



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Linares

**Diseño de una plataforma de guiado ferroviario a
escala para análisis de movimiento de lazo en
asignaturas de varios grados y másteres de
ingeniería**

Coordinador: Javier Fernández Aceituno

Convocatoria: 2019



CREA



Universidad de Jaén

Vicerrectorado de Coordinación y
Calidad de las Enseñanzas

**PROYECTOS DE INNOVACIÓN Y MEJORA DOCENTE EN LA UNIVERSIDAD DE JAÉN
(Plan PIMED-UJA 2019-2023)
Convocatoria 2019**

MEMORIA FINAL

DATOS DEL PROYECTO

Título:	DISEÑO DE UNA PLATAFORMA DE GUIADO FERROVIARIO A ESCALA PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DE LAZO EN ASIGNATURAS DE VARIOS GRADOS Y MÁSTERES DE INGENIERÍA		
Código:	PIMED02_201921		
Tipo de proyecto: (marque lo que proceda)	Proyectos de innovación docente		X
	Proyectos de incentivación de buenas prácticas docentes		
Centros implicados:	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE LINARES		
Titulaciones implicadas:	• Grado en Ingeniería Civil • Máster en Ingeniería del Transporte Terrestre y Logística • Grado en Ingeniería Mecánica • Grado en Ingeniería Eléctrica • Grado en Ingeniería Química Industrial		
Asignaturas implicadas:	• Ferrocarriles y Transporte Guiado (Ing. Civil) • Transporte por Ferrocarril (Máster) • Infraestructuras y Tecnologías del transporte ferroviario (Máster) • Transportes Industriales (Ing. Mecánica) • Cinemática y Dinámica de Máquinas (Rama Industrial)		
Número aproximado de estudiantes implicados	50		

RESUMEN

(Máximo 300 palabras)

Palabras clave (5 máx.): dinámica ferroviaria; contacto rueda-carril; movimiento de lazo

En este proyecto de innovación docente se ha realizado una plataforma de guiado ferroviario con el objetivo de mostrar al alumnado de las titulaciones de ingeniería civil y de ingeniería industrial, así como a futuros alumnos de nuevo ingreso en las jornadas de transferencia organizadas por la universidad (por ejemplo: Semana de la Ciencia), los fundamentos del guiado de los vehículos ferroviarios. La característica principal de estos es que los ejes ferroviarios no están formados por ruedas que giran libremente entre sí, como



Universidad de Jaén

Vicerrectorado de Coordinación y
Calidad de las Enseñanzas

ocurre en los vehículos de transporte por carretera, sino que las ruedas están rígidamente unidas al eje, por lo que no es posible que exista giro relativo de una rueda frente a otra pertenecientes al mismo eje.

Por este motivo, la única posibilidad para conseguir que un vehículo ferroviario trace un tramo curvo es a través de la conicidad de las ruedas, que en su forma básica es la geometría simple de un tronco de cono. Por ello, se ha fabricado una plataforma formada por dos carriles a escala cuya parte superior se ha mecanizado a similitud con los carriles de tren convencionales (modelo UIC60 a escala) y se ha curvado generando un trazado recto seguido de dos curvas (izquierda y derecha) y finalizando en un tramo recto, todo ello con una pendiente suficiente para favorecer el desplazamiento de los ejes por efecto de la gravedad.

En cuanto a los ejes mecanizados se han realizado 4 tipos: dos de ellos con conicidad positiva (uno de ellos con pestañas), que son capaces de trazar el circuito, otro eje con conicidad nulo (cilíndrico) y otro con conicidad negativa. Estos dos últimos son incapaces de trazar el circuito ferroviario.

