

REDUCCIÓN DE LAS PÉRDIDAS EN LA DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA Y LAS REDES DE FERROCARRIL URBANAS

DECEMBER | 2022

INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución y las redes de ferrocarril urbanas europeas se enfrentan a problemas similares, ya que ambas se han desarrollado como redes independientes, basándose en la resistencia y robustez de los suministros de energía existentes. Sin embargo, la penetración progresiva de las fuentes de energía renovable (FER) ha introducido un grado creciente de incertidumbre sobre la naturaleza futura de los flujos de energía.

La UITP participó en el proyecto de investigación financiado por la UE «E-LOBSTER» (En inglés, el acrónimo de **E**lectric, **L**OSses, **B**alancing, **S**Torage, **E**lectronics, **R**ailways, del concepto, en su traducción al español, del proyecto de Equilibrio de Pérdidas Energéticas a través del Almacenamiento Integrado y la Electrónica de Potencia aumentados por la Sinergia entre las redes de Transporte Ferroviario y de Distribución de la Energía eléctrica), coordinado por RINA. Este proyecto tenía como objetivo desarrollar un innovador sistema de gestión de «R+G» (Railway to Grid, o de ferrocarril a red) que, combinado con la electrónica de potencia avanzada, sea capaz de reducir las pérdidas de energía eléctrica tanto en la red de distribución de energía eléctrica como en la red ferroviaria.

Este documento resume los principales logros y soluciones innovadoras que de E-LOBSTER se derivaron, proporcionando a su vez una visión general de la metodología, los hallazgos y las conclusiones clave del proyecto.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

E-LOBSTER had the following objectives:

- Desarrollar y validar una nueva gestión energética optimizada en tiempo real de Ferrocarril a Red/Red a Ferrocarril (R+G) con el objetivo de mejorar la interacción entre las redes electrificadas de transporte y de distribución.
- Desarrollar sistemas de almacenamiento y electrónica de potencia avanzada como activos compartidos entre las redes de transporte electrificadas y de distribución de energía eléctrica, y permitir una gestión única de la energía entre ambas redes.
- Mostrar las soluciones y tecnologías innovadoras de E-LOBSTER en condiciones reales en el Metro de Madrid con Nivel de Madurez Tecnológica 6 (TRL 6), precedido por la validación en el Laboratorio de Redes Inteligentes de la Universidad de Newcastle.

Figura 1: Concepto E-LOBSTER



Para alcanzar estos objetivos, se conformó un consorcio de nueve socios para participar en el proyecto. Entre ellos se encontraban operadores de transporte público, fabricantes de equipos originales (OEM, por sus siglas en inglés), proveedores de tecnología y proveedores de servicios, así como instituciones académicas y de investigación. La lista completa de miembros se puede encontrar en el sitio web de E-LOBSTER: <https://www.e-lobster.eu/>.

SOLUCIONES TECNOLÓGICAS INNOVADORAS EN E-LOBSTER

Existe una necesidad global de aumentar la implementación de las tecnologías de bajo contenido en carbono (LCT, por sus siglas en inglés). Al mismo tiempo, existe una creciente necesidad de proporcionar a las personas una forma de transporte sostenible, como vehículos eléctricos y trenes, especialmente en los centros urbanos.

E-LOBSTER propone, por primera vez, una integración sustancial de fuentes renovables, transporte eléctrico por carretera y ferrocarril con tecnologías avanzadas de electrónica de potencia y almacenamiento de energía. Esto se gestionará mediante un sistema de gestión de control único (a saber, R+G Management System), que funcionará teniendo en cuenta el beneficio mutuo de la red de transporte y distribución, priorizando la reducción de las pérdidas de distribución y permitiendo la recuperación de la energía de frenado del tren.

El objetivo general del proyecto E-LOBSTER fue crear **sinergias entre los diferentes actores del sector energético**. Concretamente, el proyecto desarrolló y demostró, hasta el Nivel de Madurez Tecnológica 6 (TRL 6) y en un entorno relevante (un verdadero ferrocarril subterráneo en Madrid, conectado a una red de distribución eléctrica local), un sistema de interconexión de red de transporte eléctrico innovador, económicamente viable y fácilmente replicable. Gestionada adecuadamente, fue capaz de establecer sinergias entre las redes de distribución de energía, las redes de transporte urbano electrificadas (como metros, tranvías y ferrocarriles ligeros) y las estaciones de carga para vehículos eléctricos.

