ofrecía un total de 36 celdas individuales, cada una operada por un obrero que excavaba el frente del túnel de forma segura y controlada.

La verdadera innovación del escudo radicaba en que permitía mantener la presión del terreno y avanzar de manera gradual: mientras los obreros trabajaban en sus compartimentos, las paredes laterales del escudo protegían a los trabajadores de derrumbes, y al avanzar la estructura mediante gatos mecánicos, se podía revestir el túnel con ladrillos inmediatamente detrás de la excavación. Así, por primera vez en la historia, se podía excavar en un terreno inestable sin colapsos constantes, transformando la forma de construir túneles para siempre.

Cada parte del escudo podía moverse de manera independiente, permitiendo ajustar la presión y la dirección de forma precisa. El concepto era tan eficaz que



Interior del túnel del Támesis durante su construcción en 1830. Fuente: Autor desconocido. Dominio público, vía Wikimedia Commons.

se convirtió en el modelo base de todos los escudos de tunelación modernos, desde los que perforaron el Metro de Londres hasta los empleados en el túnel del Canal de la Mancha y los proyectos actuales con tuneladoras TBM.

### Una obra marcada por los contratiempos

Los trabajos comenzaron oficialmente en febrero de 1825 con el hundimiento del pozo vertical de Rotherhithe, construido como una torre de ladrillo sobre un anillo de hierro que se fue hundiendo lentamente por su propio peso mientras se excavaba el suelo desde el centro. Esta maniobra, en sí misma una proeza, se enfrentó a dificultades imprevistas: el cilindro se atascó y Brunel tuvo que improvisar añadiendo 50.000 ladrillos como peso extra. A partir de este problema aprendió una valiosa lección de diseño que aplicaría al pozo de Wapping, dándole una forma ligeramente troncocónica en lugar de cilíndrica, para evitar el bloqueo por fricción con el terreno.

Una vez instalado el escudo en el fondo del pozo, comenzaron las excavaciones hacia el norte, bajo el lecho del río. El progreso era lento: apenas 3 a 4 metros por semana, con constantes filtraciones, derrumbes parciales y condiciones sanitarias deplorables. Las aguas residuales del Támesis se filtraban constantemente, generando gases nocivos como el metano y el ácido sulfhídrico,

que enfermaban a los trabajadores y provocaban explosiones al contacto con las lámparas de aceite. En varias ocasiones, Brunel y su hijo Isambard Kingdon —entonces un joven de 20 años— se vieron obligados a tomar decisiones arriesgadas para continuar los trabajos.

Las dificultades técnicas se agravaban con los problemas financieros. El proyecto, financiado por la Thames Tunnel Company, se encontraba al borde de la quiebra. Para recaudar fondos, se permitió al público visitar la obra pagando una entrada de un chelín. Hasta 800 personas al día bajaban a observar el escudo tunelador en acción, en una insólita mezcla de ingeniería y espectáculo.

### Inundaciones y tragedia

La estabilidad del túnel era frágil debido a su escasa profundidad bajo el lecho del río. En mayo de 1827, una inundación masiva obligó a sellar el frente y suspender temporalmente las obras. Fue el joven Isambard quien descendió en una campana de buceo para intentar tapar la brecha con sacos de arcilla. Su intervención fue clave para salvar la galería.

Sin embargo, en enero de 1828, una nueva inundación fue aún más trágica: seis obreros murieron y Brunel hijo resultó gravemente herido. El túnel tuvo que ser sellado con ladrillos y la compañía declaró el cese temporal del proyecto. Marc Brunel, cansado y frustrado por la oposición interna de su propio presidente, renunció como ingeniero jefe.





Maqueta del escudo tunelador de Marc Brunel, en el Museo Brunel de Rotherhithe (Londres). Fuente: Dunks58 en English Wikipedia. Dominio público, vía Wikimedia Commons.

### Segunda etapa y conclusión de la obra

La historia del túnel habría terminado ahí, de no ser por la persistencia de Brunel. En 1834, tras el retiro del presidente William Smith y con el apoyo de figuras como el duque de Wellington, el gobierno británico concedió un préstamo de 246.000 libras esterlinas, permitiendo reanudar los trabajos. Se instaló un nuevo escudo tunelador de 140 toneladas, fabricado con más de 9.000 piezas, que fue ensamblado en el subsuelo. A pesar de nuevos incidentes —cuatro inundaciones más, incendios y

enfermedades— el túnel fue finalmente completado en noviembre de 1841.

