

Bienvenid@s

WEBINAR



Sigue el Webinar



#WebinarsAEMAC



ADRIANA SERRAS MALILLOS

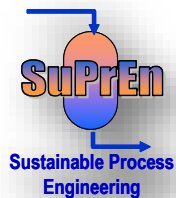
Dpto. Ingeniería Química y del Medioambiente
Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU)

“Reciclado integral de materiales compuestos de fibra de carbono y de vidrio: valorización de la matriz plástica en procesos de reciclado basados en pirolisis”

13 de Julio 2023, 11:00 (Madrid, GMT+2)

Reciclado integral de materiales compuestos de fibra de carbono y de vidrio: valorización de la matriz plástica en procesos de reciclado basados en pirólisis





Grupo de Investigación SUPREN

- Grupo de Investigación
 - » Profesorado
 - » Profesorado retirado
 - » Investigadores postdoctorales
 - » Investigadores predoctorales
 - » Contacto
- Perfil Investigador
 - » Líneas de investigación
 - » Equipamiento
- Investigación
 - » Proyectos
 - » Artículos (a partir del 2004)
 - » Congresos (a partir del 2008)
 - » Capítulos de libro
 - » Patentes
 - » Tesis
- Servicios externos
- Noticias

Líneas de investigación



Diseño de sistemas avanzados de reacción

- » Artículos
- » Congresos
- » Capítulos de libro
- » Patentes
- » Proyectos



Procesos integrados en biorrefinerías

- » Artículos
- » Congresos
- » Capítulos de libro
- » Patentes
- » Proyectos



Tecnologías del hidrógeno

- » Artículos
- » Congresos
- » Capítulos de Libro
- » Patentes
- » Proyectos



Reciclado y Valorización de Residuos

- » Artículos
- » Congresos
- » Capítulos de Libro
- » Patentes
- » Proyectos



Desarrollo de procesos hidrometalúrgicos

- » Artículos
- » Congresos
- » Capítulos de Libro
- » Patentes
- » Proyectos



Reciclado y Valorización
de Residuos



RESIDUOS
PLÁSTICOS



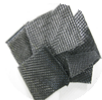
RESIDUOS COMPLEJOS
(RAEE, ASR, CDR)



RESIDUO AGRÍCOLA
Y FORESTAL



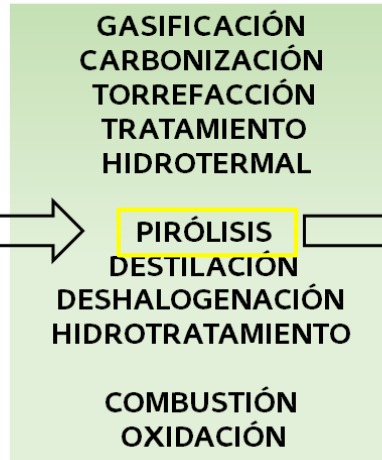
NEUMÁTICOS USADOS



RESIDUOS DE
PLÁSTICOS
REFORZADOS
CON FIBRAS



RESIDUOS ORGÁNICOS
INDUSTRIALES



MATERIAS PRIMAS SECUNDARIAS

Fibras de carbono
Carbones para electrodos
Adsorbentes carbonosos
Bio-charcoal
H₂ / Gas de síntesis

COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

Aceites de pirólisis
Combustibles gaseosos

ENERGÍA

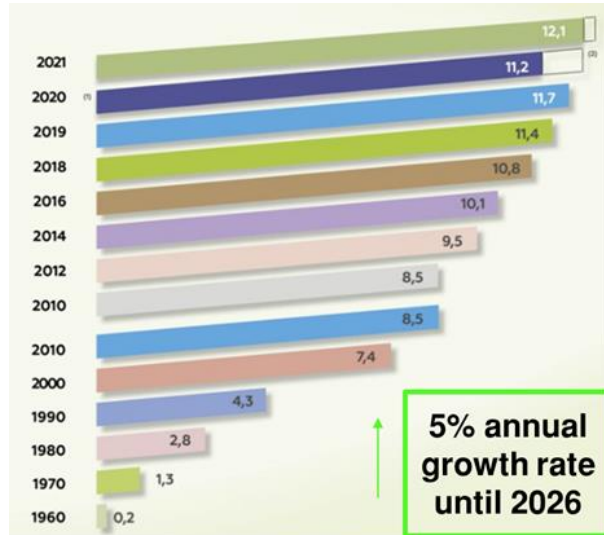
Combustión eficiente
de residuos complejos

- 1. Introducción**
- 2. Reciclado basado en pirólisis**
 - 2.1. La pirólisis
 - 2.2. Retos
- 3. Valorización de matriz plástica**
 - 3.1. Una década investigando
 - 3.2. Instalación a escala de laboratorio
 - 3.3. Resultados experimentales
 - 3.4. Líneas de trabajo actuales/futuras

1.

Introducción

Mercado global de Plásticos Reforzados con Fibras



The main industries that use composites are **transportation**

 **(23%)**,

followed by **construction**  **(19%)**,

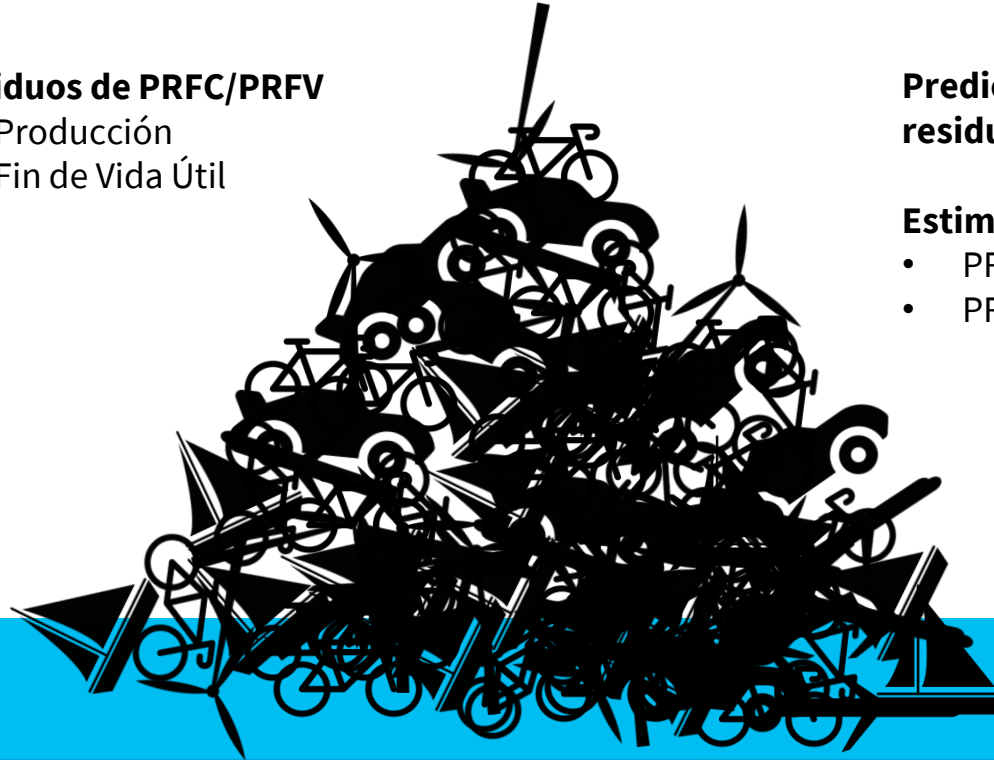
electronics and electrical  **(17%)**,

and **energy**  **(14%)**



Residuos de PRFC/PRFV

- Producción
- Fin de Vida Útil



Predicción de generación de residuos compleja.

Estimaciones para la UE:

- PRFC: x2 en los últimos 10 años
- PRFV: x2 de cara a 2034

PRFC/PRFV: Plástico Reforzado con Fibra de Carbono/Vidrio

Principales focos de generación residuos de PRFC/PRFV en ESPAÑA



PRFC/PRFV: Plástico Reforzado con Fibra de Carbono/Vidrio

Palas de aerogeneradores



Plan de Acción de Economía Circular 2021-2023

*Necesidad de financiar
proyectos de I+D+i
**soluciones de economía
circular para las palas de
aerogeneradores.***

Palas de aerogeneradores



Plan de Acción de Economía Circular 2021-2023

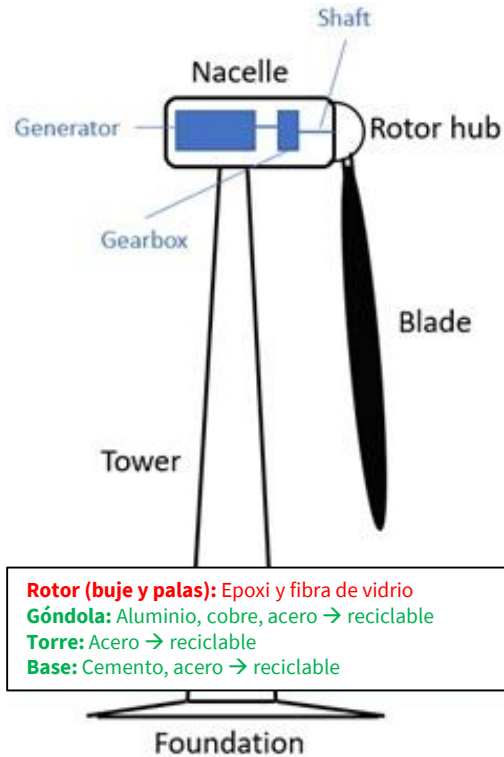
Necesidad de financiar proyectos de I+D+i soluciones de economía circular para las palas de aerogeneradores.

Volumen (en toneladas) de palas con potencial de ser desmantelados por repotenciaciones y fin de vida entre 2021 y 2025 desagregados por su vida de operación (Fuente: AEE)

Edad	2021	2022	2023	2024	2025	Total
>20 Años	15.348	4.014	2.815	1.121	1.842	
20 Años	8.028	5.631	2.242	3.684	2.274	
19 Años	11.261	4.485	7.368	4.547	3.243	
18 Años	8.969	14.736	9.094	6.485	15.365	
17 Años	19.649	12.126	8.647	20.487	9.196	
16 Años	16.168	11.529	27.316	12.261	19.176	
15 Años	15.372	36.421	16.348	25.568	16.250	
Ton Palas	42.275	31.459	25.245	23.058	23.438	145.475

Asociación Empresarial Eólica, Economía Circular en el Sector Eólico, Palas de Aerogeneradores 2021

1. Introducción



Rotor (bujes y palas): Epoxi y fibra de vidrio
Góndola: Aluminio, cobre, acero → reciclable
Torre: Acero → reciclable
Base: Cemento, acero → reciclable



Hub: cast iron, glass fibre, epoxy
Blades: glass fibre and epoxy (95%), steel (5%)



Gearbox: steel (98%), aluminium (1%), copper (1%)
Generator: steel (65%), copper (35%)
Frame, Machinery, Shell: steel (85%), aluminium (9%), copper (4%), glass reinforced plastic (3%)

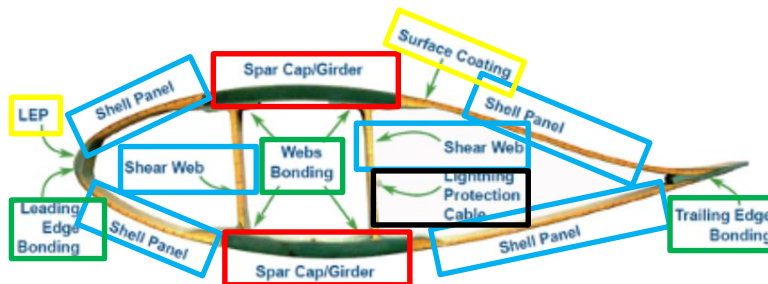


Lattice part: steel
Tubular part: steel
Transition piece: steel
Connections: steel



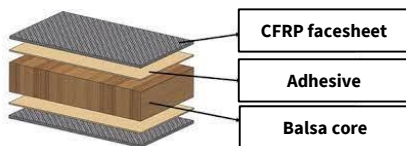
Concrete
Steel reinforcement bars

1. Introducción



RESIDUO
MONOLÍTICO
MULTIMATERIAL

ESTRUCTURA SANDWICH



Spar Caps/Girders: Unidirectional (UD) Glass/Carbonfibre, supported by Epoxy, Polyester, Polyutherane or Vinylester matrix

Shear Webs and Shell Panels: Multiaxial GFRP Sandwich laminates using Balsa/PVC/PET as core material and Epoxy, Polyester, Polyutherane or Vinylester as matrix systems

Leading/Trailing Edge and Webs Bonding: Epoxy/Polyutherane based structural adhesive

Lightning Protection Cable: Aluminium or Copper

Surface Coating: Polyutherane based lacquer

LEP (Leading Edge Protection): Polyutherane based lacquer/tape

Source: TPI Composites

Palas de aerogeneradores



Plan de Acción de Economía Circular 2021-2023

Necesidad de financiar proyectos de I+D+i soluciones de economía circular para las palas de aerogeneradores.