MEMORIA DESCRIPTIVA DE LOS RESULTADOS DEL PROYECTO

Deberá incluirse: Introducción, objetivos, descripción de las tareas o actividades llevadas a cabo para alcanzar los objetivos, temporización y distribución de tareas entre los participantes, cambios introducidos respecto a la propuesta original si los hubiese, análisis y valoración crítica de los resultados conseguidos a partir de evidencias cualitativas y cuantitativas, posibilidades de generalización de la experiencia a otras asignaturas o titulaciones, conclusiones y propuestas de mejora

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el transporte ferroviario se encuentra en especial auge, pues está considerado como la principal infraestructura de transporte pesado sostenible. Ello es debido a la baja fricción existente entre el contacto por rodadura producido en superficies metálicas rueda-carril [1], lo cual convierte al transporte ferroviario como la gran alternativa eficiente para el transporte de mercancías y pasajeros. Esta importancia queda de manifiesto según se muestra en las líneas de actuación europeas del Horizonte H2020 [2], y en especial, de la agencia europea CEF Transport (Connecting Europe Facility for Transport [3]), las cuales, en sus líneas de financiación principal, potencian al transporte ferroviario en sus modalidades de eficiencia y seguridad.

En relación con los criterios de seguridad de la marcha y confort de un vehículo ferroviario, existen distintos indicadores asociados a las fuerzas y aceleraciones experimentadas por los vehículos, entre los que destacan, el coeficiente de descarrilamiento de Nadal (cociente entre fuerzas laterales y verticales en cada rueda), criterio de Prud'homme (resistencia lateral), y los criterios de descarga y de vuelco [4,5]. Sin embargo, analizar la calidad de rodadura de estos vehículos requiere conocer su



Universidad de Jaén

Vicerrectorado de Coordinación y
Calidad de las Enseñanzas

comportamiento dinámico, determinado por las características singulares tanto de la infraestructura como de los ejes ferroviarios. En este sentido, el principal factor que interviene en el comportamiento dinámico de estos vehículos es la geometría del contacto rueda-carril. Se destaca, que los perfiles de rueda ferroviaria se diseñan con radio variable en su sección transversal (en forma de tronco de cono), para permitir el “autoguiado” cuando se desplazan lateralmente respecto del centro de la vía (p. ej. en curvas) debido a la diferencia de radios entre la rueda exterior e interior (conicidad equivalente [4]). Dado que el sistema eje-ruedas convencional es un sistema de sólido único, es decir, las ruedas giran solidarias al eje, la posibilidad de trazar curvas en donde los radios de los carriles exterior e interior son distintos, es únicamente posible por la geometría cónica de las ruedas (ver Fig. 1).

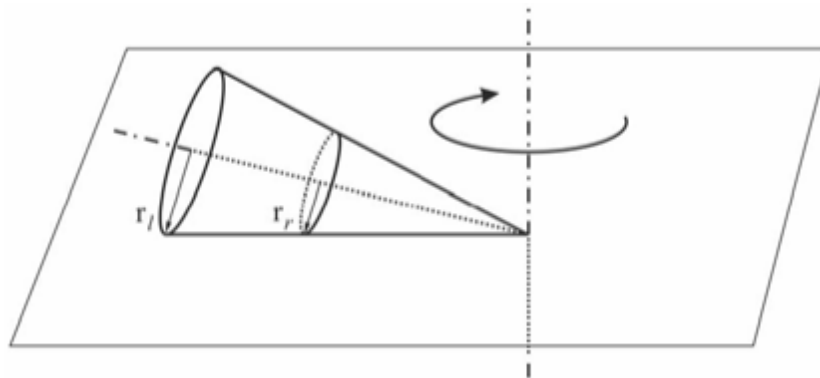


Figura 1: Trazado circular en una geometría cónica

Este fenómeno de “autoguiado” de un eje ferroviario es lo que también se conoce como movimiento de lazo, definido en primer lugar por Klingel en 1883. Es un movimiento oscilatorio íntegramente cinemático, que predice la longitud de onda que describe el eje en función de la conicidad de las ruedas, radio nominal y distancia entre puntos de contacto. Sin embargo, para altas velocidades y grandes transmisiones de carga, la fricción rueda-carril es insuficiente para mantener estable el movimiento de lazo, llegando al fenómeno de inestabilidad conocido como “hunting motion” [4], crítico en el diseño de estos vehículos y que delimita la velocidad de operación de estos.

