



Plataforma
tecnológica española de
eficiencia energética

PTE-ee: Iniciativa Tecnológica Prioritaria 2021 (ITP)

DESARROLLOS EN LOS PROCESOS DE RECICLADO Y VALORIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS UTILIZANDO MICROONDAS Y ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE ESOS PROCESOS



Objetivo de la ITP

Evaluar **estado del arte** en la problemática del **reciclaje de MC** y el potencial de los tratamientos térmicos/termoquímicos asistidos por **tecnología microondas** para intensificar el proceso de reciclado

Foco

Sectores: eólico, aeronáutico y náutico

Propuesta de valor

Calentamiento asistido por microondas:

- 1) **Calentamiento volumétrico selectivo, sin pérdidas** de calor por conducción/convección respecto a calentamiento convencional
- 2) No requiere **combustibles fósiles** para proporcionar calor
- 3) **Proporciona** velocidades de **calentamiento/enfriamiento** mucho más **rápidas** (ahorro de tiempo y energía en arranques y paradas)
- 4) **Permitiría** trabajar con temperaturas de procesamiento más bajas, mejorando el **control** de las **propiedades de las fibras** y de los **bio-oils** resultantes



Uso de MC en la industria

Los materiales compuestos (MC) utilizados contienen principalmente fibras de vidrio, fibras de carbono y resinas poliméricas.



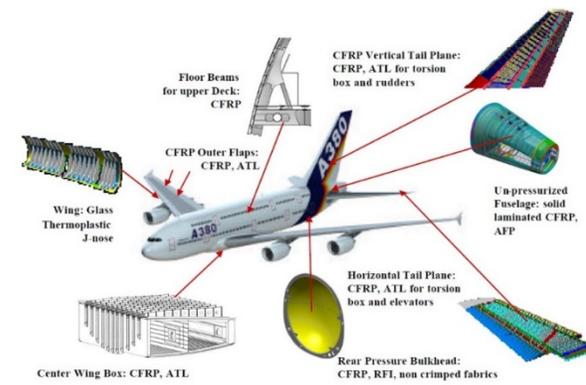
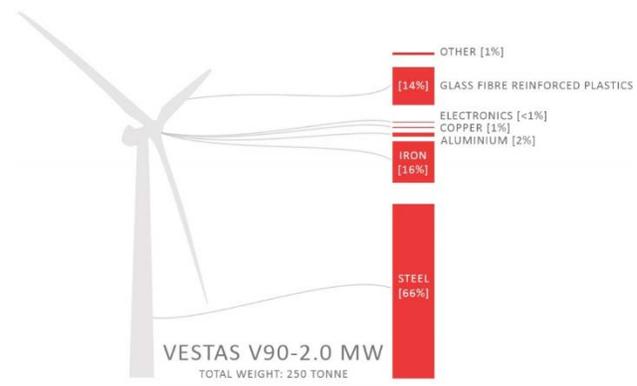
Industria Eólica