Embarcaciones de recreo



Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022

Presentan una dificultad importante en la gestión de los **plásticos reforzados con fibras**, que pueden llegar a representar **más del 80 % en peso**.

Palas de aerogeneradores



Plan de Acción de Economía Circular 2021-2023

Necesidad de financiar proyectos de I+D+i soluciones de economía circular para las palas de aerogeneradores.

Embarcaciones de recreo



Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022

Presentan una dificultad importante en la gestión de los **plásticos reforzados con fibras**, que pueden llegar a representar **más del 80 % en peso**.

Automóviles en masa



Real Decreto 265/2021, de 13 de abril, sobre los vehículos al final de su vida útil

El % total de preparación para la **reutilización y reciclado será al menos del 85 % del peso** medio por automóvil y año.

Nuevos desarrollos

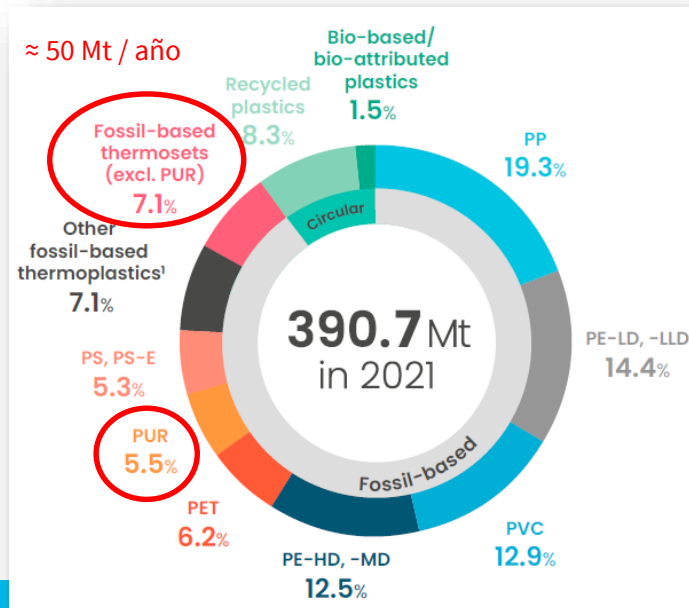
- Resinas reciclables: termoplásticas, vitrímeras...
- Resinas bio-basadas
- Fibras naturales
- ...

Nuevos desarrollos

- Resinas reciclables: termoplásticas, vitrímeras...
- Resinas bio-basadas
- Fibras naturales
- ...

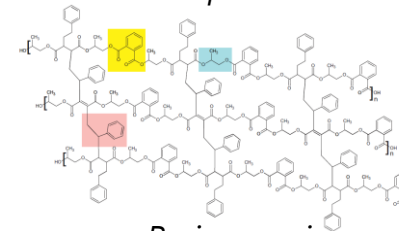
**También necesitamos procesos de reciclaje que
gestionen los residuos pasados y actuales**

1. Introducción

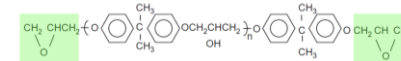


Resinas más comunes

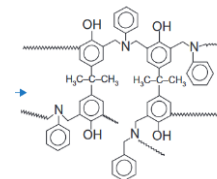
Resina poliéster



Resina epoxi

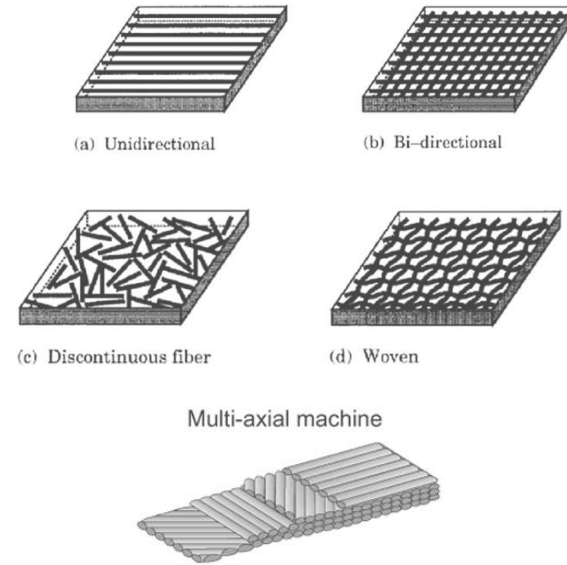
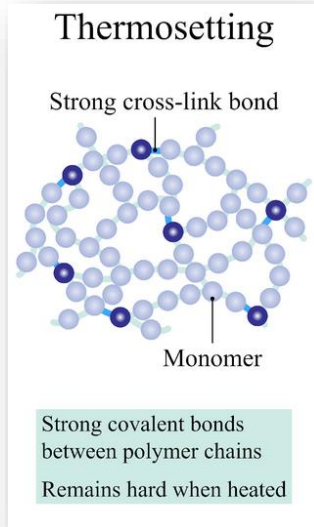


Resina polibenzoxazina



viniléster, otras fenólicas,
poliuretano...

Reciclado mecánico
basado en
fusión y remodelado



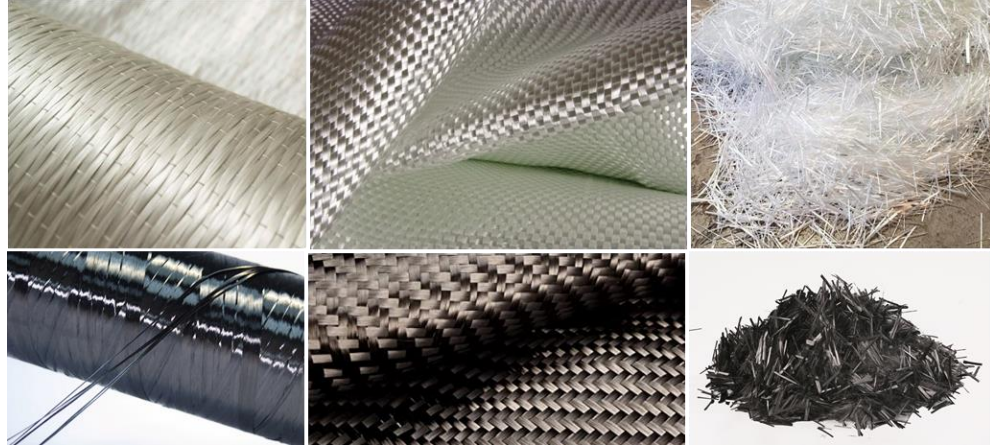
Ausencia de legislación específica para el reciclado de residuos plásticos reforzados con fibras.

Fibras de vidrio
(>76 %)

Fibras de carbono
(19 %)



TRACTOR PRINCIAL: fibra virgen de mayor coste de fabricación → competitividad de fibra reciclada.



2.

Reciclado basado en pirólisis

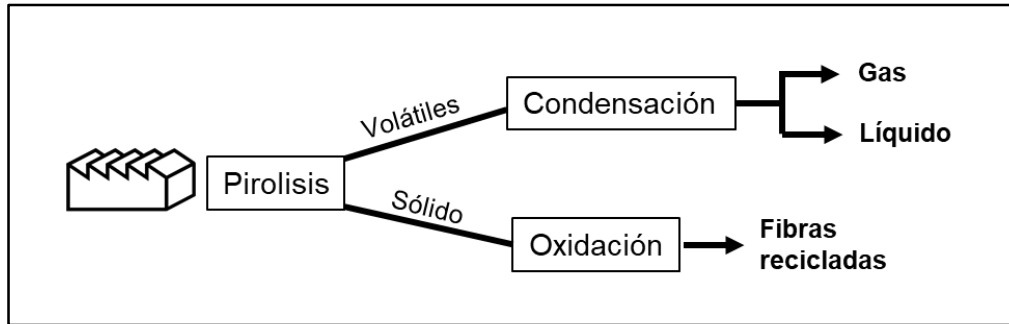
2. Reciclado basado en pirólisis

Pirólisis

Pyro = “Fuego”, “Calor”

Lysis = “Rotura”, “Destrucción”

- Utilización del calor para el craqueo (cracking, rotura) de las cadenas carbonosas.



Proceso térmico
($300\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) sin
alimentación de
aire/oxígeno en el que
los residuos son
convertidos en
productos gaseosos,
líquidos y sólidos.

2. Reciclado basado en pirólisis

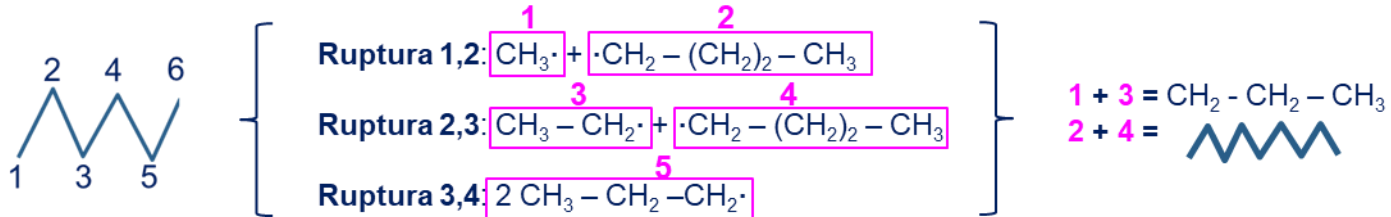
Pirólisis



Pyro = “Fuego”, “Calor”

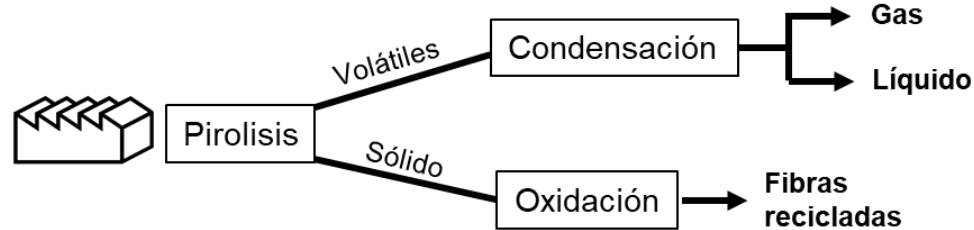
Lysis = “Rotura”, “Destrucción”

- **Utilización del calor para el craqueo (cracking, rotura) de las cadenas carbonosas.**
- **Proceso endotérmico y de baja selectividad:** lo que se rompe a una temperatura determinada depende de la energía de enlace y en muchos polímeros sucede de forma aleatoria.