En general, se ha observado en el alumnado cierta dificultad para asimilar el citado fenómeno mediante la resolución de la ecuación diferencial correspondiente y, por tanto, de interpretar un fenómeno que es fundamental en el transporte ferroviario. Por lo tanto, el presente proyecto propone estudiar de manera intuitiva y esencial el movimiento de lazo de los vehículos ferroviarios. Para ello, se diseñará una pequeña estructura a escala formada por dos perfiles longitudinales separados 127 mm entre ellos (simulando los carriles de una vía con separación 5 pulgadas, escala 1:10). En paralelo, se diseñarán varios ejes a escala formados por ruedas de distinta conicidad (positiva, negativa y conicidad nula, es decir, rueda cilíndrica, véase Fig. 2). El objetivo principal es que los alumnos puedan comprobar que la teoría del movimiento de lazo se reproduce con fidelidad y puedan observar, de primera mano, el efecto que la conicidad tiene en el trazado de tramos curvos.



Universidad de Jaén

Vicerrectorado de Coordinación y
Calidad de las Enseñanzas

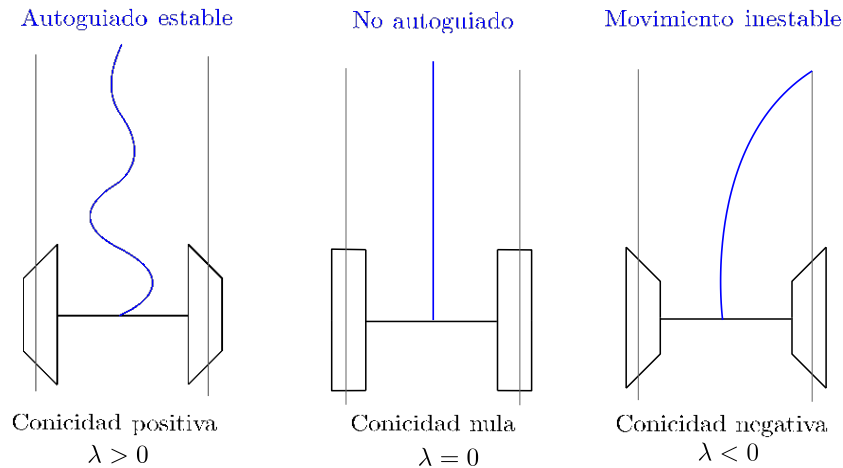


Figura 2: Movimiento oscilatorio en eje ferroviario según conicidad de las ruedas

2. OBJETIVOS

- El objeto principal del proyecto es el diseño y construcción de una plataforma de guiado de ejes ferroviarios a escala formado por:
 - Estructura modular de aluminio formada por dos perfiles longitudinales principales separados 127 mm y unidos transversalmente por pletinas. La estructura llevará una ligera pendiente para asegurar el movimiento de los ejes por gravedad y estará formado una recta seguida de una transición a curva.
 - Ejes ferroviarios a escala de aluminio compuestos por un eje macizo y dos ruedas cónicas unidas al eje con unión desmontable. Se diseñarán un total de tres tipos de ruedas: ruedas con conicidad positiva, con conicidad negativa y rueda cilíndrica (ver Fig. 2).
- El proyecto permitirá a los alumnos comprobar el comportamiento dinámico de los ejes al trazar la estructura ferroviaria según los tipos de ruedas empleadas, siendo el eje con conicidad positiva el único apto para trazar la curva.
- Se dotará a las asignaturas “Transporte por ferrocarril”, e “Infraestructuras y tecnologías del transporte ferroviario” del Máster en Ingeniería del Transporte Terrestre y Logística, la asignatura “Ferrocarriles y transporte guiado”, del Grado en Ingeniería Civil y a las asignaturas “Cinemática y Dinámica de Máquinas” y “Transportes Industriales” de los grados de la rama Industrial e Ing. Mecánica, respectivamente, de medios para realizar prácticas en laboratorio que refuercen de manera clara los conocimientos impartidos en clase.
- Permitirá complementar las prácticas realizadas con programas informáticos sobre la resolución numérica del movimiento de lazo con resultados experimentales extraídos del comportamiento dinámico del eje.



Universidad de Jaén

Vicerrectorado de Coordinación y
Calidad de las Enseñanzas

- Ofrecerá a uno o dos alumnos la posibilidad de desarrollar su Trabajo Fin de Grado o Máster en un proyecto de diseño real con el atractivo añadido de ver su trabajo construido y en servicio.
- Motivar al alumnado en el sector ferroviario y del material rodante, el cual se encuentra en especial auge por su alta eficiencia energética.