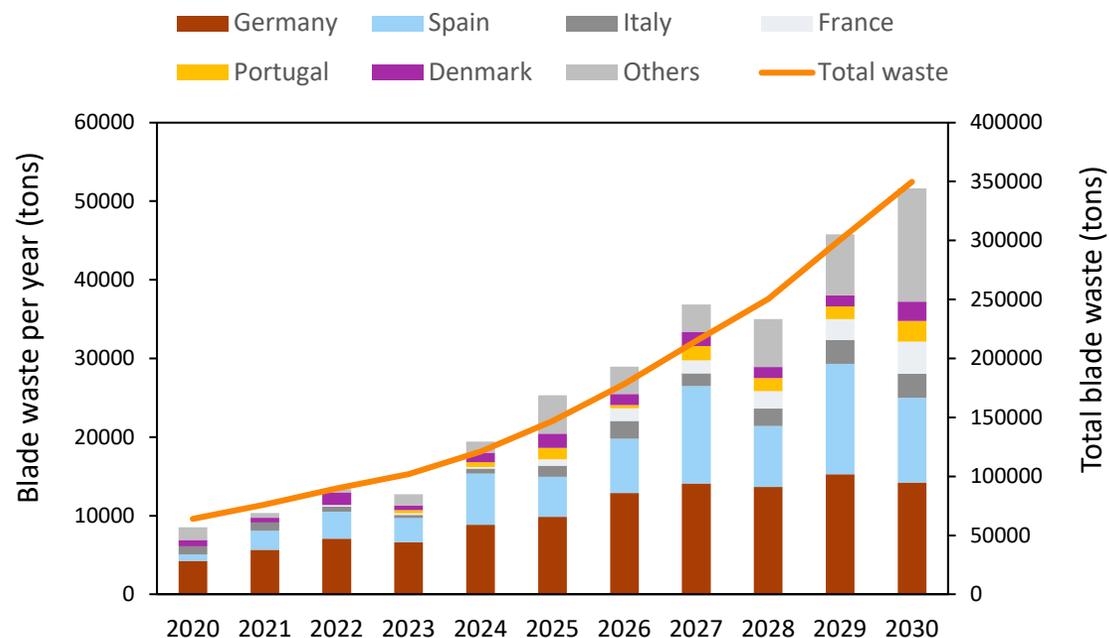
Ind. Aeronáutica



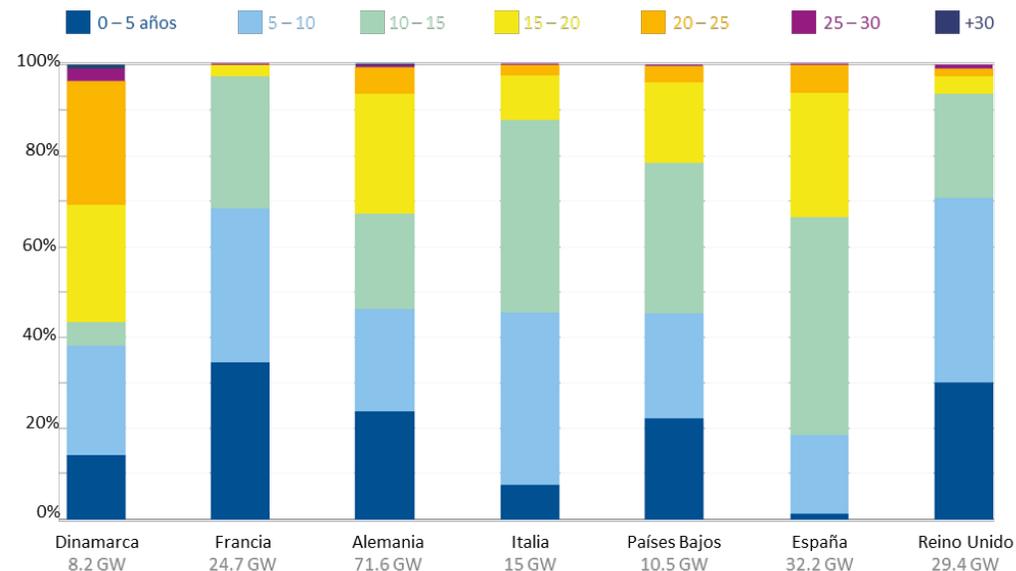
Ind. Naval



Sector eólico



Estimación del peso de palas desmanteladas al final de su vida útil en Europa.
Periodo: 2020 – 2030. Fuente: Wind Europe

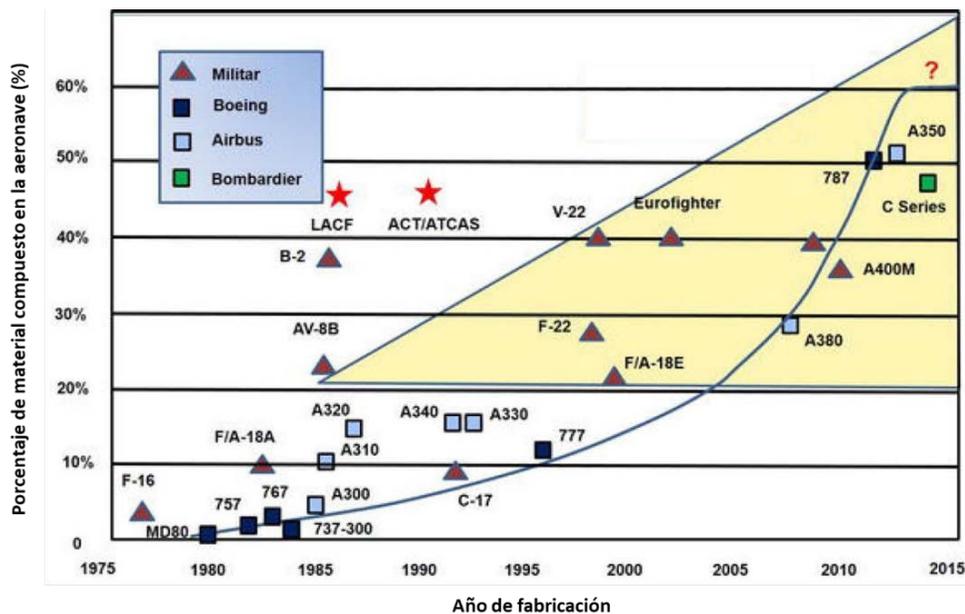


Distribución de antigüedad de la instalación eólica terrestre por naciones (Agosto 2019) y estimación de potencia total instalada en 2023. Adaptación del informe “Wind Energy in Europe: Outlook to 2023”

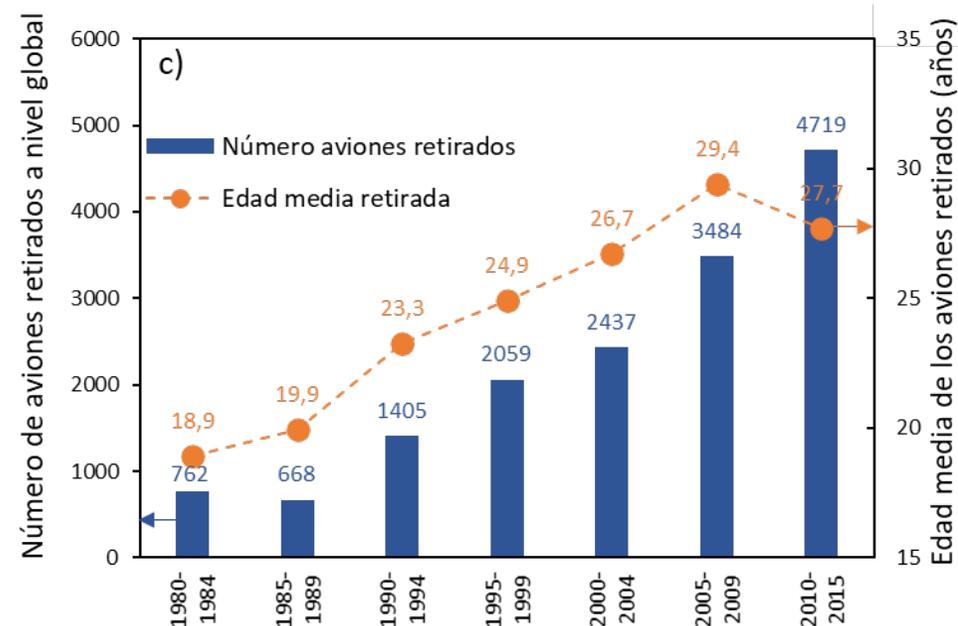
España (2020):