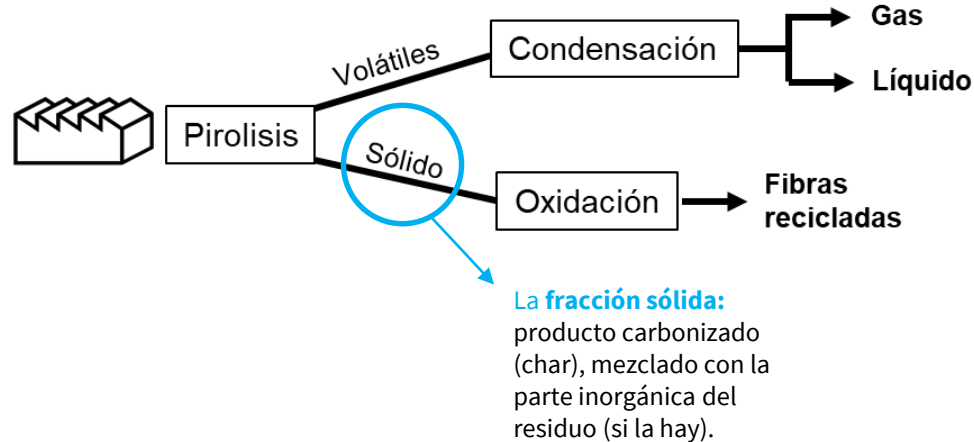


2. 1. Pirólisis

El producto principal del proceso puede ser cualquiera de las tres fracciones (gas, líquido y sólido), **en función de la materia prima y los parámetros de operación.**

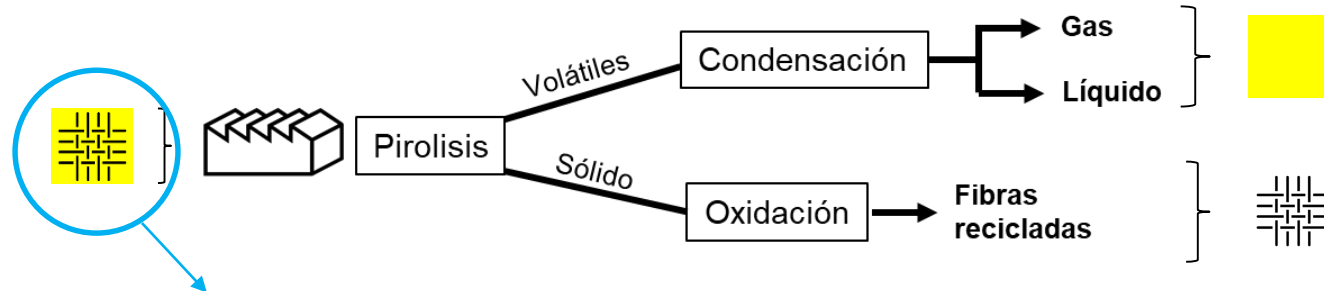


El producto principal del proceso puede ser cualquiera de las tres fracciones (gas, líquido y sólido), **en función de la materia prima y los parámetros de operación.**



2. 1. Pirólisis

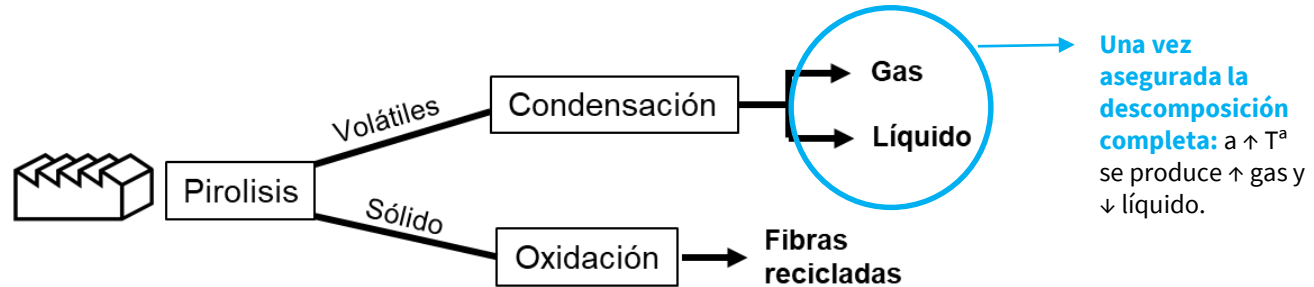
El producto principal del proceso puede ser cualquiera de las tres fracciones (gas, líquido y sólido), **en función de la materia prima y los parámetros de operación.**



Si hay componentes con ΔT descomposición $\approx 200^\circ\text{C}$: se puede utilizar esta técnica para separarlos

2. 1. Pirólisis

El producto principal del proceso puede ser cualquiera de las tres fracciones (gas, líquido y sólido), **en función de la materia prima y los parámetros de operación.**

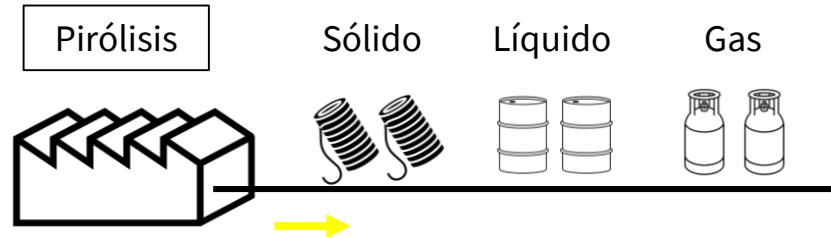


2. 1. Pirólisis



Residuos: plásticos reforzados con fibras
Tecnología de reciclado: pirólisis
TRL (Technology Readiness Level) $\approx$ 8

Madurez tecnológica, robustez y flexibilidad
Tratamiento de residuos de fin de vida útil (FdVU)



2.1. Pirólisis



EEUU



**Carbon
Conversions**
Introduces re-Evo® RRC



Reino
Unido



España



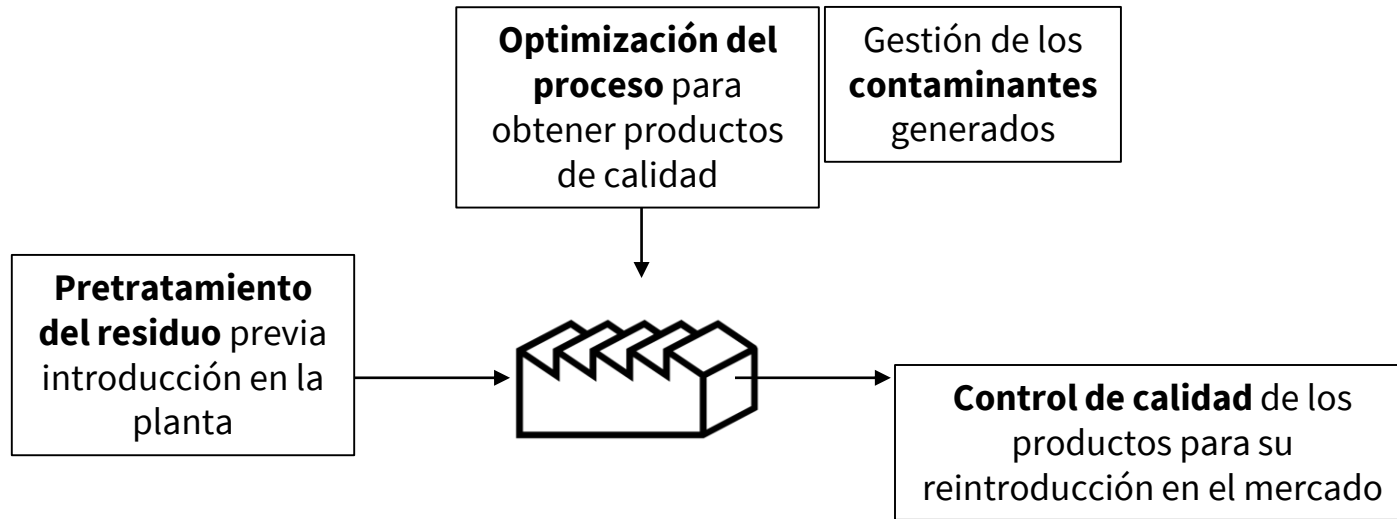
<https://www.carbonrivers.com/>
<https://carbonconversions.com/>

<https://www.gen2carbon.com/>

<https://reciclaliacomposite.com/>

2. Reciclado basado en pirólisis

Retos



2. 2. Retos

Regulación

Desmantelamiento

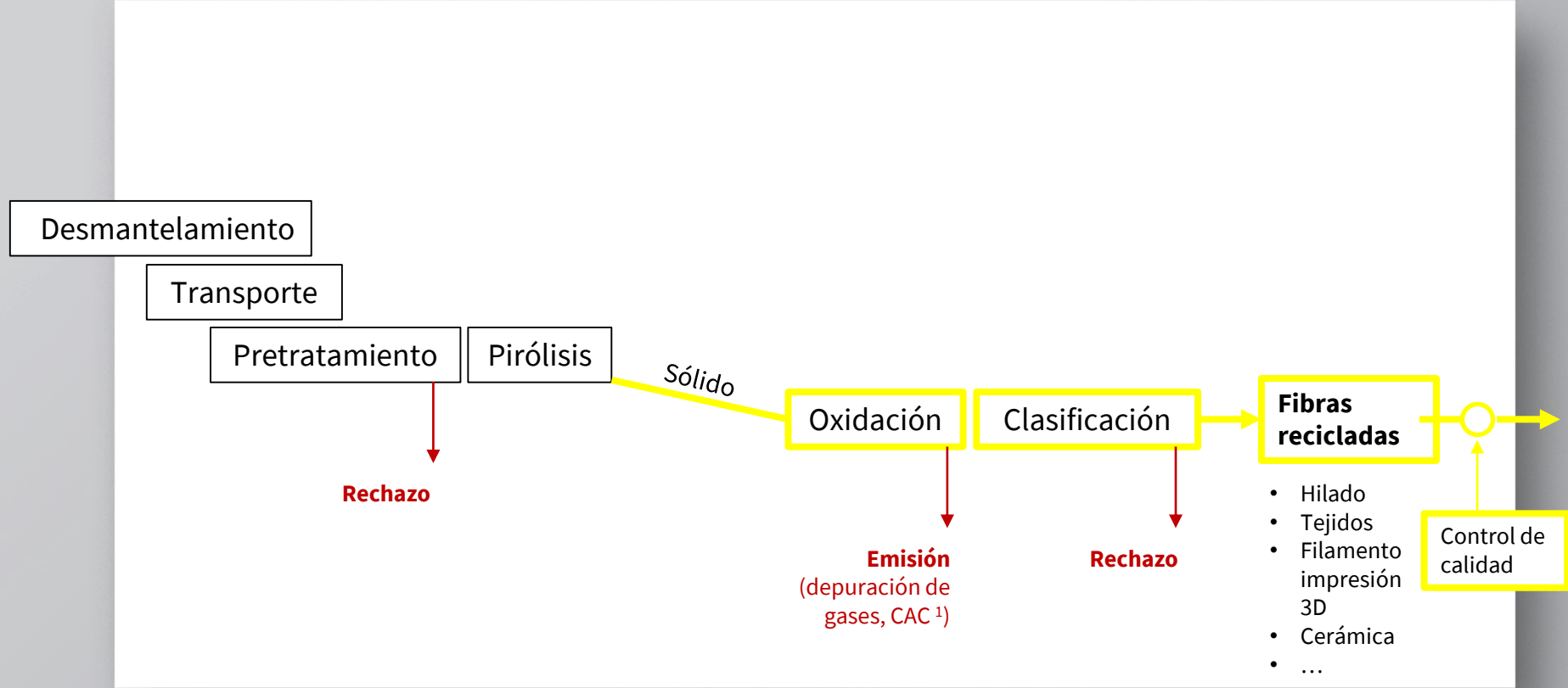
Transporte

Acondicionamiento

Recogida centralizada

Tratamiento multi-sectorial





¹ CAC: Captura y Almacenamiento de Carbono



Non-Woven



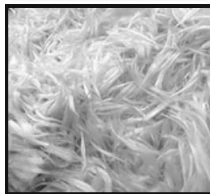
Chopped Fiber



Production of Composite Intermediates

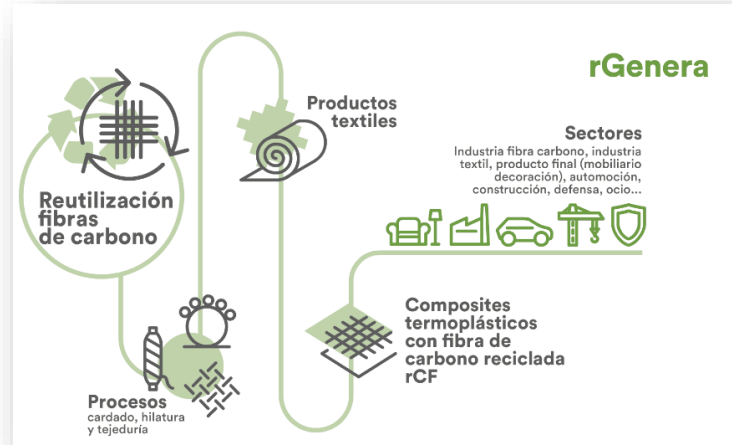
Fibras recuperadas

Productos comerciales



Fase de investigación y desarrollo

AITEX (Asociación de Investigación de la Industria Textil)