“El objetivo general del proyecto E-LOBSTER fue crear sinergias entre los diferentes actores del sector energético.”

Figura 2: Niveles de maduración de tecnología (TRL, por sus siglas en inglés)



El proyecto desarrolló soluciones y tecnologías innovadoras, que han sido validadas y demostradas en condiciones reales para:

- Evaluación de la fuente de pérdidas
- Minimización de las pérdidas de electricidad
- Maximización del consumo de la producción de FER a través del almacenamiento de energía eléctrica
- Recuperación de la energía de frenado.

E-LOBSTER se basa en las siguientes soluciones tecnológicas innovadoras:

- Smart Soft Open Point (sSOP)¹
- Sistema de almacenamiento de energía de la batería (BESS)
- Gestión energética de ferrocarril a red/red a ferrocarril (R+G).

¹ Los Soft Open Points (SOP) son dispositivos electrónicos de potencia colocados en puntos abiertos de las redes de distribución de electricidad para proporcionar un control de energía flexible a la red.

SOLUCIONES TECNOLÓGICAS INNOVADORAS

Smart Soft Open Point

El proyecto desarrolló y validó un «smart Soft Open Point» (sSOP) basado en convertidores de potencia consecutivos. El proyecto propuso un nuevo sSOP de tres vías para interactuar con la red de distribución de energía y el sistema de electrificación ferroviaria (un convertidor de corriente CC/CA de dos etapas con un enlace accesible de CC intermedio y regulado). Esto permite la gestión única del flujo de energía entre la subestación de tracción y la red de distribución.

Sistema de almacenamiento de energía de la batería

Como segunda innovación, el proyecto desarrolló y validó tecnologías de almacenamiento adecuadas para crear sinergias entre las redes de transporte electrificadas y las redes de distribución de energía mediante el aprovechamiento de las fuentes de energía renovables (FER). Junto con la tecnología sSOP, estos representan los dos activos compartidos entre la red de distribución de energía y la red de transporte.

Sistema de gestión R+G de E-LOBSTER

E-LOBSTER desarrolló y validó un nuevo e innovador sistema de gestión de R+G (Ferrocarril a red/Red a Ferrocarril) en tiempo real, capaz de optimizar la interacción entre las dos redes. El sistema de gestión E-LOBSTER proporcionó una plataforma única para la gestión del flujo de energía en tiempo real entre el ferrocarril, la red y el sistema de almacenamiento de energía.

El sistema también tiene en cuenta los vehículos eléctricos de carretera, con el objetivo de optimizar la interacción entre las tres redes (distribución, alimentación de trenes y carga de vehículos eléctricos). El sistema aumenta el subconsumo de la energía renovable conectada localmente a la red de distribución y el subconsumo de la energía de recuperación del frenado de los vehículos. De esta manera, el sistema analiza la estrategia de carga óptima para vehículos eléctricos.

En definitiva, el sistema de gestión de R+G hizo un uso óptimo de la energía disponible de ambas redes. Esta innovadora herramienta única para evaluar las pérdidas y el consumo de energía de las redes de distribución de energía y las redes de electrificación ferroviaria ha sido validada a través de datos reales.

Figura 3: Concepto E-LOBSTER



Además de los objetivos técnicos antes mencionados, el proyecto E-LOBSTER también incluyó los siguientes pasos:

- Diseñar la ampliación del concepto E-LOBSTER (estudios de viabilidad) y definir una hoja de ruta para la comercialización y explotación de los resultados de E-LOBSTER a través de modelos de negocio adecuados.
- Analizar el marco normativo, los estándares y las políticas actuales para identificar las oportunidades de replicación.
- Preparar un manual de «Buenas Prácticas», para garantizar la ciberseguridad adecuada necesaria para proteger los datos.
- Crear una red única de partes interesadas y partidarios del proyecto para ayudar a fomentar la comercialización de las soluciones E-LOBSTER.

PRINCIPALES HALLAZGOS Y RESULTADOS

El proyecto desarrolló y validó - a nivel TRL 7 - un sistema conocido como smart **Soft Open Point (sSOP)**. Este sistema está compuesto, principalmente, por los siguientes elementos:

- Un convertidor CC/CC, de 200 kW, conectado a la red de tracción.
- Un convertidor CC/CC, de 200 kW, con sistema de almacenamiento de energía (ESS).
- Un convertidor CC/CA, de 80 kVA, para red de baja tensión (BT)
- Transformador CA/CA, de 80 kVA, de aislamiento para baja tensión (BT).