- 1.203 parques eólicos (>800 municipios), 20.940 aerogeneradores y 62.820 palas instaladas
- 36% de los aerogeneradores (7500) con más de 15 años de antigüedad
- Previsión de desmantelamiento: 20000 palas desinstaladas en los próximos años – 15348 toneladas (vida útil media: 20 – 25 años)

Sector aeronáutico



Aumento del porcentaje de materiales compuestos en la estructura de los aviones desde 1975 hasta 2015, para aviones comerciales y militares

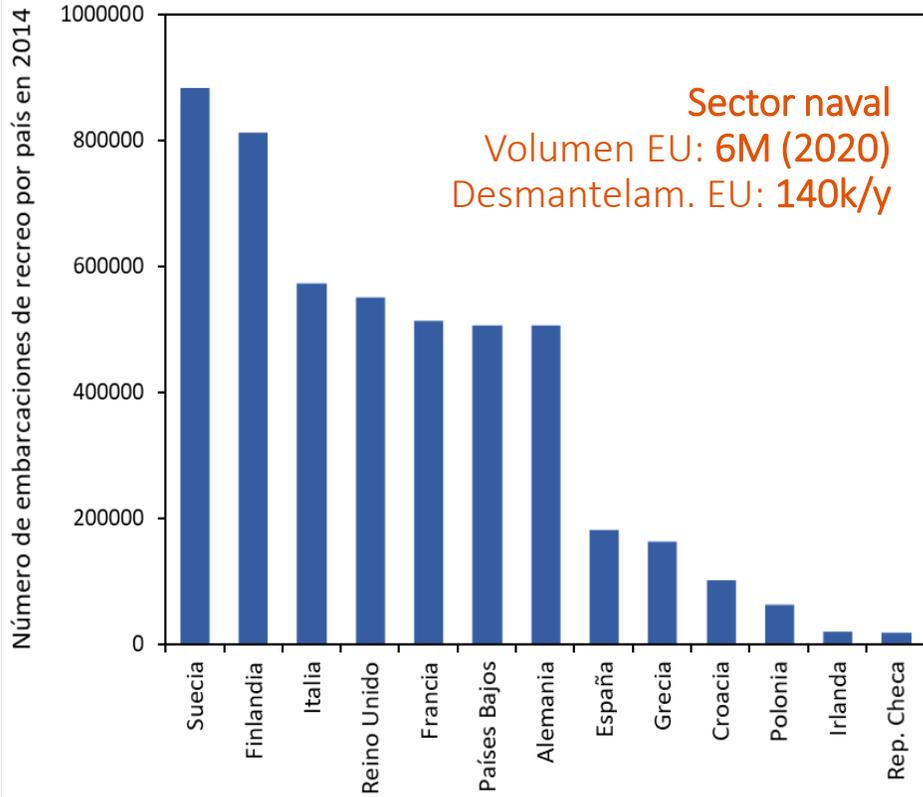


Evolución temporal del número de aeronaves desmanteladas y edad media de retirada