3. TAREAS LLEVADAS A CABO

a) Diseño y fabricación de la estructura de vía a escala

Se ha realizado el diseño y Fabricación de la estructura de vía a escala al amparo de un Trabajo Fin de Grado de un alumno del grado en Ingeniería Mecánica, calificado con Matrícula de Honor. Los pasos realizados han sido:

A1) Diseño de la estructura

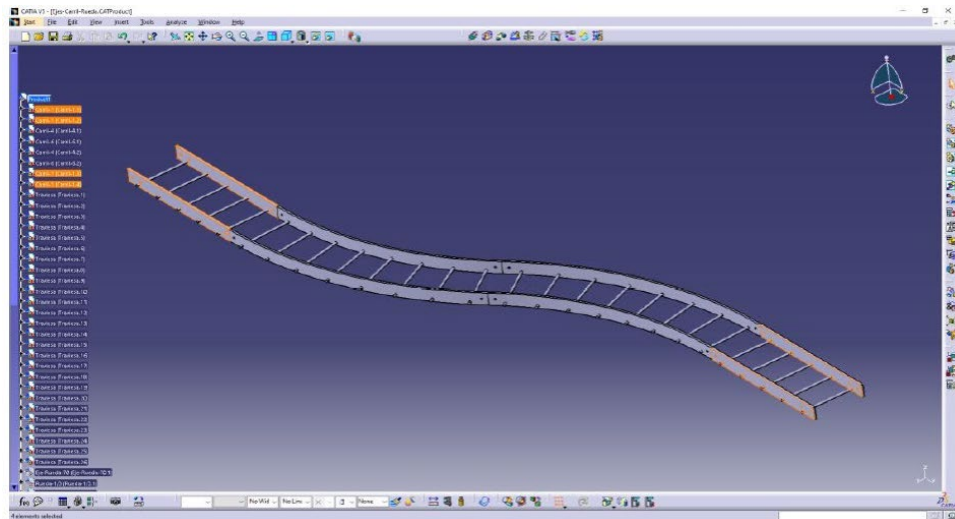


Figura 1: Diseño de la estructura en CAD

A2) Diseño de los ejes ferroviarios

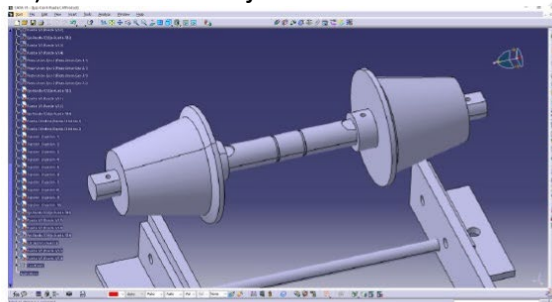


Figura 4.19. Eje y rueda posicionado con conicidad positiva

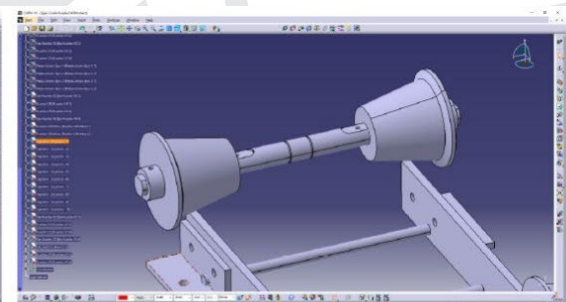


Figura 4.20. Eje y rueda posicionado con conicidad negativa

Figura 2: Diseño de los ejes ferroviarios en CAD



Universidad de Jaén

Vicerrectorado de Coordinación y
Calidad de las Enseñanzas

A3) Definición de los apoyos y pendiente del trazado

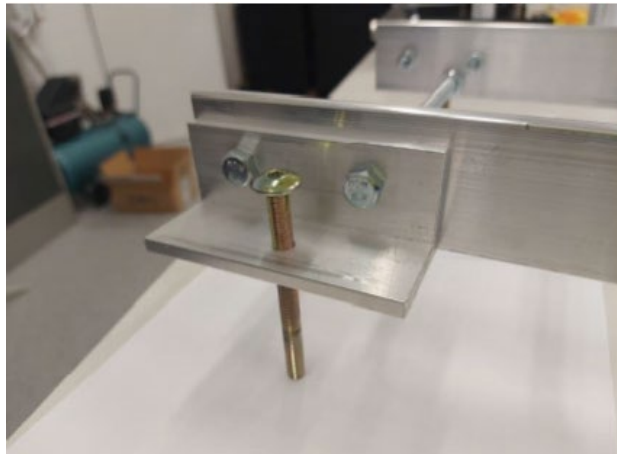