Durante los años siguientes se equipó con iluminación de gas, escaleras de caracol y caminos empedrados, y el 25 de marzo de 1843, tras casi dos décadas, el Túnel del Támesis fue inaugurado oficialmente. Tenía 396 metros de longitud, 11 metros de ancho y una profundidad de más de 23 metros desde la superficie del río.

### Adquisición por la East London Railway Company

Aunque fue concebido para carruajes tirados por caballos, la falta de fondos impidió adaptar las rampas de entrada. El túnel funcionó como paso peatonal, recibiendo millones de visitantes y turistas que lo convirtieron en una atracción popular, decorado con tiendas, luces y música. Sin embargo, también fue criticado como refugio de delincuentes y prostitutas, y nunca alcanzó la rentabilidad esperada.

En 1865 fue adquirido por la East London Railway Company, y en 1869 comenzaron a circular trenes por sus vías. Desde entonces ha sido parte del sistema de transporte subterráneo de Londres, siendo hoy una sección activa del London Overground.

### Legado de ingeniería

Tras la finalización del túnel, Marc Brunel, ya mayor y con problemas de salud, no volvió a emprender grandes proyectos. Acompañó a su hijo en varios diseños, como el del SS Great Britain y el

ponte de Clifton. En 1849 falleció a los 80 años, siendo enterrado en el cementerio de Kensal Green junto a su esposa y, años más tarde, su hijo Isambard.

La construcción del Túnel del Támesis no solo demostró que era posible perforar bajo un río —algo que hasta entonces se creía inviable—, sino que estableció un modelo de procedimiento técnico replicado durante los dos siglos siguientes. La idea del escudo tunelador fue desarrollada más adelante por ingenieros como James Henry Greathead, y dio origen a las actuales tuneladoras mecanizadas (TBM), esenciales en proyectos como los metros modernos, túneles ferroviarios y obras hidráulicas.

Por esta razón, en 1991 el túnel fue declarado Monumento Histórico Internacional de la Ingeniería Civil, y en 1995 recibió la protección legal como monumento clasificado de Grado II\* en el Reino Unido. Hoy, su casa de máquinas original alberga el Museo Brunel, y una sección del túnel se conserva en su estado original como testimonio vivo de una gesta técnica extraordinaria.

### Una huella subterránea y duradera

El Túnel del Támesis demostró que era posible perforar bajo ríos, y abrió paso a una nueva era en la ingeniería civil. Marc Isambard Brunel no solo dejó un túnel, dejó una manera de pensar, construir e innovar. Fue el primer hombre que se atrevió a cavar bajo el agua, y gracias a él, las ciudades del mundo aprendieron a crecer también bajo tierra.



Representación del túnel del Támesis. Litografía de Taulman, basada en Bonisch. Sin fecha, probablemente alrededor de 1840. Fuente: Taulman after Bonisch. Dominio público, vía Wikimedia Commons.



## Campus Virtual: Oferta formativa - Selección de cursos

Formas jurídicas y fiscalidad.

MS Project.

Inventor 2020. Diseño Paramétrico e Iniciador al Análisis De Tensiones.

Planes de Autoproyección.

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

Automatismos eléctricos industriales. Elementos y simulación práctica.

Autómatas programables PLC en aplicaciones de automatización industrial.

Eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior.

Experto en gestión y negociación de contratos de energía.

Electricidad industrial.

Proyectos de reforma y completado de vehículos.

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

*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](http://www.ingenierosformacion.com)

# UAITIE refuerza su compromiso con la sociedad a través de la divulgación, la visibilidad de la mujer ingeniera y los reconocimientos profesionales

## Proyecto "Madrid acerca la ingeniería a la sociedad 2025"

El Ayuntamiento de Madrid ha renovado su confianza en la UAITIE mediante la concesión de una subvención para el desarrollo de un proyecto bianual orientado a acercar la ingeniería a la ciudadanía. Bajo el título "Madrid acerca la ingeniería a la sociedad", la iniciativa consolida una década de colaboración institucional y se articula en torno a actividades educativas y de divulgación científica.