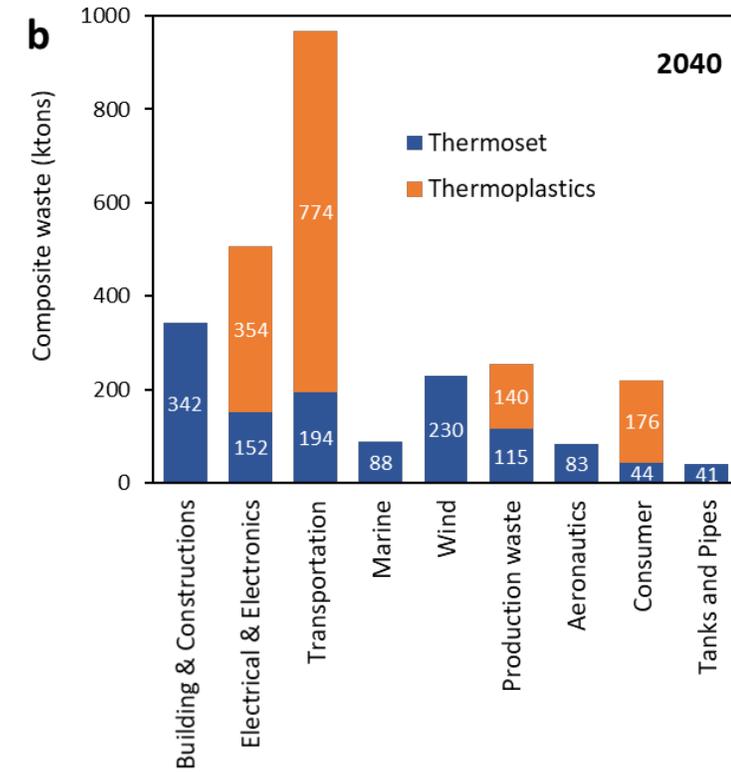
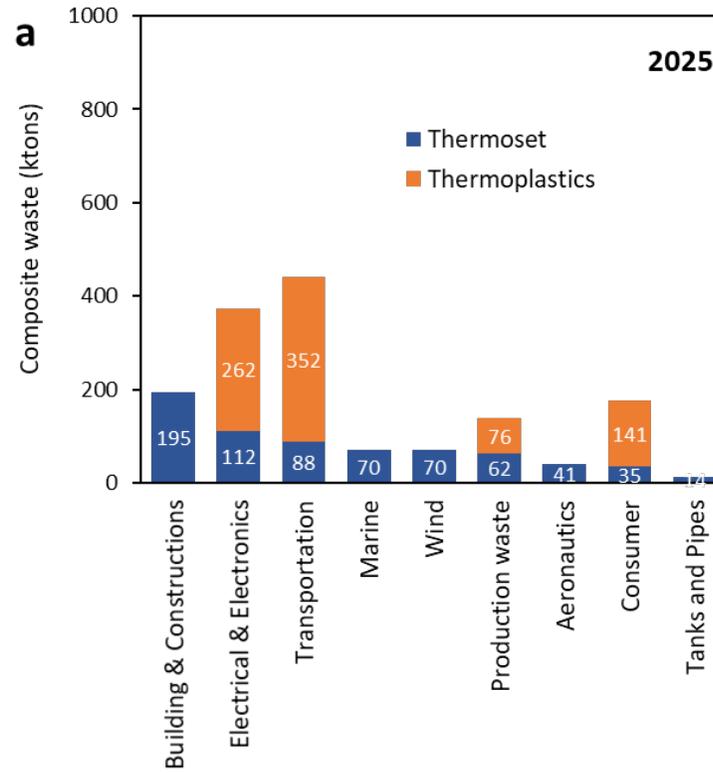
Sector aeronáutico:

- Vida útil: < 30 años
- Desmantelamiento global 2020-2030 (IATA): retirada de 11000 aviones (20 toneladas MC/avión) → 220000 toneladas MC
- Europa - Fracción del total de aviones desmantelados: 33%

Otros sectores



Número total de embarcaciones de recreo por países de EU en 2014



Prospección de la generación de residuos de MC en 2025 y 2040, clasificando las resinas como material termoplástico o termoestable

Estimación multisectorial:

- La generación de residuos basados en MC va a aumentar un 80% en los próximos 15 años (2025 → 2040), de 1520 a 2730 kton

Marco legislativo y de ayudas a nivel europeo

La **responsabilidad** de desechar los compuestos EoL (end of life) **recae en el fabricante** del componente, el vertido legal de MC en vertederos es limitado y, por ejemplo, se requiere que los vehículos automotores desechados después de 2015 sean 85% reciclables (*EU 1999/31 / EC; EU 2000/53 / EC*)

SECTOR EÓLICO

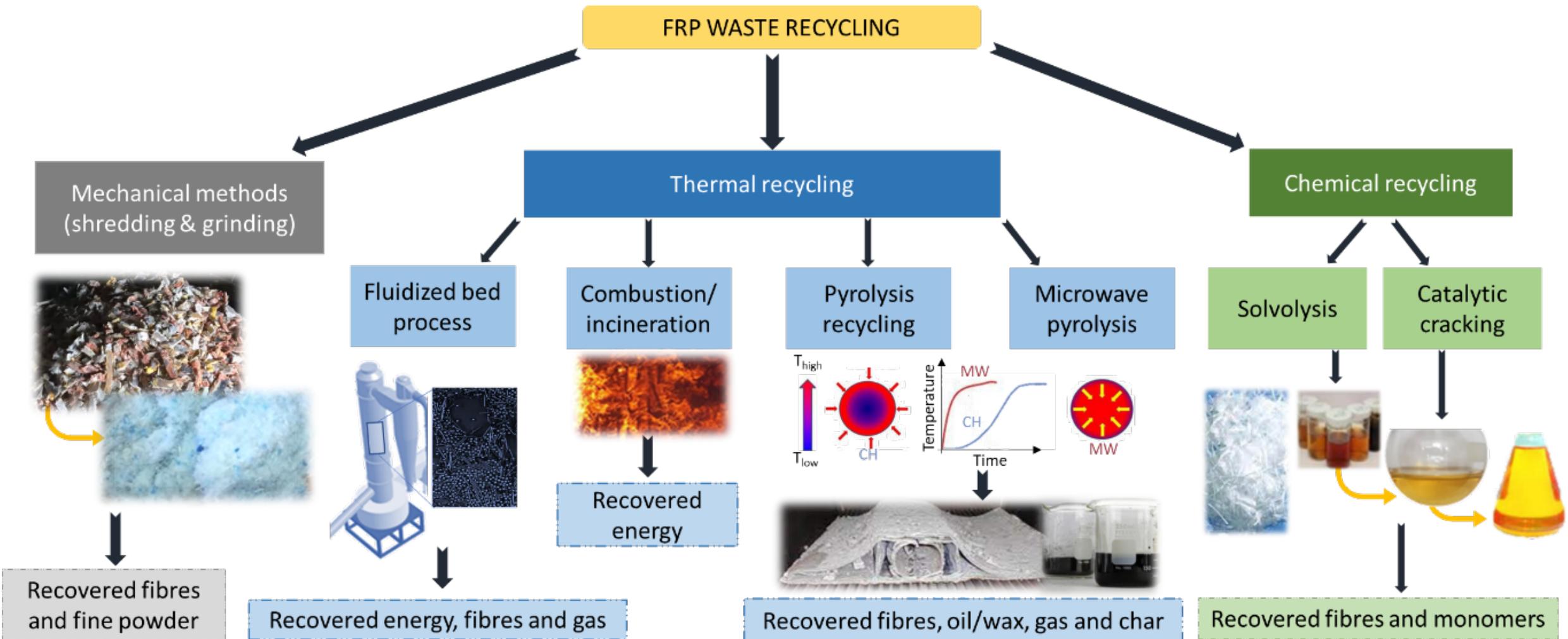
Vertido de palas de aerogeneradores ya **prohibido en Austria, Finlandia, Alemania y Países Bajos**. Se desea extender a toda Europa para 2025.