Figura 3: Definición de apoyos y pendiente del trazado

A4) Fabricación y montaje

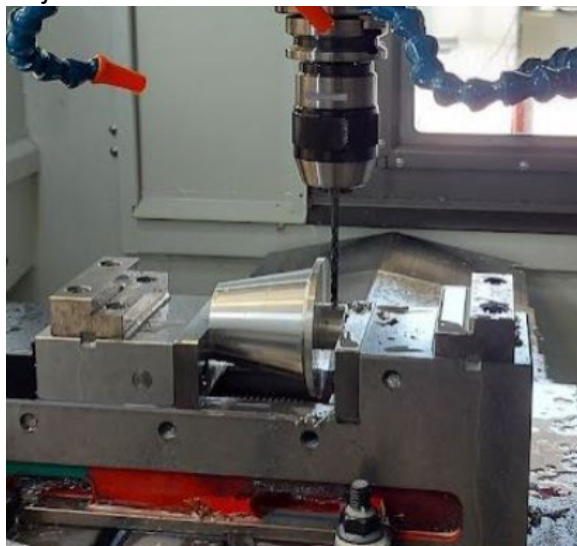


Figura 4: Fabricación de una rueda cónica



Universidad de Jaén

Vicerrectorado de Coordinación y
Calidad de las Enseñanzas



Figura 5: Montaje final

A5) Comprobación de resultados experimentales y resultados teóricos

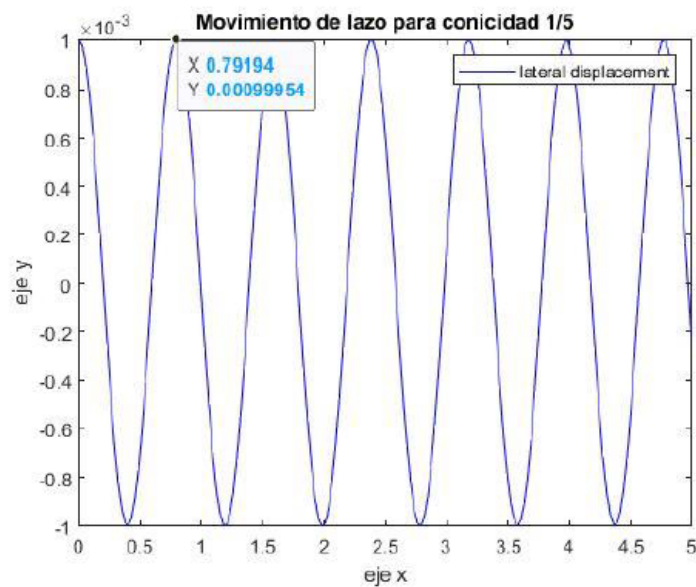


Figura 6: Movimiento de lazo teórico con rueda cónica 1/5



Universidad de Jaén

Vicerrectorado de Coordinación y
Calidad de las Enseñanzas

b) Elaboración de prácticas de laboratorio:

Se ha utilizado la instalación ferroviaria para las prácticas de la asignatura de Ferrocarriles y Transporte Guiado del grado en Ingeniería Civil, así como en los contenidos teóricos impartidos en la asignatura Transporte por Ferrocarril, del Máster en Ingeniería del Transporte Terrestre y Logística.