Entre sus principales líneas de acción en este año 2025, destaca la ampliación de contenidos del programa La Puerta del Ingenio, dirigido a escolares de educación primaria, que promueve la creatividad, el consumo responsable y las vocaciones STEM desde edades tempranas. Asimismo, esta actuación se integra de forma transversal con otros proyectos emblemáticos de la Institución, como la Exposición Mujeres Ingenieras de Éxito, reforzando el compromiso de la UAITIE con la igualdad, la innovación y el fomento del talento juvenil.

**El acto oficial de presentación del proyecto tuvo lugar el 23 de diciembre de 2025** en la sede de la Junta Municipal del Distrito Puente de Vallecas (Madrid), y contó con la participación de representantes institucionales y del ámbito educativo. Entre los asistentes se encontraban autoridades de la propia Junta Municipal, como responsables de los departamentos de Educación y Servicios a la Ciudadanía, así como representantes de los distintos grupos políticos con presencia en el distrito.

## Mujeres Ingenieras de Éxito: una exposición que inspira

Consolidada como una de las iniciativas de mayor proyección pública de la UAITIE, la "Exposición Mujeres Ingenieras de Éxito" ha continuado su recorrido por el territorio nacional, incorporando nuevas sedes, públicos y alianzas institucionales. Concebida como una herramienta de inspiración y visibilidad, esta muestra ha estado presente en eventos de gran relevancia como el I Congreso Nacional de Ingeniería INGEFUTUR25, celebrado en Valencia; ha visitado la ciudad de Lleida, donde fue recibida por más de 500 estudiantes procedentes de



Acto de presentación oficial del proyecto La Puerta del Ingenio



Acto inaugural de la Exposición Mujeres Ingenieras de Éxito (Lleida)

una veintena de centros educativos; y ha sido acogida en Tarragona con motivo del centenario de l'Associació d'Enginyers Tècnics Industrials de Tarragona.

La exposición pone en valor el talento femenino en el ámbito de la ingeniería, visibilizando trayectorias profesionales que sirven de referencia para las nuevas generaciones y promoviendo la igualdad en las disciplinas STEM. En cada ciudad, se fortalece la colaboración con instituciones académicas y administraciones locales, lo que amplifica el impacto del proyecto y consolida su alcance social.

## Distinción profesional: entrega de la Insignia de Oro de la UAITIE

En el marco de los actos conmemorativos del Centenario de la profesión en Tarragona, la UAITIE otorgó su máxima distinción honorífica, la Insignia de Oro, al ingeniero Santiago Crivillé, en reconocimiento a su excepcional trayectoria profesional, su implicación institucional y su compromiso con la ingeniería técnica industrial.

Este galardón, regulado por un estricto reglamento interno, es un distintivo reservado para aquellos profesionales cuya labor ha dejado una huella indeleble en el desarrollo y prestigio del colectivo. La imposición del



La Exposición Mujeres Ingenieras de Éxito en el I Congreso Nacional de Ingeniería (Valencia)



El Ministro de Industria y representantes institucionales durante la visita de la Exposición Mujeres Ingenieras de Éxito (Tarragona)



Santiago Crivillé, 91ª Insignia de Oro de la UAITIE

reconocimiento se llevó a cabo en un acto solemne que sirvió también para visibilizar la historia y el futuro de la profesión, en un contexto de reflexión sobre los retos tecnológicos e industriales de las próximas décadas.

## XI Premio Nacional de Iniciación a la Investigación Tecnológica

La UAITIE lanza una nueva convocatoria de este certamen referente a nivel nacional, que promueve el talento juvenil y las vocaciones STEM en el ámbito preuniversitario. Dirigido a estudiantes de ESO, Bachillerato y Ciclos Formativos de Grado Medio y Grado Superior.

Toda la información:

<https://premionacionaluaitie.uaitie.es/>



# ELIGE TU GRADO DE INGENIERÍA CON TODA LA INFORMACIÓN

¡Tu futuro está en juego!



<https://cogiti.es/guia-de-titulaciones>

- ATRIBUCIONES PROFESIONALES
- PROFESIÓN REGULADA
- EUROINGENIERO
- EMPLEABILIDAD
- COLEGIACIÓN....

Adelante, ¡Consúltalo en tu colegio profesional!