SECTOR AERONÁUTICO

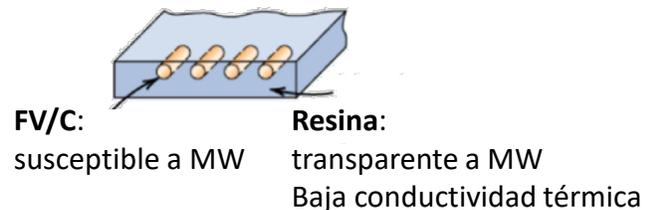
Reciclaje de aeronaves **completamente voluntario** y no sujeto a regulación (volumen de residuo muy inferior al de otros vehículos, *EU 2000/53 / EC*).

El desmantelamiento de aviones debe atender a la normativa de gestión de residuos y buenas prácticas en actividades de reciclado de *International Civil Aviation Organization (ICAO)* e *International Air Transport Association (IATA)*

Tecnologías existentes para el reciclado de materiales compuestos



Reciclado/valorización de materiales compuestos asistido por microondas



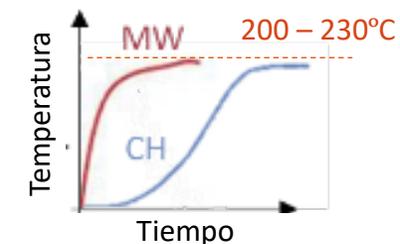
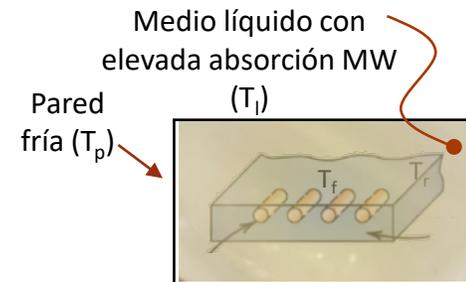
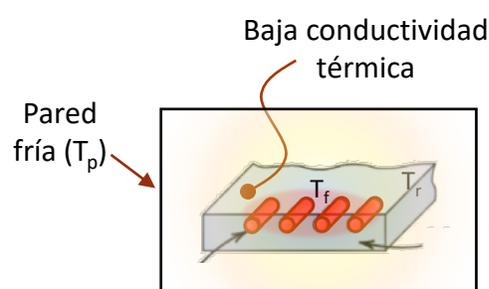
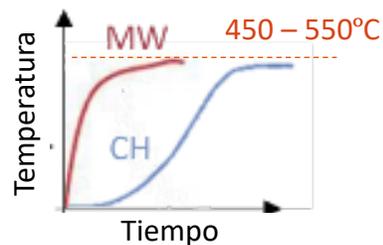
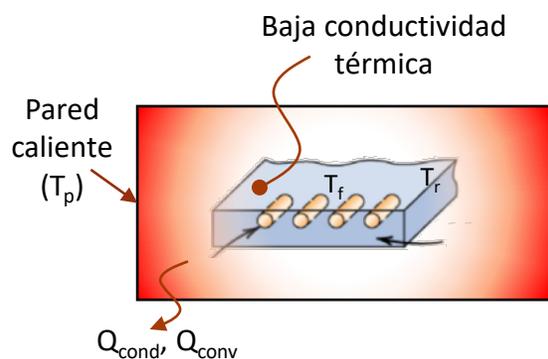
RECICLADO DE FIBRAS Y VALORIZACIÓN DE RESINAS

RECICLADO (QUÍMICO) DE FIBRAS Y RESINAS

Pirólisis - calentamiento convencional (CH)

Pirólisis asistida por microondas (MW)

Solvólisis asistida por microondas



- Alto consumo E
- $T_p \gg T_r > T_f$
- Pérdidas de calor

- ✓ Fibras
- ✓ Bio-oil
- ✓ Gas
- ❖ Residuo sólido

- Consumo E moderado
- $T_f > T_r > T_p$
- Menor degradación fibras
- Mejor purificación fibras