Ferrocarriles y Transporte Guiado
Grado en Ingeniería Civil y Doble Grado en Ingeniería Civil y en Ingeniería de Tecnologías Mineras
PRÁCTICA
ANÁLISIS DEL AUTOGUIADO Y MOVIMIENTO DE LAZO PRODUCIDO EN EJES FERROVIARIOS
Enunciado
Conceptos aplicados: Trazado y geometría de la vía (Bloque B), Mecánica de la vía (Bloque D), Dinámica ferroviaria (Bloque F)

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el transporte ferroviario se encuentra en especial auge, pues está considerado como la principal infraestructura de transporte pesado sostenible. Ello es debido a la baja fricción existente entre el contacto por rodadura producido en superficies metálicas rueda-carril [1], lo cual convierte al transporte ferroviario como la gran alternativa eficiente para el transporte de mercancías y pasajeros. Esta importancia queda de manifiesto según se muestra en las líneas de actuación europeas del Horizonte H2020 [2], y en especial, de la agencia europea CEF Transport (Connecting Europe Facility for Transport [3]), las cuales, en sus líneas de financiación principal, potencian al transporte ferroviario en sus modalidades de eficiencia y seguridad. Por tanto, debido a su competitividad energética frente a otras modalidades de transporte, el transporte por ferrocarril debe cumplir, además, dos requisitos importantes, (1) debe ser un transporte seguro y (2) debe ser un transporte confortable, pues esto ayudará a minimizar la interacción vehículo-vía y a reducir los costes de mantenimiento de la infraestructura.

Para analizar las condiciones de seguridad de la marcha y de confort de un vehículo ferroviario, existen distintos indicadores asociados a las fuerzas y aceleraciones experimentadas por los vehículos, entre los que destacan, el coeficiente de descarrilamiento de Nadal (cociente entre fuerzas laterales y verticales en cada rueda), criterio de Prud'homme (resistencia lateral), y los criterios de descarga y de vuelco [4,5]. Sin embargo, analizar la calidad de rodadura de estos vehículos requiere conocer su comportamiento dinámico, determinado por las características singulares tanto de la infraestructura como de los ejes ferroviarios. En este sentido, el principal factor que interviene en el comportamiento dinámico de estos vehículos es la geometría del contacto de las ruedas de los ejes ferroviarios y del carril. Por ello, esta práctica se fundamentará en conocer las características geométricas básicas de los ejes ferroviarios y su influencia en la dinámica del vehículo.

2. EL EJE FERROVIARIO

En la actualidad, existen dos tipologías de ejes ferroviarios utilizados en la industria.

a. Eje ferroviario convencional:

El eje ferroviario convencional mostrado en la Fig. 1, está constituido por dos ruedas ensambladas rigidamente a un eje. Esto implica que no existe movimiento relativo de una rueda frente a la otra o frente al eje, sino que todo el conjunto se comporta como un único sólido.

Universidad de Jaén



Figura 7: Extracto del guion de prácticas de la asignatura Ferrocarriles y Transporte Guiado

4. TEMPORALIZACIÓN

		2020												2021											
	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T1. Propuesta y asignación																									
T2. Estudio numérico																									
T3. Diseño Estructura																									
T4. Diseño Ejes y ruedas																									
T5. Fabricación y montaje																									
T6. Resultados Experimentales																									
T7. Informe de Prácticas de Laboratorio																									
T8. Difusión Resultados (Semana Ciencia o similar)																									

Figura 8: Cronograma seguido



Universidad de Jaén

Vicerrectorado de Coordinación y
Calidad de las Enseñanzas

5. CAMBIOS RESPECTO A PROPUESTA ORIGINAL

Respecto a la propuesta inicial, no se han realizado contribuciones en congresos de innovación docente. Sin embargo, se ha dado especial difusión a través los siguientes canales de difusión alternativos:

- Semana de la Ciencia UJA



Figura 9: Semana de la Ciencia y portada de presentación relativa al PID

- Encuentros UJA
- Vídeo promocional a través de las pantallas de la EPSL y publicitado en Youtube:

<https://youtu.be/9HNSuF2zi68>

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS CONSEGUIDOS (A ASIGNATURAS O TITULACIONES)

Se ha potenciado el interés estudiantil en la ingeniería ferroviaria, y se ha mejorado la comprensión por parte del alumnado especializado en este tipo de infraestructuras (alumnado de Ing. Civil, Ing. Mecánica y Máster en Transporte Terrestre y Logística). Además, se dispone de una instalación relativamente portátil y de fácil transporte para ser utilizada en actividades de transferencia como: La Semana de la Ciencia, Encuentros UJA o la Noche Europea de los Investigadores.

7. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA

Se concluye con que el nivel de aceptación por parte del alumnado ha sido muy positivo, contribuyendo a demostrar de forma intuitiva y eficaz los fundamentos básicos de los vehículos ferroviarios, cuyo concepto matemático es generalmente difícil de asimilar. Por otro lado, se ha potenciado en el interés de los estudiantes y futuros nuevos estudiantes de ingeniería en la ingeniería ferroviaria, sector clave y de gran progreso en el transporte del presente y futuro.



Universidad de Jaén

Vicerrectorado de Coordinación y
Calidad de las Enseñanzas

Como propuestas de mejora, sería conveniente aumentar la difusión del PID mediante participación en nuevas actividades de transferencia (como la reciente Noche Europea de los Investigadores, octubre 2022), así como en la participación en Congresos de Innovación Docente.

Referencias:

- [1] Esveld, C. (2001). *Modern railway track* (Vol. 385). Zaltbommel: MRT-productions.
- [2] European Commission. *Horizont 2020*. <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en>
- [3] European Commission. *Connecting Europe Facility (CEF) for Transport*. <https://ec.europa.eu/inea/connecting-europe-facility/cef-transport>

TRANSFERENCIA DE RESULTADOS

(Publicaciones, comunicaciones a congresos, exposiciones, intervenciones en medios de comunicación, etc.)

Deberá adjuntarse copia o incluirse enlaces a una o varias direcciones de drive que den acceso a la documentación sin restricciones.

Enlace Google Drive con acceso al video promocional, memoria TFG, guion de prácticas y justificante de participación en la Semana de la Ciencia 2021:

DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA

- Materiales docentes u otro tipo de materiales producidos.

-Informe de gastos realizados (nº expediente/fecha de emisión)

-Documentación acreditativa de la participación de estudiantes en prácticas ICARO

Deberá adjuntarse copia o incluirse enlaces a una o varias direcciones de drive que den acceso a la documentación sin restricciones.

Mismo enlace que en el apartado anterior para el guion de prácticas y TFG generado

INFORME DE GASTOS REALIZADOS:

Para la fabricación de la plataforma de guiado ferroviario se realizó la compra del material de aluminio y nylon necesarios. No fue necesario comprar barras cilíndricas de diámetro 100 mm para el mecanizado de las ruedas pues estaban disponibles en el Taller



Universidad de Jaén

Vicerrectorado de Coordinación y
Calidad de las Enseñanzas

Mecánico de la EPSL. Por este motivo, la compra de material es relativamente económica.

Por otro lado, el mecanizado se hizo íntegramente en el taller de la EPSL, evitando el encargo del mismo a empresas externas y repercutiendo en reducir el gasto relativo a tal actividad.

Finalmente, y por motivos epidemiológicos y de calendario, no se ha acudido a congresos de innovación docente, sino que se han realizado las actividades de difusión como la participación en la Semana de la Ciencia o en los Encuentros UJA. Esto también ha repercutido en evitar el coste asociado de inscripciones a congresos y dietas asociadas.

RESUMEN DE GASTOS REALIZADOS

Concepto	Justificación	Cantidad
PE- PLETINA DE 50X8 MM, CHAPA DE 8 MM, BARRA REDONDA 20 MM, ANGULO 40 MM	Material de aluminio necesario para la fabricación de la plataforma y de los ejes ferroviarios	
PE- VARILLA DE NYLON NATURAL 500 MTR X 120 MM	Material de Nylon utilizado para la generación de útiles necesarios para el mecanizado de las piezas de la plataforma	
....		
(Añada tantas filas como conceptos desee indicar)		

SUBTOTAL 1

Estudiantes ICARO*	Nº de meses	Cantidad
Nombre y Apellidos		

SUBTOTAL 2

*Deberá acreditarse su participación en el proyecto

--	--

TOTAL (SUBTOTAL 1 + SUBTOTAL 2):

Jaén, a __27__ de __septiembre__ de 2022__

EXCMA. SRA. VICERRECTORA DE COORDINACIÓN Y CALIDAD DE LAS ENSEÑANZAS