El segundo elemento de hardware desarrollado es el **sistema de almacenamiento de energía de la batería (BESS)**, con una potencia máxima total de 200 kW. El sistema tiene las siguientes especificaciones:

- Tecnología: NMC de ion-litio
- Número de módulos (racks): Tres
- Potencia máxima total: 200 kW
- Energía máxima teórica: 237 kWh.

XOLTA (el departamento de sistemas de baterías de Lithium Balance) ha desarrollado un sistema de almacenamiento de baterías único, rentable y energéticamente eficiente que es totalmente adaptado para su uso en exteriores sin la necesidad de instalar costosos contenedores voluminosos provistos de aire acondicionado.

El sistema fue desarrollado para condiciones ambientales adversas (altas o bajas temperaturas). El sistema de baterías se integró con el sistema sSOP y fue gestionado por el sistema de gestión R+G.

Adicionalmente, XOLTA también desarrolló un método inteligente de gestión de la energía de la batería, que no solo satisface las necesidades de los requisitos del proyecto E-LOBSTER, sino que incluso prolonga la vida útil del sistema de baterías.

El **sistema de gestión R+G** se puede dividir en un componente de hardware basado en un PC industrial, y un componente de software que permite el control de E-LOBSTER y monitoriza los parámetros a través de una interfaz gráfica de usuario específica.

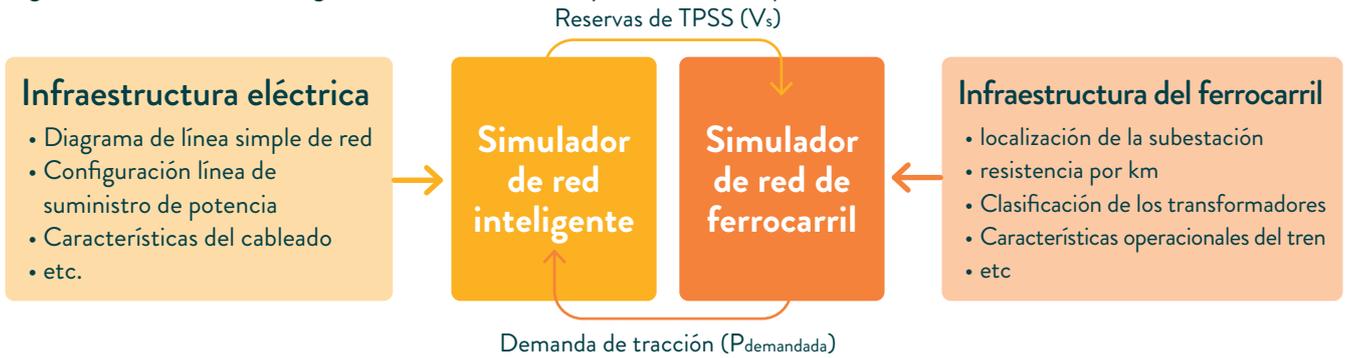
Por último, se desarrolló una **herramienta innovadora** para evaluar las pérdidas y el consumo de energía en la red de distribución de energía y la red de electrificación ferroviaria. La herramienta ha sido validada a través de datos reales suministrados por Metro de Madrid.

La **herramienta desarrollada** puede identificar la mayor fuente de pérdidas en la red, a través de los datos proporcionados por los usuarios, los equipos o la electrónica instalada en la línea y otras características. La idea es aprovechar cualquier exceso de energía regenerativa del ferrocarril que de otro modo se desperdiciaría.

Figura 4: Sistema de batería modular de balance de litio (XOLTA)



Figura 5: Herramienta integrada de monitorización y simulación de pérdidas de distribución



El sistema E-LOBSTER permite:

- Aumentar la eficiencia de la energía de frenado. Es posible mejorar la recuperación de la energía de frenado en un 10 %.
- Dependiendo de la frecuencia de los servicios, la energía almacenada en la batería puede ser de hasta 4-5 MWh/día.
- Esta energía puede cargar completamente hasta 40-50 baterías de vehículos eléctricos de gran capacidad (suponiendo una batería de 100 kWh) o hasta 100-125 baterías de vehículos eléctricos más pequeños (con portón trasero) (suponiendo una batería de 40 kWh).