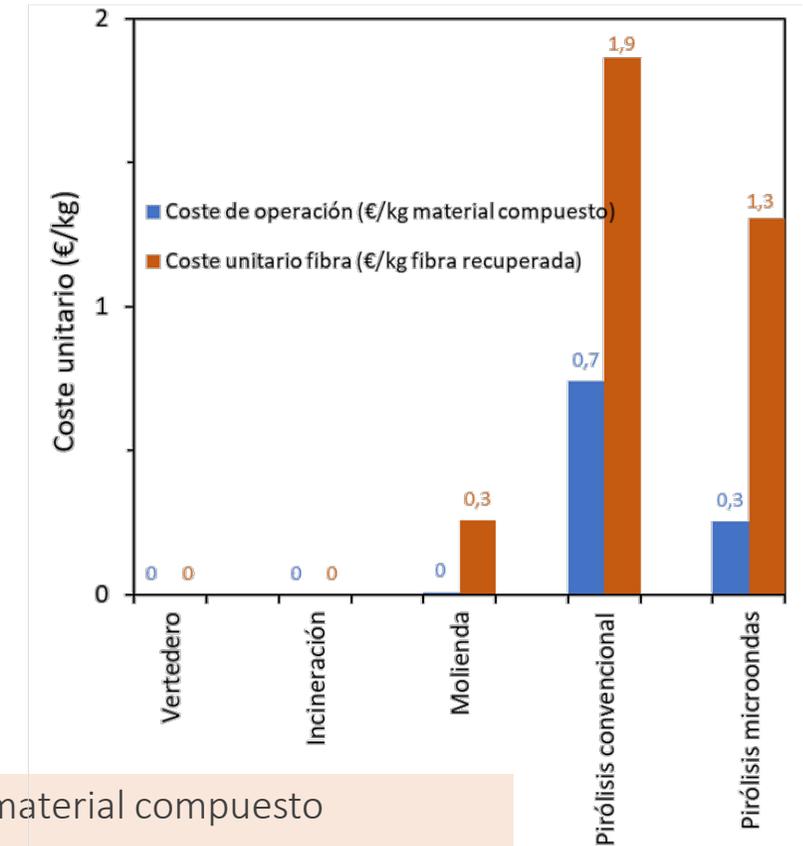
- ✓ Fibras (mejores caract.)
- ✓ Bio-oil (+ calidad)
- ✓ Gas
- ❖ Residuo sólido (- cantidad)

- Bajo consumo E
- $T_i > T_r = T_f$
- Recuperación monómeros
- Tratam. residuo líquido

- ✓ Fibras (+ cortas)
- ✓ Monómeros (proven. resinas)
- ❖ Residuo líquido (neutralizar)

Tecnologías de reciclado: demanda energética y huella de C

Tecnología de reciclado	Demanda energética (MJ/kg MC)	Ahorro CO ₂ equivalente anual (tCO _{2eq} /año)	Materia prima	Producto reciclado (kg/kg MC)
Reciclado mecánico	0.1 – 4.8	1.9	Electricidad	Fibra corta y polvo de fibra
Reciclado químico	21 – 91	16.4	Electricidad, ácido acético, agua y sosa	Fibra y resina epoxi
Pirólisis convencional	24 – 30	18.5	Electricidad, gas natural	Fibra, hidrocarburos en fase gas (parafinas C ₁ -C ₃) y líquida (C ₄ -C ₆), ésteres y alcoholes
Pirólisis asistida por microondas	5 – 10	20.4	Electricidad	Fibra, hidrocarburos en fase gas (parafinas C ₁ -C ₃) y líquida (C ₄ -C ₆), ésteres y alcoholes



- ✓ La pirólisis asistida por microondas es 3-5 veces menos intensiva en uso de energía por kg de material compuesto
- ✓ No requiere combustibles fósiles ni el uso de productos químicos o susceptores microondas
- ✓ Permite preservar en gran medida las propiedades mecánicas de las fibras
- ✓ Permite obtener bio-oils bajo condiciones más controladas a partir de las resinas

➤ Viabilidad económica sujeta a disminución de CAPEX (estandarización) y evolución de la legislación en circularidad

Reciclaje de plásticos asistida por microondas: demostradores industriales

Prototipos de hornos microondas para reciclado/valorización de plásticos



Fabricante	Características	Potencia	Capacidad
Fricke-Mallah GmbH (Alemania)	Reactor MW pirolítico rotatorio	6 magn. – 6 kW @ 2.45 GHz	250 kg/h (< 1000 °C)
Muegge GmbH (Alemania)	Reactor MW para depolimerización	20 magn. – 3 kW @ 2.45 GHz	1000 kg/h (< 350 °C)
Enval Ltd. (Reino Unido)	Reactor MW para recuperación de Al laminado de envases plásticos	100 kW	500 kg/h (450 – 550 °C)

- ✓ No existen prototipos de reactor microondas a escala de demostración para reciclaje de materiales compuestos a nivel Europeo
- ✓ Oportunidad de liderazgo tecnológico nacional basado en el músculo de I+D+i existente en este ámbito

Desarrollo tecnológico: actores



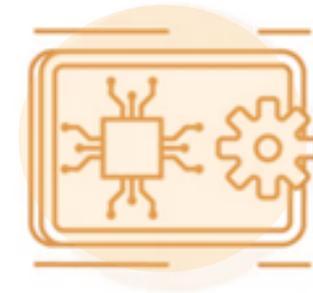
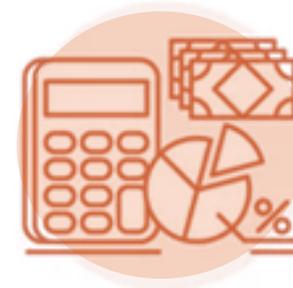
➤ Principales entidades a nivel nacional trabajando en tareas de desarrollo tecnológico en la cadena de valor del reciclaje de materiales compuestos por pirólisis asistida por microondas y actores públicos y privados asociados a la problemática en los sectores eólico y aeronáutico