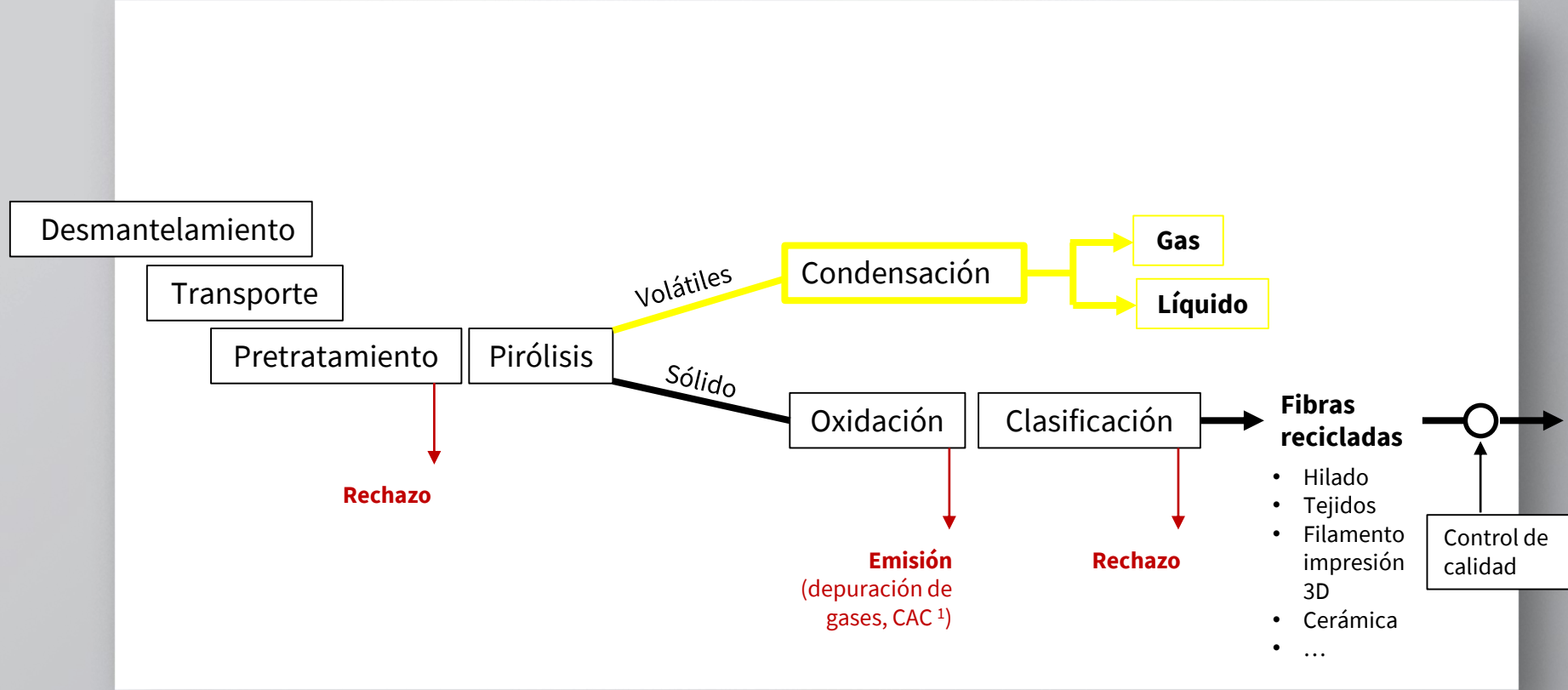


<https://www.gen2carbon.com/products/>

<https://www.carbonrivers.com/copy-of-composites-recycling>

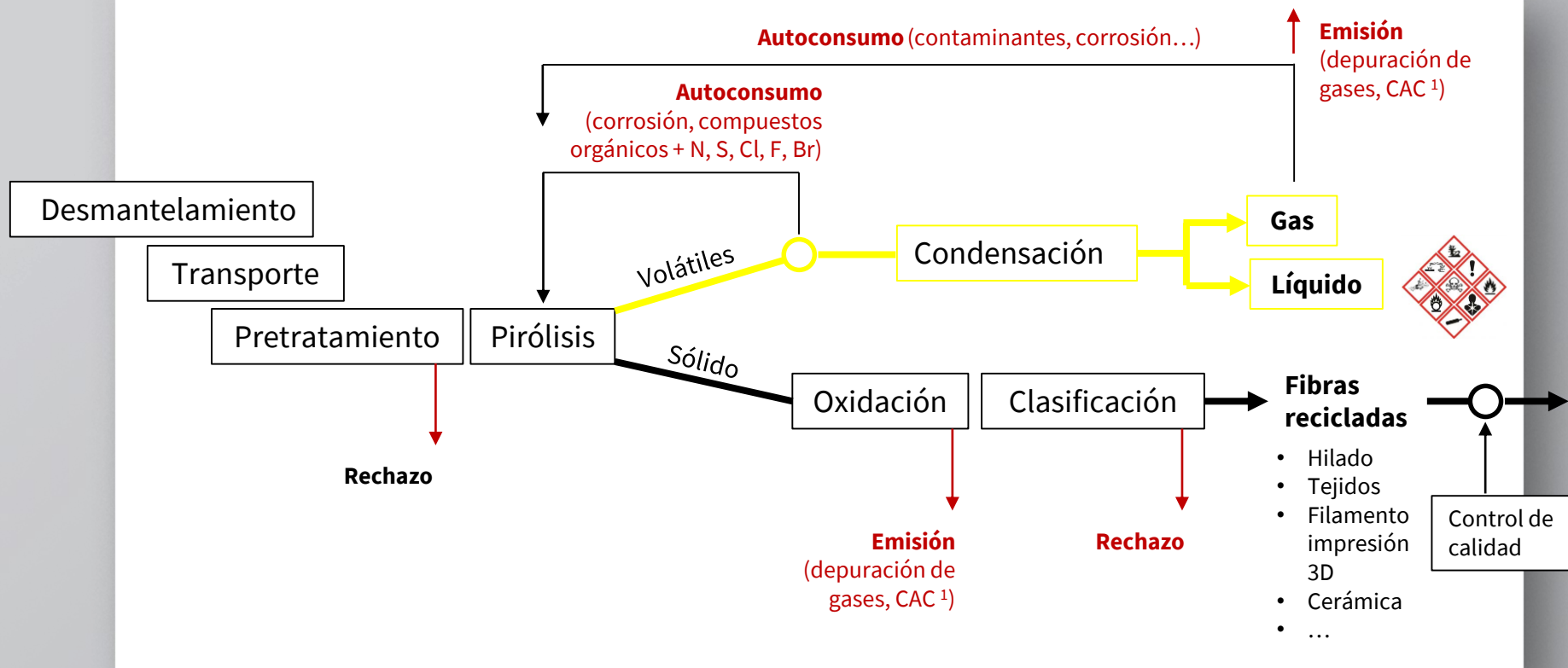
<https://www.aitex.es/portfolior/genera-reutilizacion-de-fibras-de-carbono-para-la-generacion-de-productos-textiles-destinados-a-la-fabricacion-de-composites-termoplasticos/>

2. 2. Retos



¹ CAC: Captura y Almacenamiento de Carbono

2. 2. Retos

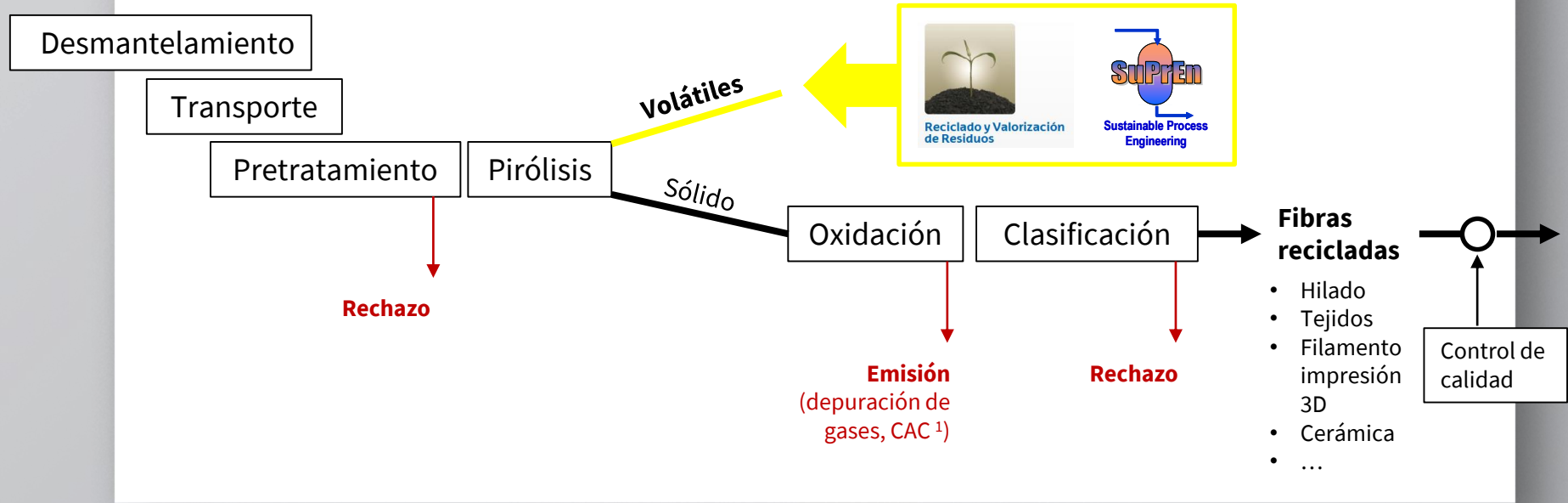


¹ CAC: Captura y Almacenamiento de Carbono

Líquidos de pirólisis



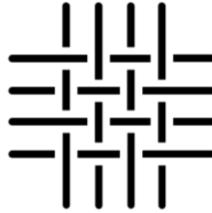
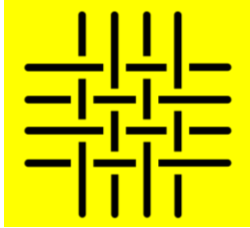
2. 2. Retos



3.

Valorización de matriz plástica

3. Valorización de matriz plástica



La matriz plástica
puede llegar a
suponer el 50 % en
peso del material
compuesto

Viabilidad del reciclado por pirólisis PRFV:

- escala de la planta
- capacidad de valorizar los compuestos químicos

WindEurope, Consejo Europeo de Federaciones de la Industria Química (CEFIC) y Asociación Europea de la Industria de Composites (EuCIA, siglas en inglés)



BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO



Núm. 270

Jueves 10 de noviembre de 2022

Sec. III. Pág. 153538

III. OTRAS DISPOSICIONES

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO

- 18449** *Orden TED/1071/2022, de 8 de noviembre, por la que se establecen las bases reguladoras para los programas de concesión de ayudas a la inversión en la repotenciación de instalaciones eólicas, en la renovación tecnológica y medioambiental de minicentrales hidroeléctricas de hasta 10 MW y en instalaciones innovadoras de reciclaje de palas de aerogeneradores, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, financiado por la Unión Europea, NextGenerationEU (Programas Repotenciación Circular).*

La pandemia provocada por la COVID-19 ha supuesto una crisis económica, social y sanitaria. La magnitud del desafío ha exigido una respuesta común a escala europea. Para dar respuesta a medio plazo, se ha puesto en marcha un ambicioso Fondo de



BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO



Núm. 270

Jueves 10 de noviembre de 2022

Sec. III. Pág. 153538

3. **Instalación innovadora de reciclaje de palas de aerogeneradores:** Nueva instalación que suponga la mejora de la calidad o eficiencia de las actividades de reciclaje de las palas -u otros componentes de los aerogeneradores que utilicen materiales compuestos- con respecto a un proceso convencional de actividades de reciclado con la misma capacidad anual de tratamiento. A este respecto, dado el estado actual de la técnica, **se utiliza como proceso convencional de referencia en España el depósito en vertedero**, salvo que la convocatoria establezca otro proceso convencional de referencia para adaptarlo a los avances tecnológicos que se hubiesen producido. Estas instalaciones podrían ser tanto proyectos comerciales como precomerciales que permitan avanzar en el desarrollo de nuevas alternativas para el reciclaje de los materiales compuestos de los aerogeneradores.

marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, financiado por la Unión Europea, NextGenerationEU (Programas Repotenciación Circular).