VALIDACIÓN EN EL LABORATORIO DE LA UNIVERSIDAD DE NEWCASTLE Y COMPROBACIÓN EN EL METRO DE MADRID

El Laboratorio de Energía Inteligente, el Smart Energy Lab, ubicado en el Urban Science Building de Newcastle Helix, ha sido utilizado para validar y comprobar las tecnologías de innovación en el proyecto E-LOBSTER. El Smart Energy Lab de la Universidad de Newcastle proporciona una conexión a la red de distribución eléctrica física de baja tensión (BT). Esta red de distribución, el sistema de almacenamiento de energía de baterías y los componentes sSOP se han combinado con comportamientos emulados para la red ferroviaria utilizando datos en tiempo real medidos en la subestación de Sacedal, en Metro de Madrid, para demostrar la aplicabilidad de la solución en diferentes casos.

El principal objetivo del Sistema de Gestión R+G integrado es aumentar la eficiencia de regeneración por frenado en la red ferroviaria y ayudar a la red de BT en la distribución de los excedentes generados, por ejemplo, de fuentes de energía renovables o el sobreconsumo de puntos de recarga de vehículos eléctricos. Bajo este concepto, la estrategia de gestión energética en el proyecto E-LOBSTER se ha diseñado para distribuir energía entre tres sistemas: red de distribución, ferrocarril y almacenamiento de baterías.

El sistema de gestión de R+G determina si hay energía regenerada por frenado disponible en la red ferroviaria, así como si existe un pico de demanda energética, por ejemplo, por parte de vehículos eléctricos en carga, en la red de baja tensión o si hay un pico en la generación de energía por parte de las fuentes renovables. Esto significa que el sistema de gestión R+G se ha desarrollado para alternar de forma inteligente entre los dos modos siguientes, en función de la disponibilidad de la energía de frenado:

- 1 **Modo ferrocarril + red:** La red de tracción proporciona energía procedente del frenado al BESS y a la red de BT (dependiendo de si la red de BT demanda potencia)
- 2 **Modo red:** La energía se intercambia entre el BESS y la red de BT, de acuerdo con los niveles de consumo y generación de energía en el lado red. En esta condición, no hay potencia de frenado disponible.

La eficacia de la solución E-LOBSTER para gestionar el exceso de demanda de energía, como la generada en estaciones de carga de EV, y para respaldar la red mientras el exceso de energía proviene de fuentes de energía renovable, ha sido demostrada en las pruebas realizadas en Newcastle Lab. Estas pruebas validaron con éxito el sistema y proporcionaron una valiosa información sobre la solución E-LOBSTER para la siguiente fase del proyecto.

VALIDACIÓN POR METRO DE MADRID

La demostración de la tecnología de innovación E-LOBSTER tuvo lugar en las instalaciones de Metro de Madrid², donde la optimización de la red de distribución de energía es vital. En concreto, se instaló el sistema E-LOBSTER en la subestación de Sacedal, donde la alimentación de tracción sirve a dos tramos de la Línea 9 y al depósito de Sacedal..

A los fines de la comprobación, la salida del sistema E-LOBSTER se conectó a la red local de baja tensión (BT) de la subestación. El objetivo principal era utilizar el exceso de energía generada por el frenado de los trenes para alimentar la red interna de BT del Metro de Madrid. En la práctica, el sistema E-LOBSTER transforma una subestación convencional en una reversible.

2 Datos estadísticos del Metro de Madrid: más de 300 estaciones, casi 300 km de red ferroviaria con una media de 14 millones de viajeros al año.

La demostración consistió en un sistema smart Soft Open Point (sSOP) con el convertidor de tracción conectado a la red ferroviaria, el convertidor de red conectado a una red local de baja tensión y el convertidor de baterías ESS conectado al sistema de baterías. Durante la demostración, el equipo del proyecto realizó mediciones para evaluar el funcionamiento del sistema. El equipo registró la tensión de entrada al convertidor de tracción, la corriente de entrada en CC al convertidor de red (red de CC en BT) y la corriente de entrada al convertidor de batería (red de batería de CC en BT). Las condiciones para las pruebas se establecieron con una potencia de referencia para la red ferroviaria de hasta 50 kW, una potencia de referencia de red de distribución de hasta 10 KW y se eligió un punto de ajuste para la tensión de la catenaria a 652 V.