Análisis DAFO para el reciclaje de MC asistido por microondas

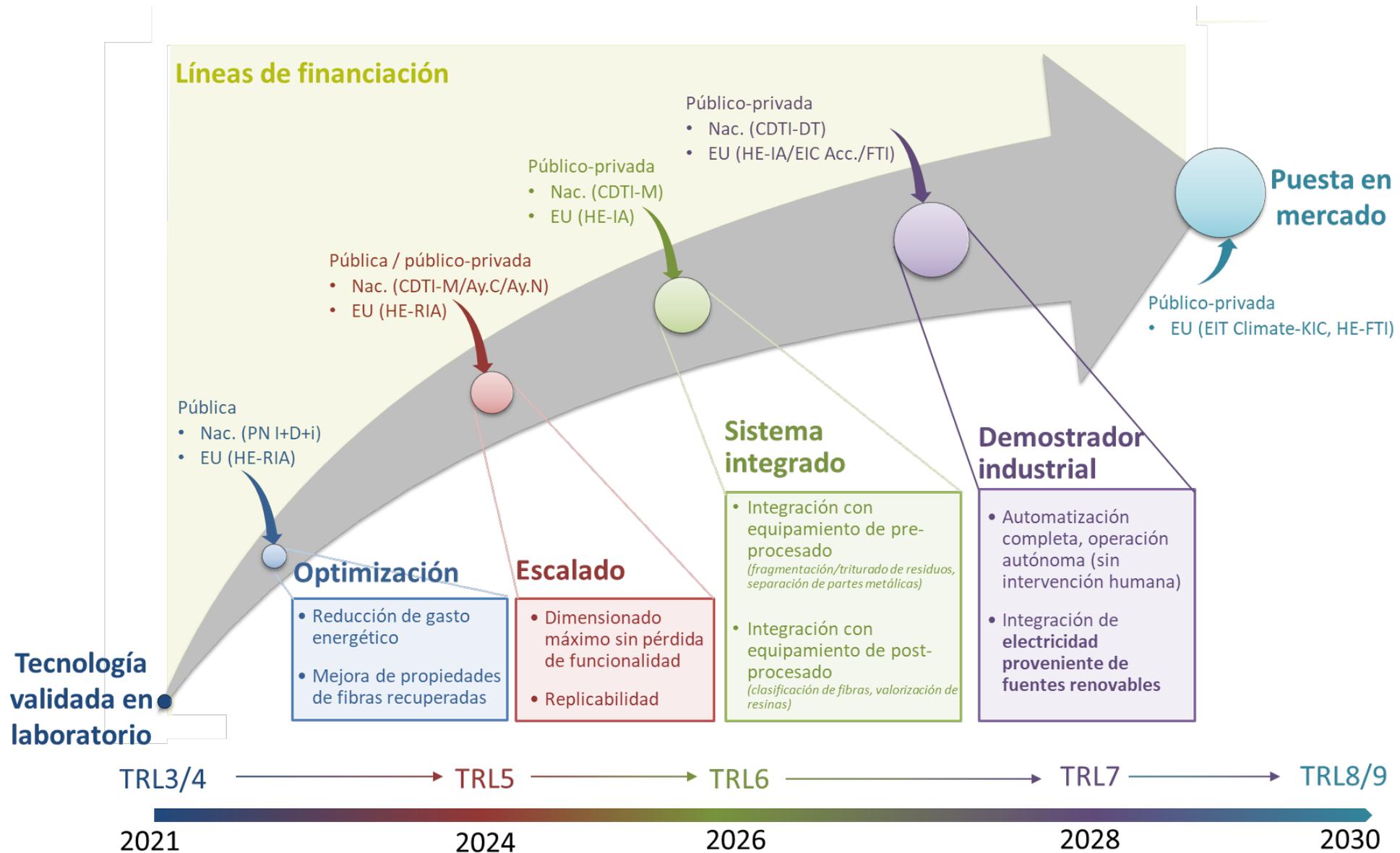
FORTALEZAS	DEBILIDADES
<ul style="list-style-type: none"> - Calentamiento selectivo - Eficiencia energética - Mejora en el control de proceso - Electrificación: operable a partir de fuentes renovables y compatible con industria 4.0. - Reducción de huella de CO₂ - Control electrónico - Prueba de concepto satisfactoria - Reducción de tiempos y temperaturas de operación - Bajo impacto en las propiedades mecánicas de las fibras - Adaptabilidad de productos generados a partir de resinas - Cortos periodos de amortización 	<ul style="list-style-type: none"> - Dependencia de los materiales - Desarrollo de prototipos complejo - Reducido número de equipos industriales en funcionamiento - Alto coste de inversión en equipamiento - Escalabilidad no inmediata - Eventual formación de puntos calientes y heterogeneidades térmicas en la muestra
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> - Gran cantidad de FRP a valorizar a corto-medio plazo - Normativa favorece inversión en procesos de reciclado - No hay ninguna otra tecnología de reciclado de FRP que presente mejores perspectivas - 2º país de Europa con mayor volumen de desmantelamiento previsto en sector eólico - Liderazgo mundial en reciclado de aeronaves - Calentamiento selectivo microondas: idóneo para separar fibras de resinas con bajo impacto en propiedades mecánicas - Valorización de resinas adaptable a necesidades de mercado (control térmico) - Promoción de tecnologías que garantizan circularidad, eficiencia energética, electrificación y reducción de huella de carbono - Posibilidad de convertirse en tecnología de referencia exportable a otros territorios, creando empleo y riqueza en España - Avance tecnológico: reducción de costes y mejora de eficiencia en generadores microondas de estado sólido 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada complejidad para diseñar y desarrollar de instalaciones de gran capacidad - Estado del arte muy alejado de la implementación industrial - Difícil réplica de instalaciones para distintos materiales a tratar - Necesidad de una alta interdisciplinariedad en el diseño de los equipos. - Investigación intensiva en este campo: posibilidad de perder el “tren” de la innovación en favor de territorios con mayor apuesta por I+D+i