La pandemia provocada por la COVID-19 ha supuesto una crisis económica, social y sanitaria. La magnitud del desafío ha exigido una respuesta común a escala europea. Para dar respuesta a medio plazo, se ha puesto en marcha un ambicioso Fondo de

3. **Instalación innovadora de reciclaje de palas de aerogeneradores:** Nueva instalación que suponga la mejora de la calidad o eficiencia de las actividades de reciclaje de las palas -u otros componentes de los aerogeneradores que utilicen materiales compuestos- con respecto a un proceso convencional de actividades de reciclado con la misma capacidad anual de tratamiento. A este respecto, dado el estado actual de la técnica, se utiliza como proceso convencional de referencia en España el

c) Programa 3: Podrán ser objeto de las ayudas los proyectos de inversión en «Instalaciones innovadoras de reciclaje de palas de aerogeneradores», de acuerdo con su definición del artículo 2.

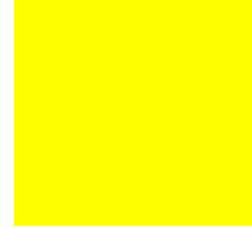
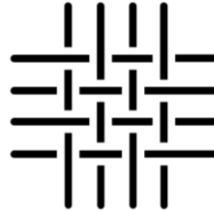
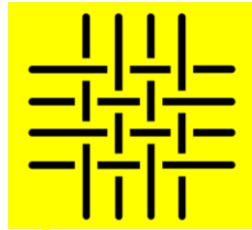
La instalación de reciclaje deberá recuperar al menos el 50 % en peso de los residuos (palas y/u otros componentes del aerogenerador que utilicen materiales compuestos) y transformarlos en materias primas secundarias que puedan introducirse en los procesos productivos.

Estos proyectos deben buscar soluciones comerciales y aplicar criterios de economía circular para el reciclaje de las palas de aerogeneradores.

cve: BOE-A-2022-18449
Verificable en <https://www.boe.es>

La pandemia provocada por la COVID-19 ha supuesto una crisis económica, social y sanitaria. La magnitud del desafío ha exigido una respuesta común a escala europea. Para dar respuesta a medio plazo, se ha puesto en marcha un ambicioso Fondo de

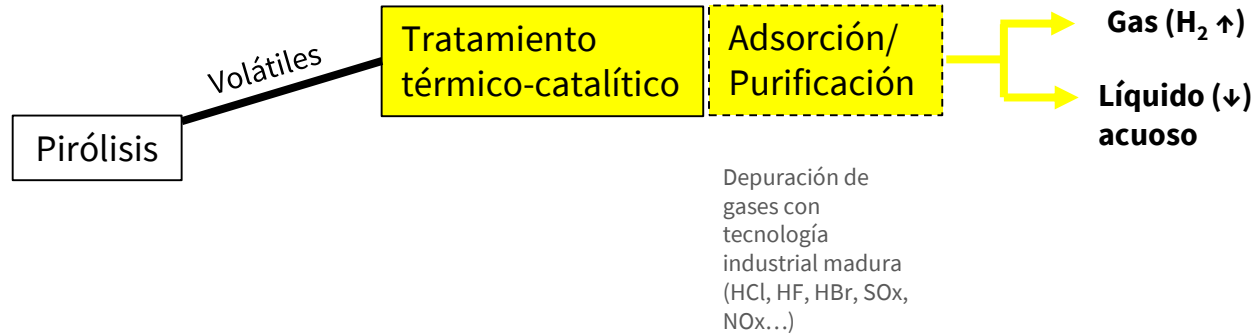
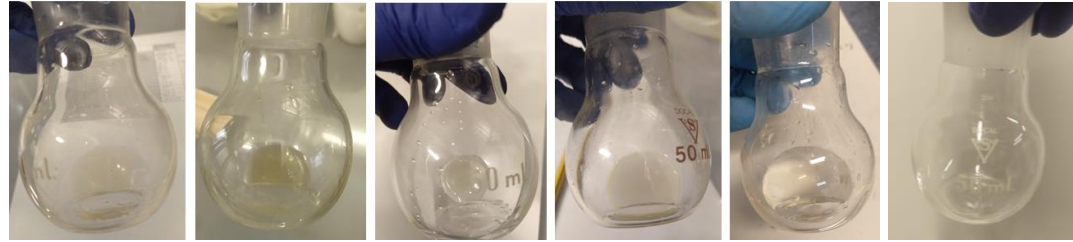
3. Valorización de matriz plástica



La matriz plástica
puede llegar a
suponer el 50 % en
peso del material
compuesto

**Necesidad de
valorizar la
resina:** hacia una
circularidad del
100 %

3. Valorización de matriz plástica



3. Valorización de matriz plástica

3.1. Una década investigando



PIROFIBER



2014

2018

TRL 2-4

Pirólisis de PRFC

Sector
aeronáutico

TRL 2-4

**Pirólisis y
tratamiento
térmico-catalítico
de volátiles de
PRFC**

Sector aeronáutico

2016

WO 2016/135359 A1

(54) **Title:** METHOD FOR TREATING VAPOURS GENERATED DURING THE PROCESS FOR RECOVERING CARBON FIBRES FROM COMPOSITES BY PYROLYSIS

(54) **Título :** METODO PARA EL TRATAMIENTO DE VAPORES GENERADOS EN EL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE FIBRAS DE CARBONO DE COMPOSITES POR PIRÓLISIS

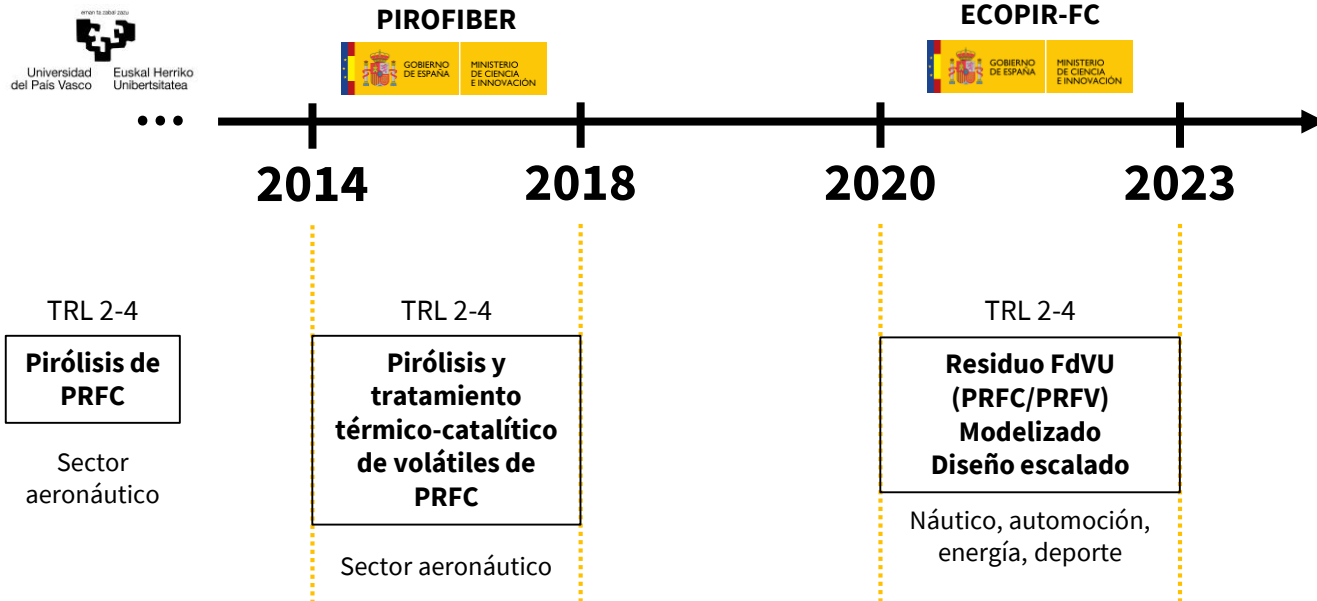
(57) **Abstract:** The invention relates to a novel method for treating vapours generated during the pyrolysis of carbon fibre composites, such as production waste generated by the producers or composites of carbon fibre at the end of the service life thereof. The treatment comprises passing the vapour through a reactor which is at a high temperature and contains a solid material filler (solid bed), for example CSI, and optionally also a solid catalyst having an acid and/or reforming function, preferably both, for example a transition metal supported on an acid substrate, such as Ni on zeolite. Following the condensation of the vapours resulting from the treatment, an improved aqueous liquid phase, a minimum or non-existent organic fraction and a gaseous phase of increased added value are obtained.

(57) **Resumen:** La invención describe un nuevo método de tratamiento de vapores generados en la pirólisis de composites de fibras de carbono, tales como residuos de producción generados por los fabricantes o composites de fibra de carbono al final de su vida útil. El tratamiento comprende hacer pasar los vapores a través de un reactor que se encuentra a alta temperatura y que contiene un relleno de un material sólido (lecho sólido), por ejemplo de CSI, y opcionalmente también un catalizador sólido que presente función ácida y/o de reformado, preferentemente ambas, por ejemplo un metal de transición soportado sobre un soporte ácido, como puede ser Ni sobre zeolita. Tras la condensación de los vapores resultantes del tratamiento se obtiene una fase líquida acuosa mejorada, una fracción orgánica mínima o inexistente y una fase gaseosa de mayor valor añadido.

PATENTED

3. Valorización de matriz plástica

3.1. Una década investigando



3. Valorización de matriz plástica

3.2. Instalación a escala de laboratorio



Cualquier residuo sólido | Presión atmosférica | Régimen semi-continuo.

3. Valorización de matriz plástica

3.2. Instalación a escala de laboratorio



2º reactor

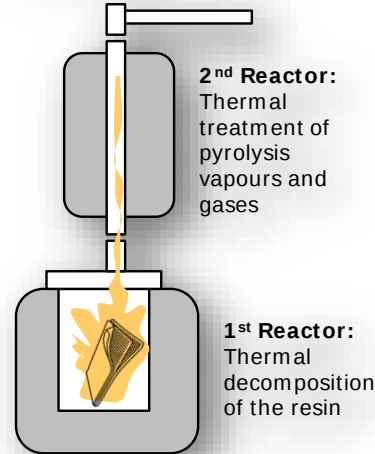
Craqueo
térmico/catalítico



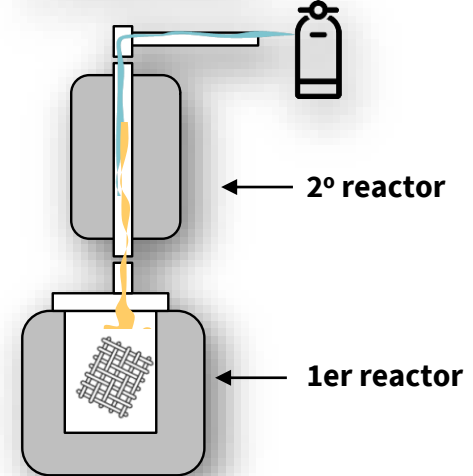
1er reactor

- ✓ Pirólisis
- ✓ Oxidación

**Thermal process:
Pyrolysis**
Two reactors in series



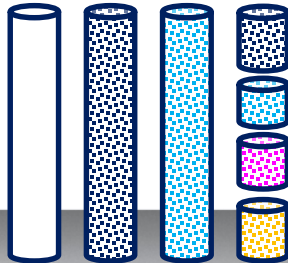
Process outcomes:
Hydrogen rich gas
Recovered carbon fibres



Reactor de lecho fijo

Fase de investigación y desarrollo

- **Operatividad** sencilla
- **Flexibilidad:** tamaño de partícula, material, configuración, temperatura...
- **Buen contacto** sólido-vapor-gas