El sistema también se comprobó en condiciones de prueba establecidas con una potencia de referencia para la red ferroviaria de hasta 100 kW, una potencia de referencia de red de distribución de hasta 10 KW y para ello se eligió un punto de ajuste para la tensión de la catenaria a 655 V.

REPLICABILIDAD DEL SISTEMA

Durante el proyecto, se realizó un prototipo para una aplicación a gran escala de E-LOBSTER. E-LOBSTER se puede adaptar a subestaciones y líneas con diferentes características, además de la demostración incluida en el proyecto. Además de ser implementado en líneas de metro en Europa y más allá de sus fronteras, todo el concepto puede ser replicado, si se aplican las modificaciones necesarias para adaptar el sistema a las especificidades locales.

Se han llevado a cabo prototipos de implementación de E-LOBSTER a gran escala, considerando los siguientes casos:

- otras redes de metro
- tranvías
- trenes de cercanías y regionales
- ferrocarriles de alta velocidad

OTRAS REDES DE METRO

El sistema E-LOBSTER se puede replicar en otras líneas de líneas de Metro de Madrid que operan a 600 V sin ninguna modificación importante. La replicación de E-LOBSTER para transporte metropolitano en el rango nominal de 600 V - 750 V tampoco requiere cambios significativos, y puede llevarse a cabo mediante el ajuste fino del sistema instalado en la Línea 9 de Metro de Madrid.

Las situaciones en las que es posible que se deban realizar modificaciones son las siguientes:

- donde se producen cambios en el número de coches por tren
- donde se producen cambios en el flujo de potencia a la red externa.

Si el sistema E-LOBSTER se quiere replicar en otras líneas de Metro de Madrid que operan a 1.500 V, será necesario modificar el sistema original. La tensión del enlace de CC en el sSOP se puede mantener a 750 V, pero se espera que se modifiquen los siguientes aspectos:

- Convertidor de tracción.
- Clasificación del BESS: La potencia y la capacidad nominal del BESS tendrían que modificarse de acuerdo con dos factores:
 - a. La potencia o energía regenerativa que se espera del tren
 - b. Los requisitos para el flujo de energía entre el sSOP y la red local
- Convertidor de red: Adaptado en línea a los incrementos de la clasificación de la tracción y del BESS.

TRENES REGIONALES

Los trenes regionales en la mayoría de los países europeos operan a 1,5 kV o 3 kV CC. Por lo tanto, si el sistema E-LOBSTER se va a replicar para las líneas de trenes regionales, se necesitarán ciertas modificaciones:

- Convertidor de tracción
- Clasificación del BESS
- Convertidor de red (si los incrementos de tracción y de BESS difieren)

También debe tenerse en cuenta:

- El número de coches de viajeros por tren
- El flujo de potencia a la red externa.

TRANVÍAS

Los tranvías de todo el mundo operan bien a 600 V CC o bien a 750 V CC, siendo la tensión de 750 V la más frecuente en el sistema moderno. Si el sistema E-LOBSTER se va a replicar en un tranvía que funciona a 750 V, no se necesitarán cambios específicos.

Figura 6: El Sistema E-LOBSTER en funcionamiento real



ESPECIFICACIONES Y VENTAJAS DEMOSTRABLES DEL SISTEMA:

La línea 9 del metro de Madrid tiene 39,4 km de longitud, con 29 estaciones desde Paco de Lucía hasta Arganda del Rey. La tensión de servicio de esta línea es de 600 V CC.

Los beneficios del uso del sistema E-LOBSTER comprobado en Madrid fueron:

- La energía eléctrica producida durante el frenado, que no está siendo utilizada por otro tren, se puede utilizar para alimentar otros equipos.
- El consumo de energía total se reduce.
- Las emisiones de gases de efecto invernadero y la huella de carbono se reducen.
- El uso de resistencias de frenado se reduce a medida que se reducen la temperatura del túnel y la ventilación necesaria.
- La infraestructura de la estación no necesita ser modificada, el funcionamiento normal y el funcionamiento de la subestación no se ven afectados y el sistema se puede conectar y desconectar cuando sea necesario.
- El funcionamiento del sistema no interfiere en la instalación, con capacidad para desconectarse automáticamente si es necesario, garantizando la fiabilidad actual y las ratios de disponibilidad de la subestación de tracción.