Análisis PESTEL

POLÍTICOS	- Apuesta decidida por estrategias de circularidad y sostenibilidad medioambiental (<i>Estrategia Española de Economía Circular 2030, Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030</i>)			●
	- Ayudas CDTI y programas de colaboración público-privada			●
ECONÓMICOS	- Oportunidad de liderazgo tecnológico y creación de empleo		●	
	- El reciclaje es sustancialmente más caro que el vertido	●		
SOCIALES	- Concienciación y apoyo social a estrategias de tecnología circular, eficiencia energética, electrificación de procesos y descarbonización			●
	- Buena prensa		●	
TECNOLÓGICOS	- Reducción de costes de componentes y mejora de eficiencia en generadores microondas de estado sólido			●
	- Ninguna otra tecnología presenta mejores perspectivas de desarrollo (<i>Mejores Técnicas Disponibles</i>)		●	
	- Elevada complejidad de diseño y desarrollo de instalaciones de gran capacidad	●		
ECOLÓGICOS	- Apuesta por la electrificación de procesos para su operación a partir de fuentes renovables			●
	- Reciclado de FRP como medida para reducir emisiones de efecto invernadero			●
	- España representa el 2º país de Europa con mayor volumen de desmantelamiento eólico previsto a medio plazo y 1er país en almacenamiento y reciclado de aeronaves		●	
	- No existe legislación nacional que obligue al reciclaje de FRP y evite su depósito en vertedero (<i>Ley de Residuos y suelos contaminados: en fase de tramitación</i>)	●		
LEGALES	- Se fomenta la economía circular y la reducción de emisiones (<i>Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo (2050)</i>), alineada con el objetivo de la UE: neutralidad climática en 2050, <i>Ley de Cambio Climático y Transición Energética, Reglamento de taxonomía</i>).			●
	- La normativa favorece la inversión en procesos de reciclado			●

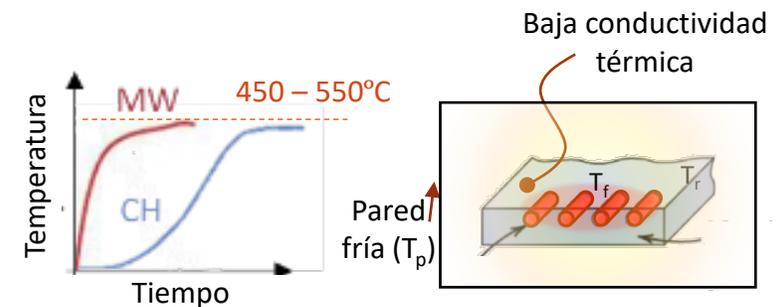
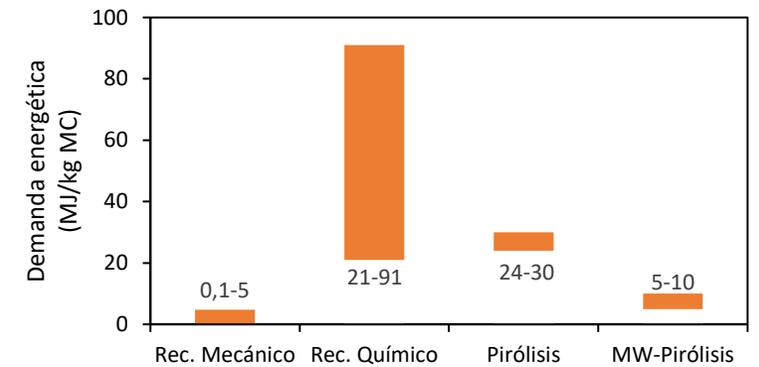


Hoja de ruta para el desarrollo de la tecnología propuesta



Conclusiones

- Urge desarrollar una estrategia de **economía circular** para impulsar el **reciclaje** y la **valorización de MC** que finalizan su vida útil.
- Es preciso desarrollar **nuevas opciones de reciclado** y valorización de MC, técnica- y económicamente viables para que puedan estar disponibles en el mercado para los agentes con activos asociados al final de su vida útil.
- La tecnología basada en la **pirólisis asistida por microondas** muestra excelentes perspectivas debido a:
 - 1) posibilidad de llevar a cabo un **calentamiento selectivo** de las fibras para facilitar la volatilización local de la resina en contacto con la superficie de la fibra con un menor aporte energético;
 - 2) separación se realiza a una **menor temperatura de proceso**, minimizando el impacto sobre las propiedades mecánicas de la fibra resultante y aumentando el control sobre los productos de valorización de las resinas;
 - 3) operación a partir de **aporte energético** directamente proveniente de **fuentes renovables**





Muchas gracias por su atención



Tel.: [+34] 976 976 859 · circe@fcirce.es

www.fcirce.es