**COGITI**  
Consejo General de Colegios Oficiales  
de Graduados e Ingenieros Técnicos  
Industriales de España



## 20 razones para amar la Ingeniería y 21 para ser ingeniera

Miguel Abril Martí

Plataforma Editorial S.L. 292 págs.

ISBN 9788419271242



"20 razones para amar la ingeniería" es un libro dedicado a las personas que sienten una pasión vocacional por la ingeniería, pero también a todo aquel que se dedique a esta carrera. Estructurado en 21 capítulos y escrito en un tono humorístico y cercano, este libro es un alegato en favor de la ingeniería y del amor al conocimiento y la recursividad como formas de utilizar las técnicas adecuadas para construir un mundo mejor. Con una especial atención a las mujeres que quieran dedicarse a esta profesión.

## Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión

Editorial Garceta. 552 págs.

ISBN: 978-84-1903-485-4



Esta edición 2025 del REBT incluye las modificaciones y actualizaciones consolidadas, publicadas anteriormente, así como la última modificación publicada en el BOE: Modificación de la ICT-BT 02 con las nuevas Normas UNE actualizadas según Resolución de 20 de marzo de 2025, de la Dirección General de Estrategia Industrial y de la Pequeña

y Mediana Empresa; además del Real Decreto 842/2002, y las últimas modificaciones de reales decreto. Asimismo, se incluye el siguiente material adicional: Adaptación a la norma UNE HD 60364-5-52: 2014. Instalaciones eléctricas de baja tensión. Canalizaciones; Adaptación al CPR sobre la posible reacción al fuego de los cables eléctricos, y una relación de las Normas UNE citadas en cada Instrucción.

## Reglamentos de Protección y Seguridad contra Incendios

Editorial Garceta. 494 págs.

ISBN: 978-84-1903-488-5



El 4 de marzo de 2025 se promulgó el Real Decreto 164/2025 por el que se aprobaba un nuevo Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales (RSCIEI). Este Real Decreto, a su vez, incorporaba modificaciones en otros reglamentos relacionados con esta materia, como el Reglamento de instalaciones de protección contra incendios (RIPCI), y en el "Documento Básico SI. Seguridad en caso de incendio (DB SI) del Código Técnico de la Edificación". Por todo ello, se hace necesario agrupar todos estos reglamentos actualizados en un solo libro que facilite su consulta a los profesionales que desempeñan su actividad en el entorno de la protección y la seguridad frente a incendios en edificios y establecimientos comerciales.

Este libro es una compilación de las 3 principales normativas publicadas en este ámbito y actualizadas según el Real Decreto de 4 de marzo de 2025:

- Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales (RSCIEI).
- Reglamento de instalaciones de protección contra incendios (RIPCI).
- Documento Básico SI. Seguridad en caso de incendio (DB SI). En esta normativa se ha incluido la edición que cuenta

con los comentarios del ministerio, cuyo objeto es servir de ayuda en la aplicación de la normativa, pero que no tienen carácter reglamentario.

Los **colegiados/as de algún Colegio de Graduados e Ingenieros Técnicos Industriales** disponen de un **descuento del 15%** en los libros de esta editorial durante todo 2026, y los gastos de envío son gratuitos. Para ello, deben acceder a la página web de Editorial Garceta (<https://www.garceta.es/>) e introducir el **código COGIT2026** cuando se vaya a realizar la compra del ejemplar.

## Reglamento Regulador de las Infraestructuras Comunes de Telecomunicaciones (para el acceso de las telecomunicaciones en el interior de las edificaciones)

Editorial Garceta. 404 págs.

ISBN: 978-84-1903-484-7



El principal contenido de este libro incluye el Real Decreto 346/2011, de 11 de marzo; el Reglamento Regulador de las Infraestructuras Comunes de Telecomunicaciones (para el acceso a los servicios de telecomunicación en el interior de las edificaciones); el Desarrollo del Reglamento Regulador de las Infraestructuras Comunes de Telecomunicaciones (Orden ITC/1644/2011, de 10 de junio), y la siguiente normativa adicional:

- Real Decreto 391/2019 por el que se aprueba el Plan Técnico Nacional de la Televisión Digital Terrestre.
- Orden ECE/983/2019, por la que se regulan las características de reacción al fuego de los cables de telecomunicaciones en el interior de las edificaciones.
- Real Decreto Ley 1/1998, de 27 de febrero, sobre Infraestructuras Comunes en los Edificios para el acceso a los Servicios de Telecomunicaciones.
- Ley 11/1998, de 24 de abril, General de Telecomunicaciones (arts. 53 y 60).