2º reactor

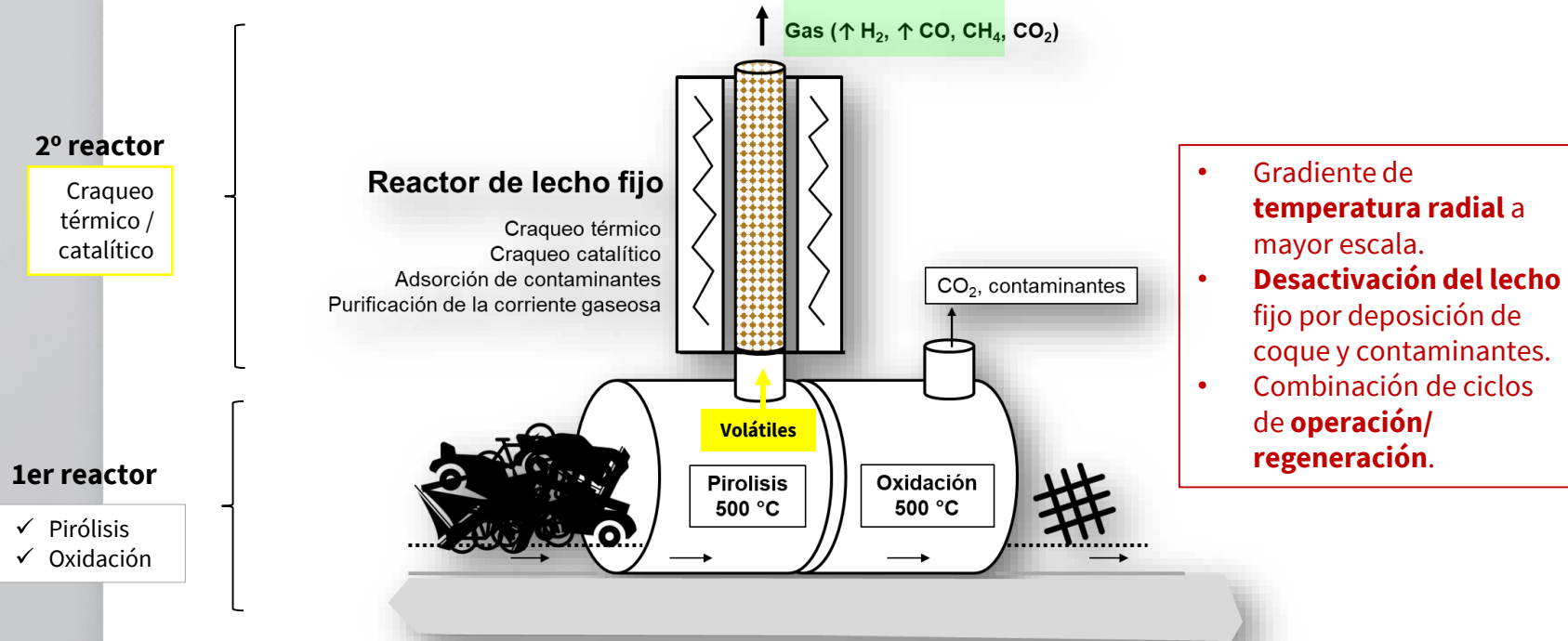
Craqueo
térmico /
catalítico

1er reactor

- ✓ Pirólisis
- ✓ Oxidación



3.2. Instalación a escala de laboratorio



3.2. Instalación a escala de laboratorio

Escalado y repetición

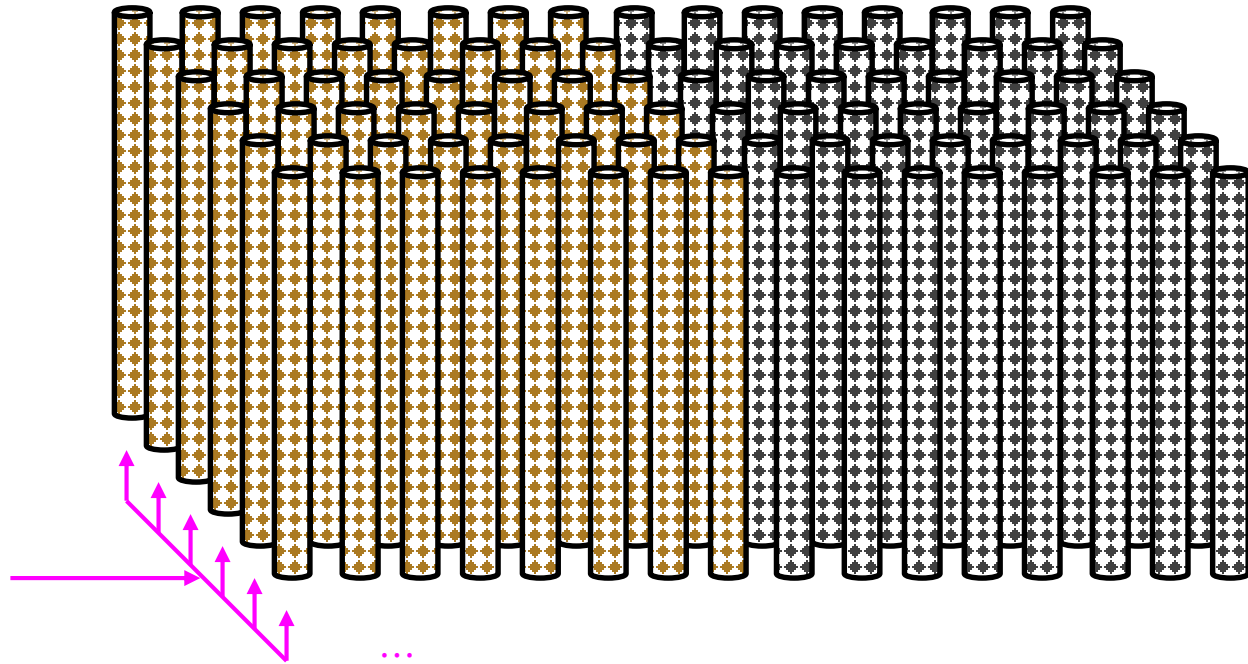
2º reactor

Craqueo
térmico /
catalítico

Volátiles

Tratamiento

Regeneración



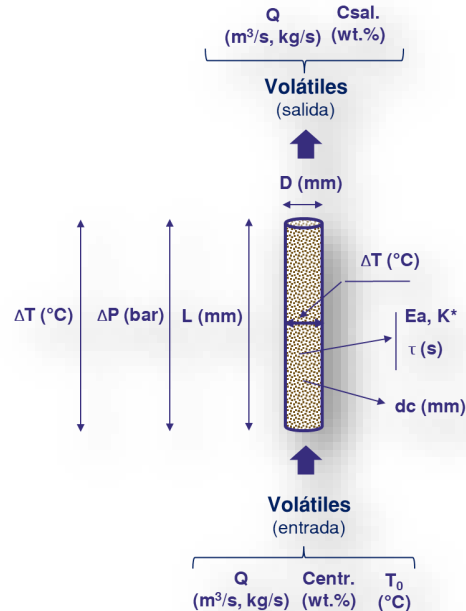
3. Valorización de matriz plástica

3.3. Resultados experimentales

Reactor de lecho fijo

2º reactor

Craqueo
térmico /
catalítico

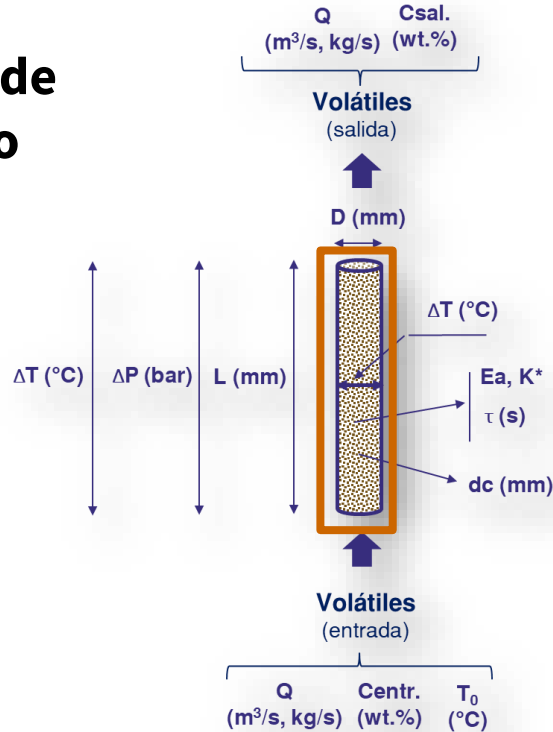


Parámetros estudiados

1. Material del lecho
2. Tamaño de partícula (dc)
3. Material adsorbente/catalítico
4. ΔT longitudinal
5. Tipo de residuo