Cabe señalar que E-LOBSTER también se puede utilizar para estaciones de carga de vehículos eléctricos, ya que la batería también puede alimentar la carga de estos vehículos mientras está siendo recargada mediante el frenado del tren.



CONCLUSIONES

El sistema E-LOBSTER ha sido validado con éxito y comprobado en condiciones reales a nivel TRL 6, demostrando las potencialidades del sistema general que - a través de algunos activos compartidos (sSOP y BESS) entre la red de distribución de energía y la red de transporte - es capaz de reducir las pérdidas de energía tanto a nivel de la red de distribución (actualmente alrededor del 5 %) como a nivel de alimentación eléctrica de los trenes (actualmente alrededor del 8 %). Esto es gracias a un adecuado sistema de gestión de R+G que es capaz de intercambiar electricidad entre ambas redes. Esto supone beneficios mutuos de una reducción en las pérdidas y una mayor estabilidad de la red.

Algunos logros técnicos y no técnicos deben destacarse después de la finalización del proyecto:

- *Gestión energética óptima, capaz de impulsar sinergias entre las redes de distribución de energía y de transporte.*
- *Demostración del funcionamiento estable y seguro de las redes inteligentes que integran fuentes de energía variables, con un alto potencial para integrar mayores cuotas de energías renovables en el futuro mercado de la UE.*
- *Reducción de pérdidas.*
- *Alto potencial de replicabilidad en diferentes contextos (como metros, tranvías, ferrocarriles regionales, ferrocarriles de alta velocidad).*
- *Apoyo a la evolución de las políticas en curso en el ámbito del diseño del mercado interior de la electricidad. Además, apoyo a las políticas de eficiencia energética en los transportes electrificados y comprobación de nuevos esquemas para su contribución «local inteligente» a la gestión de la red de distribución de energía.*

Entre las principales lecciones aprendidas del proyecto, para concluir, cabe mencionar la importancia del marco político y la necesidad de prestar especial atención al proceso de autorización para la instalación del sistema, de acuerdo con las especificidades de los contextos locales.

PROPUESTA DE VALOR DEL SISTEMA:

- Mejora la resiliencia, la capacidad y la calidad de la energía de la red
- Permite la conexión de la infraestructura de carga de vehículos eléctricos
- Permite la integración de fuentes de generación de energía renovable
- Reduce el coste de la energía consumida para cargar los vehículos eléctricos
- Proporciona una gestión óptima en tiempo real de los flujos de energía a través de la plataforma de control
- Reduce las pérdidas de energía y, por ende, los costes generales
- Ofrece oportunidades para descarbonizar la movilidad urbana e interurbana.

NUESTRO AGRADECIMIENTO A LOS SOCIOS DEL PROYECTO

- RINA
- Turbo Power Systems (TPS)
- Rail Safety and Standards Board (RSSB)
- Universidad de Birmingham
- LITHIUM BALANCE a/s
- Metro de Madrid s.a.
- Universidad de Newcastle
- Fundación ferrocarriles españoles

NUESTRO AGRADECIMIENTO A NUESTROS EDITORES Y AUTORES

- Flavio Grazian, UITP
- Giannicola Loriga, RINA Consulting
- Mansoureh Zangiabadi, Universidad de Newcastle
- Maciej Swierczynski, Sensata

El informe fue revisado por la Unidad de Bus y la Unidad de Ferrocarriles del Departamento de K&I.



This is an official Project Brief of UITP, the International Association of Public Transport. UITP has more than 1,900 member companies in 100 countries throughout the world and represents the interests of key players in this sector. Its membership includes transport authorities, operators, both private and public, in all modes of collective passenger transport, and the industry. UITP addresses the economic, technical, organisation and management aspects of passenger transport, as well as the development of policy for mobility and public transport worldwide.

This Project Brief is part of the research project E-LOBSTER which has received funding by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme, under grant agreement No 774392.

Find out more at <https://www.e-lobster.eu/>



DIGITAL VERSION AVAILABLE ON
MYLIBRARY



DECEMBER | 2022

Rue Sainte-Marie 6, B-1080 Brussels, Belgium | Tel +32 (0)2 673 61 00 | info@uitp.org | www.uitp.org