## Formación Transversal



- **Modalidad online**
- **Duración de 40h Formatos formativos**
- **variados**, incluyendo vídeos, quizes, gamificación, descargables, infografías...
- **Contenidos formativos**

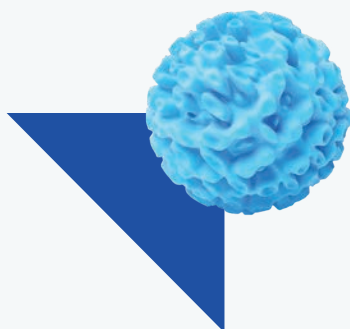
1. Pensamiento analítico y toma de decisiones basada en datos

2. Crea y comparte tu cuadro de mando en Power BI

3. Aumenta tu productividad con las metodologías ágiles

4. Factura electrónica. Agiliza y gestiona de forma segura tus facturas

5. Técnicas para innovar en tu entorno profesional



¡Inscríbete!

## Todo lo que esperas (y más)

- **Sin coste** para profesionales
- **Diseñado por expertos** específicos de cada sector
- **Modalidad híbrida flexible:** online y presencial

## Formación Específica



- **Modalidad online, presencial y webinar**
- **Duración de 110h Formatos formativos**
- **variados**, incluyendo vídeos, quizes, gamificación, descargables, infografías...
- **Contenidos formativos**

1. Aplicaciones prácticas de la IA en proyectos industriales (20 h)

2. Transformación digital profesional: El impacto de la IA en la industria, la ingeniería y la gestión de la Identidad Profesional (10 h)

3. Ciberseguridad para despachos profesionales (5 h)

4. Introducción a la ciberseguridad industrial (15 h)

5. Introducción a la IA y su aplicación en la ingeniería (15 h)

6. Machine Learning y análisis predictivo en la ingeniería de la rama industrial (15 h)

7. Sistemas de automatización y control inteligente (15 h)

8. Big Data y análisis de datos en la ingeniería (15 h)

Basado en el marco Europeo DigComp 2.2

150 horas a tu ritmo

Plazas limitadas

Upro

**Siempre  
conectados  
contigo**

Notificaciones

Foros grupales

Asistente virtual 24/7

Mensajería privada con tutor/a

Videoconferencias / Webinars



# COGITI

Consejo General de Colegios Oficiales  
de Graduados e Ingenieros Técnicos  
Industriales de España



## FORMACIÓN EN METODOLOGÍA BIM APLICABLE A LA CONTRATACIÓN PÚBLICA



**ACCIONES FORMATIVAS GRATUITAS  
EN COLABORACIÓN CON EL  
MINISTERIO DE TRANSPORTES,  
MOVILIDAD Y AGENDA URBANA  
PARA LA MEJORA DE LAS  
COMPETENCIAS EN EL ÁMBITO DE LA  
METODOLOGÍA BIM**

### CONTENIDO

**MÓDULO 1: CONCEPTOS BÁSICOS DEL BIM (30H)**

**MÓDULO 2: CREACIÓN DE MODELOS BIM (10H)**

**MÓDULO 3: EXTRACCIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN DEL MODELO (15H)**

**MÓDULO 4: INFOGRAFÍAS Y RECORRIDOS VIRTUALES (15H)**

**MÓDULO 5: TECNOLOGÍAS AVANZADAS QUE POTENCIAN A LAS TECNOLOGÍAS BIM (10H)**

**MÓDULO 6: ANÁLISIS Y CÁLCULOS ENERGÉTICOS DE MODELOS BIM CON CYPETHERM HE+ (20H)**

**MÓDULO 7: MEDICIÓN AUTOMÁTICA DESDE MODELOS (20H)**

**FORMACIÓN ONLINE:**

**PLATAFORMA DE INGENIEROS**

**FORMACIÓN**

**¡MATRICÚLATE!**

<https://www.ingenierosformacion.com/>