3.3. Resultados experimentales

Reactor de lecho fijo



1. Material del lecho

- Carburo de Silicio
- Refractario
- Coque metalúrgico

2. Tamaño de partícula (dc)

- $1.5 \text{ mm} < x < 2 \text{ mm}$
- $0.5 \text{ mm} < x < 1 \text{ mm}$

3. Material adsorbente/catalítico

- Catalizador de reformado
- ZSM-5 CBV 5524G

4. ΔT longitudinal

- 700°C
- 900°C

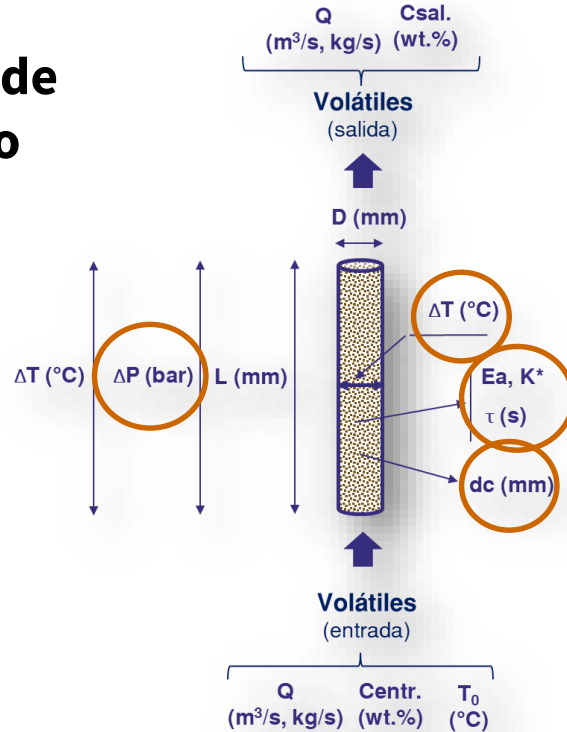
5. Tipo de residuo

- Polibenzoxazina + FC
- Epoxi + FC

$L = \text{cte}$ | $D = \text{cte}$ | Alimentación: por lotes

3.3. Resultados experimentales

Reactor de lecho fijo



1. Material del lecho

- Carburo de Silicio
- Refractario
- Coque metalúrgico

2. Tamaño de partícula (dc)

- $1.5 \text{ mm} < x < 2 \text{ mm}$
- $0.5 \text{ mm} < x < 1 \text{ mm}$

3. Material adsorbente/catalítico

- Catalizador de reformado
- ZSM-5 CBV 5524G

4. ΔT longitudinal

- $700^{\circ}C$
- $900^{\circ}C$

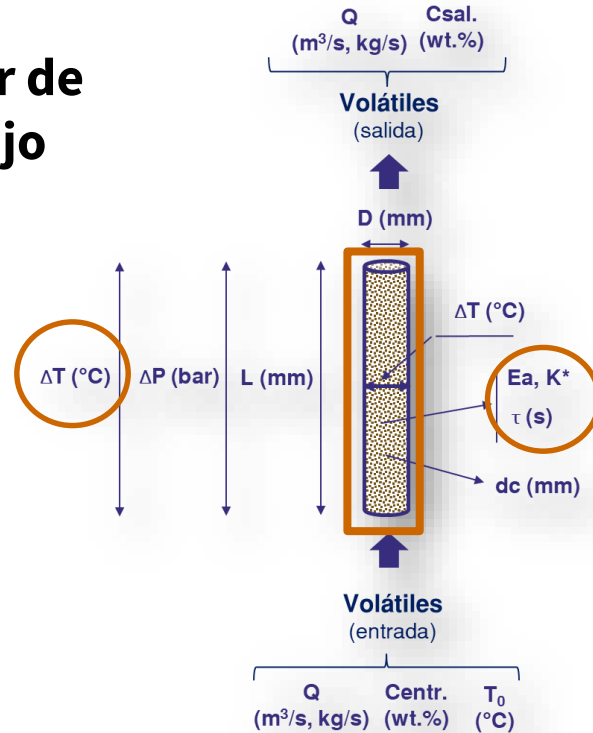
5. Tipo de residuo

- Polibenzoxazina + FC
- Epoxi + FC

$L = \text{cte}$ | $D = \text{cte}$ | Alimentación: por lotes

3.3. Resultados experimentales

Reactor de lecho fijo



1. Material del lecho

- Carburo de Silicio
- Refractario
- Coque metalúrgico

2. Tamaño de partícula (dc)

- $1.5 \text{ mm} < x < 2 \text{ mm}$
- $0.5 \text{ mm} < x < 1 \text{ mm}$

3. Material adsorbente/catalítico

- **Catalizador de reformado**
- **ZSM-5 CBV 5524G**

4. ΔT longitudinal

- 700°C
- 900°C

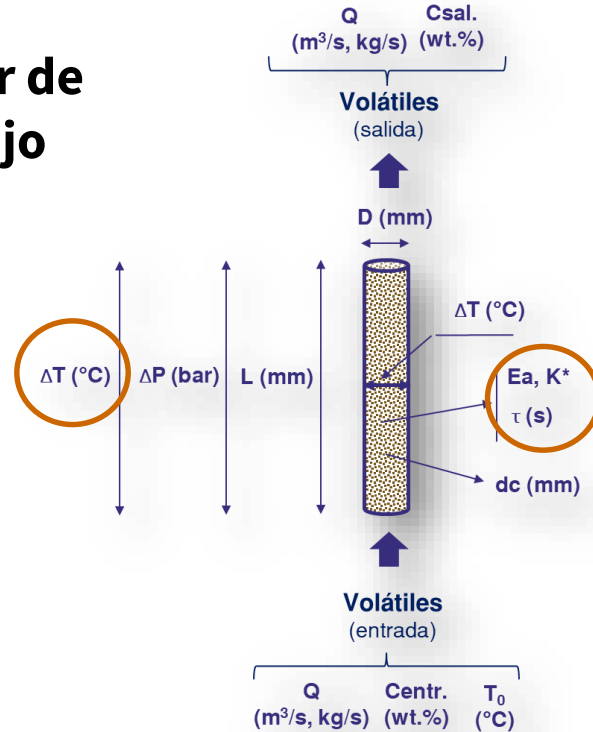
5. Tipo de residuo

- Polibenzoxazina + FC
- Epoxi + FC

$L = \text{cte}$ | $D = \text{cte}$ | Alimentación: por lotes

3.3. Resultados experimentales

Reactor de lecho fijo



1. Material del lecho

- Carburo de Silicio
- Refractorio
- Coque metalúrgico

2. Tamaño de partícula (d_c)

- $1.5 \text{ mm} < x < 2 \text{ mm}$
- $0.5 \text{ mm} < x < 1 \text{ mm}$

3. Material adsorbente/catalítico

- Catalizador de reformado
- ZSM-5 CBV 5524G

4. ΔT longitudinal

- **700 °C**
- **900 °C**

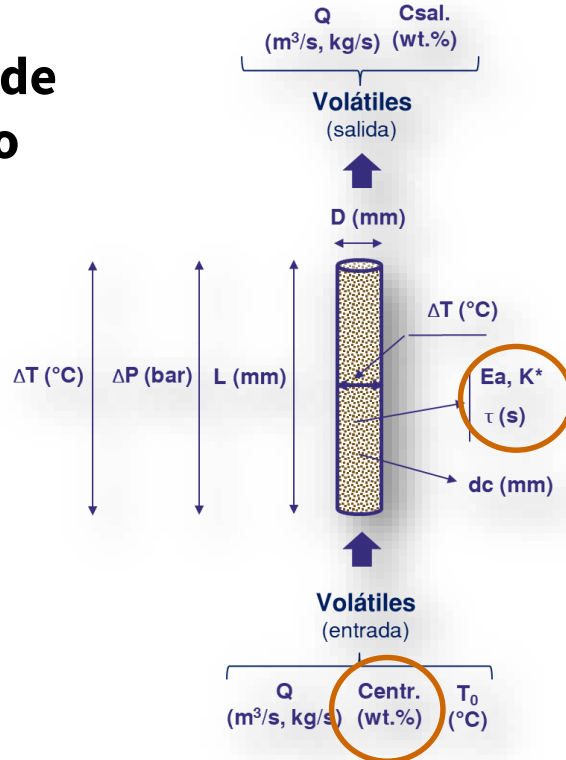
5. Tipo de residuo

- Polibenzoxazina + FC
- Epoxi + FC

L = cte | D = cte | Alimentación: por lotes

3.3. Resultados experimentales

Reactor de lecho fijo



1. Material del lecho

- Carburo de Silicio
- Refractario
- Coque metalúrgico

2. Tamaño de partícula (dc)

- $1.5 \text{ mm} < x < 2 \text{ mm}$
- $0.5 \text{ mm} < x < 1 \text{ mm}$

3. Material adsorbente/catalítico

- Catalizador de reformado
- ZSM-5 CBV 5524G

4. ΔT longitudinal

- 700°C
- 900°C

5. Tipo de residuo

- Polibenzoxazina + FC
- Epoxi + FC

$L = \text{cte}$ | $D = \text{cte}$ | Alimentación: por lotes

3. Valorización de matriz plástica

3.3. Resultados experimentales



3. Valorización de matriz plástica

3.3. Resultados experimentales



Residuo: pre-preg compuesto por resina polibenzoxazina y fibras de carbono



Cantidad de gas
generada (%peso) y
contenido en
hidrógeno (%vol.)

Objetivo 1: variables de proceso

- Sólo pirólisis (15 °C/min)
- Sólo pirólisis (3 °C/min)
- Pirólisis + tratamiento térmico severo (900 °C) sobre lecho de CSi (1.5 mm < x < 2 mm)
- Pirólisis + tratamiento térmico-catalítico severo (900 °C) sobre lecho de CSi (1.5 mm < x < 2 mm)
- Pirólisis + tratamiento térmico severo (900 °C) sobre lecho de CSi (0.5 mm < x < 1 mm)

Objetivo 2: material del lecho

- Pirólisis + tratamiento térmico severo (900 °C) sobre lecho de coque (1.5 mm < x < 2 mm)
- Pirólisis + tratamiento térmico severo (900 °C) sobre lecho de refractario (1.5 mm < x < 2 mm)

3.3. Resultados experimentales

Polibenzoxazina
Toray T300/3K



ASTM D3171 ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$)

	CFRP Waste	CF
Fiber content	61.0	100.0

Proximate analysis

Moisture	0.5	0.0
Volatiles	28.4	6.2
Fixed carbon ¹	71.0	93.8
Ash	0.1	0.0

Carbono fijo → fibras de carbono
Materia volátil → resina

Elemental analysis

C	86.2	95.7
H	2.2	0.1
N	4.8	2.8
S	1.3	0.1
Cl	u.d.l. ²	u.d.l. ²
Others ³	4.9	1.3

¹ = by difference; ² = under detection level (<0.1 wt.%); ³ = others, defined as $100 - (\text{C} + \text{H} + \text{N} + \text{S} + \text{Moisture} + \text{Ash})$.

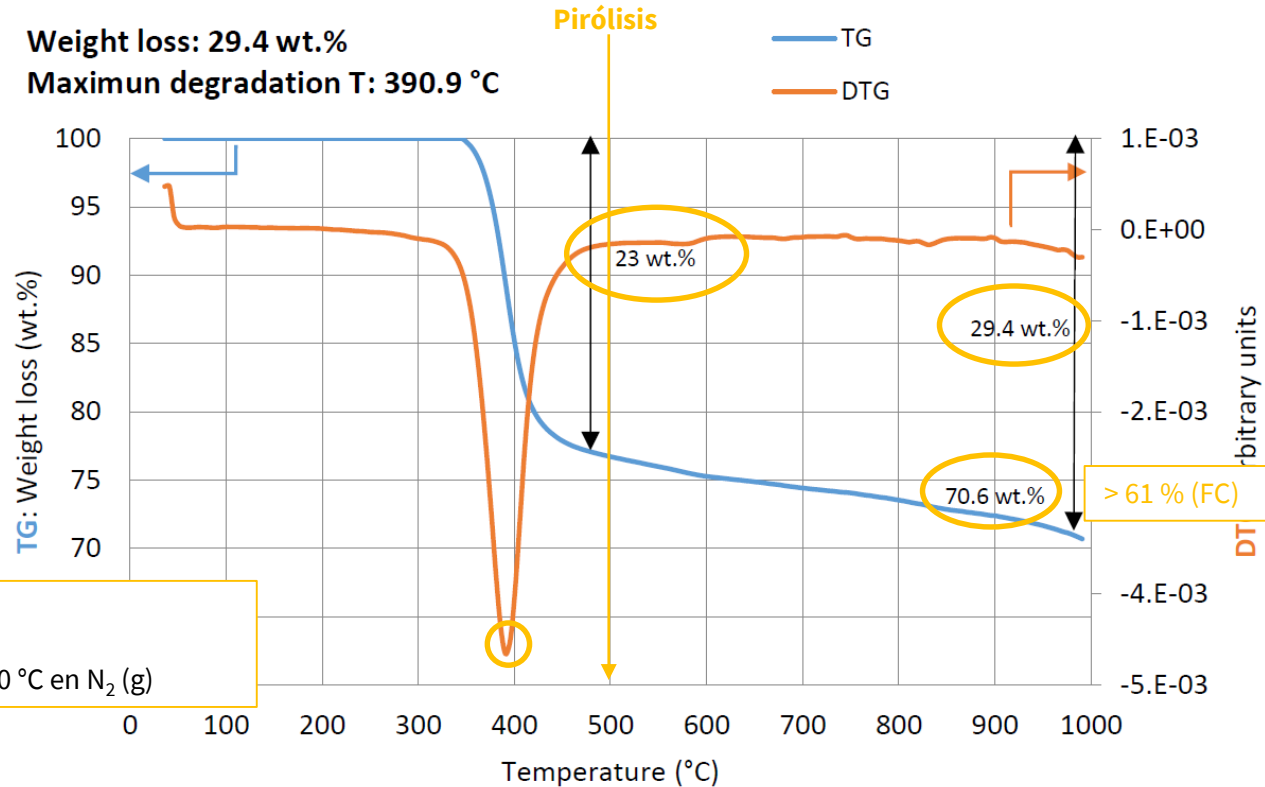
Resina (fenoles, aminos, formaldehído): H, N, O
Agentes reticulantes: S

3.3. Resultados experimentales

Polibenzoxazina
Toray T300/3K



Material carbonoso
Ensimaje ($\approx 1\%$)
FC estables hasta 1000°C en N_2 (g)



3. Valorización de matriz plástica

3.3. Resultados experimentales



Objetivo 1: estudio de las variables del proceso

Polibenzoxazina
Toray T300/3K



100 g
20 cm x 2 cm

Pirólisis

- 500 °C
- 3 °C/min
 - 15 °C/min
- Isoterma:
- 30 minutos
- Flujo de nitrógeno:
- 1 L/min
- Alimentación: lotes

Tratamiento de volátiles

Temperatura de tratamiento

- 900 °C

Material del lecho

- Carburo de Silicio

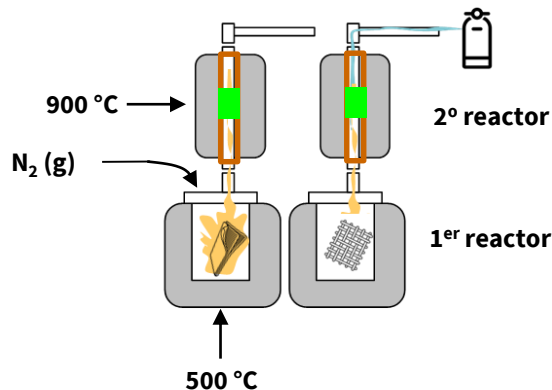


Tamaño de partícula (dc)

- 1.5 mm < x < 2 mm
- 0.5 mm < x < 1 mm

Catalizadores

- De reformado
- ZSM-5 CBV 5524G



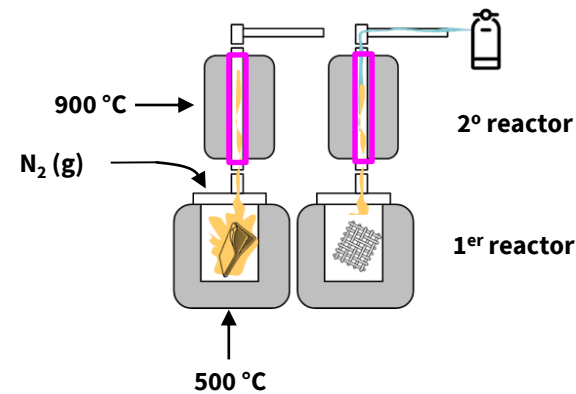
3.3. Resultados experimentales



Carburo de silicio (CSi)
Navarrosic S.A.

- Buena conductividad térmica
- Estabilidad alta
- Ampliamente utilizado
- Fluido-dinámica mejorada
- Transferencia de calor mejorada

	 CSi
Surface area ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	0.085
Pore volume ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	$4.18 \cdot 10^{-4}$
Pore diameter ($\text{\AA}$)	34.8



3.3. Resultados experimentales



Catalizador comercial de reformado

- Procesos industriales de reformado: gas natural, hidrocarburos ligeros, corrientes gaseosas ricas en H_2
- Óxido de níquel no alcalinizado (NiO 16 % en peso = Ni 12.6 % en peso) en un soporte CaO/Al_2O_3
- Utilizado “as received” = tal y como se recibió



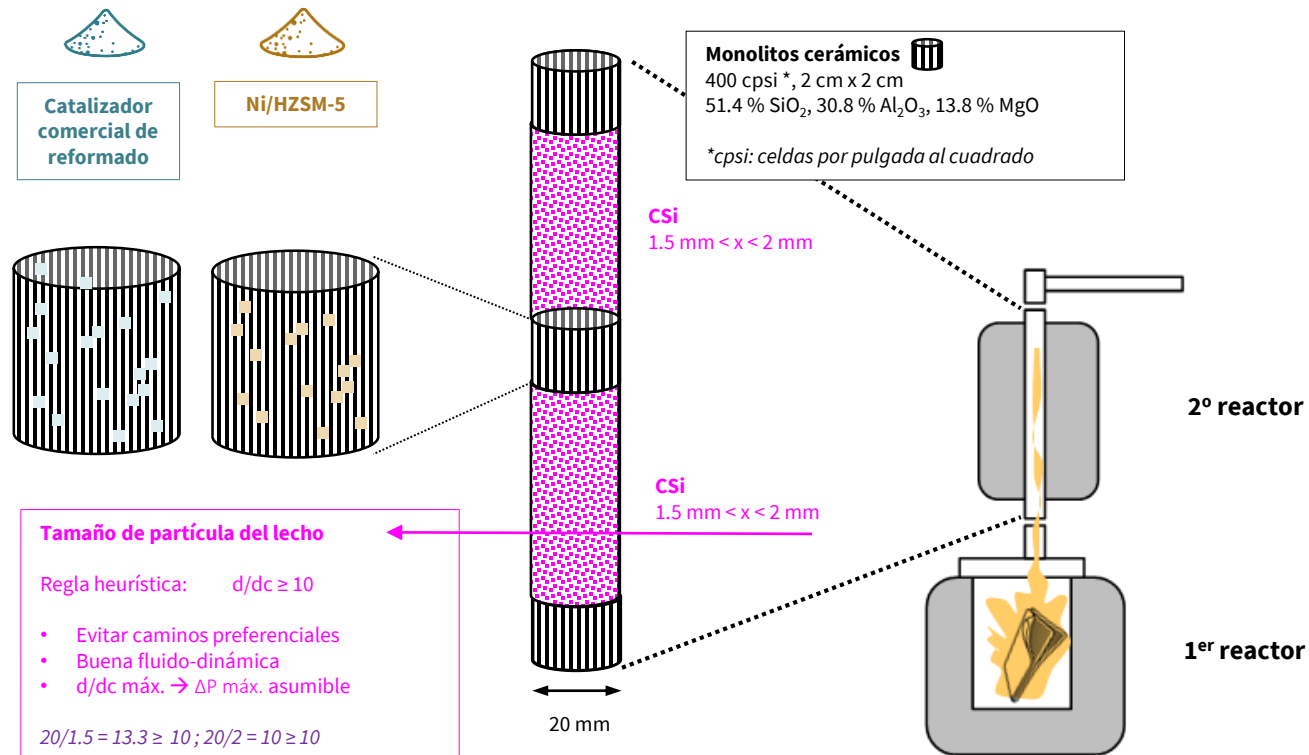
Zeolita comercial (ZSM-5) modificada con níquel

- Zeolist international. Producto: CBV 5524G
- Ratio SiO_2/Al_2O_3 (molar) = 57.3 : 1
- Oxidación a 500 °C. Forma catiónica: $NH_4^+ \rightarrow H^+$
- Método de impregnación por vía húmeda: 13 % en peso de Ni



Property	Reforming Catalyst	Ni/HZSM-5
BET surface area (m^2/g)	29.0	273.9
Total pore volume (cm^3/g)	0.1312	0.3887
Average pore diameter (Å)	179.3	70.7
Measured Ni content (wt.%)	12.5	11.0
Ni crystal size (nm)	5.0	4.5
Main reduction peak temperature (°C)	≈700	≈350
Total acidity (mmol NH_3/g cat)	0.205	0.471

3.3. Resultados experimentales



3.3. Resultados experimentales



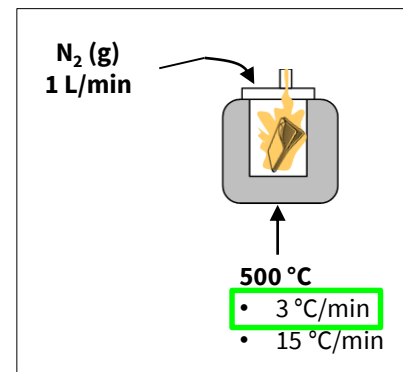
ID	1	2
Rampa de calentamiento (°C/min)	15	3
Tto de volátiles	No	No
Material del lecho	-	-
Tamaño de partícula	-	-
Catalizador	-	-

Rendimientos

Sólidos	74.8	76.9
Condensados totales	20.2	16.5
Líquidos recolectados	10.4	4.4
Fase acuosa	66.5	43.8
Fase orgánica	33.5	56.2
Gases	5.0	6.6

Velocidad de calentamiento

- ↑ Velocidad (15 °C/min)
- ↑ Líquidos recolectados
 - ↓ Gas recolectado



1^{er} reactor

3.3. Resultados experimentales

ID	1	2
Rampa de calentamiento (°C/min)	15	3
Tratamiento de volátiles (900 °C)	No	No
Material del lecho	-	-
Tamaño de partícula	-	-
Catalizador	-	-

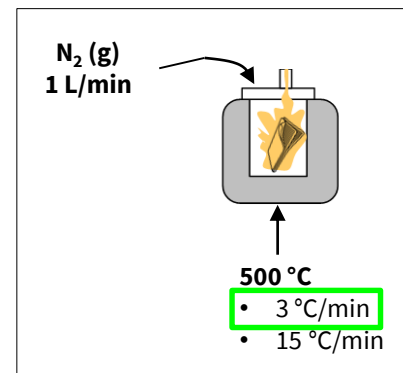
Composición de gas (vol.%)

H ₂	18.6	n.d.
CO	14.4	n.d.
CO ₂	21.8	35.0
CH ₄	34.2	64.1
C2	3.7	n.d.
C3	n.d.	n.d.
C4	n.d.	n.d.
C5	n.d.	n.d.
C6	7.2	0.8
PCS (MJ/Nm ³)	30.0	24.6

Composición de gas
en base seca y libre
de O₂ y N₂

Velocidad de calentamiento

- ↑ Velocidad (15 °C/min)
- ↑ Líquidos recolectados
 - ↓ Gas recolectado



1^{er} reactor

3.3. Resultados

ID	2	3
Rampa de calentamiento (°C/min)	3	3
Tratamiento de volátiles (900 °C)	No	Sí
Material del lecho	-	CSi
Tamaño de partícula	-	$1.5 < x < 2 \text{ mm}$
Catalizador	-	-

Rendimientos

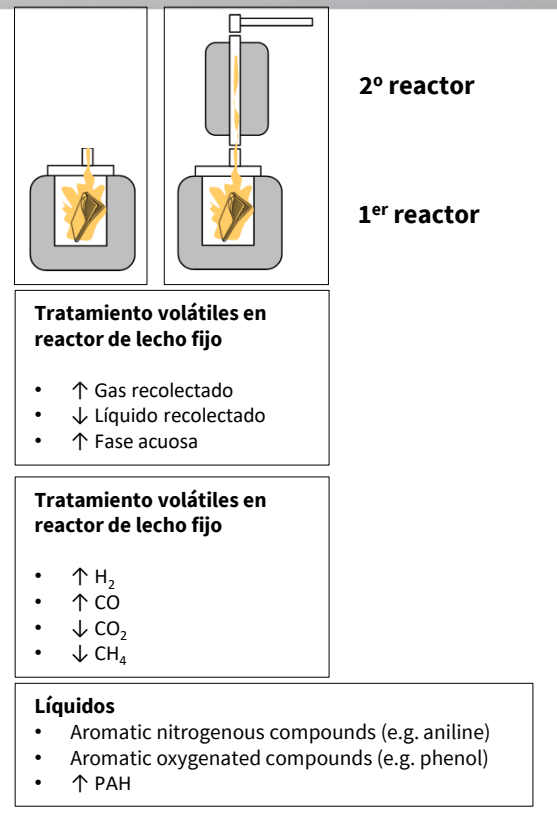
Sólidos	76.9	75.2
Condensados totales	16.5	10.5
Líquidos recolectados	4.4	1.4
Fase acuosa	43.8	72.4
Fase organica	56.2	27.6
Gases	6.6	14.3

Composición de gas (vol.%)

H ₂	n.d.	43.4
CO	n.d.	12.9
CO ₂	35.0	5.9
CH ₄	64.1	24.7
C2	n.d.	6.7
C3	n.d.	0.4
C4	n.d.	n.d.
C5	n.d.	0.1
C6	0.8	6.0
PCS (MJ/Nm ³)	24.6	29.6

Composición de gas
en base seca y libre
de O₂ y N₂

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.05.011>
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.05.011>



3.3. Resultados

ID	3	4	5
Rampa de calentamiento (°C/min)	3	3	3
Tratamiento de volátiles (900 °C)	Sí	Sí	Sí
Material del lecho	CSi	CSi	CSi
Tamaño de partícula	$1.5 < x < 2 \text{ mm}$	$1.5 < x < 2 \text{ mm}$	$1.5 < x < 2 \text{ mm}$
Catalizador	-	Reformado	Ni/HZSM-5

Rendimientos

Sólidos	75.2	77.1	76.3
Condensados totales	10.5	10.1	10.5
Líquidos recolectados	1.4	1.5	1.8
Fase acuosa	72.4	96.0	94.2
Fase orgánica	27.6	4.0	5.8
Gases	14.3	12.8	13.2

Composición de gas (vol.%)

H ₂	43.4	52.9	56.3
CO	12.9	21.0	19.1
CO ₂	5.9	5.4	5.1
CH ₄	24.7	15.1	15.2
C2	6.7	2.9	2.9
C3	0.4	n.d.	n.d.
C4	n.d.	n.d.	n.d.
C5	0.1	n.d.	n.d.
C6	6.0	2.8	1.5
PCS (MJ/Nm³)	29.6	20.3	18.4

Composición de gas
en base seca y libre
de O₂ y N₂

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.109000>

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.109000>

Separación rentable
mediante PSA
(Pressure Swing
Adsorption)

> 50 % volumen de H₂



Tratamiento catalítico de
volátiles en reactor de
lecho fijo

- ≈ Gas recolectado
- ≈ Líquido recolectado
- ↑ Fase acuosa

Tratamiento volátiles en
reactor de lecho fijo

- ↑ H₂
- ↑ CO
- ↓ CH₄
- ≈ CO₂

3.3. Result

ID	3	4	5	6
Rampa de calentamiento (°C/min)	3	3	3	3
Tratamiento de volátiles (900 °C)	Sí	Sí	Sí	Sí
Material del lecho	CSi	CSi	CSi	CSi
Tamaño de partícula	1.5 < x < 2 mm	1.5 < x < 2 mm	1.5 < x < 2 mm	0.5 < x < 1 mm
Catalizador	-	Reformado	Ni/HZSM-5	-

Rendimientos

Sólidos	75.2	77.1	76.3	75.2
Condensados totales	10.5	10.1	10.5	9.8
Líquidos recolectados	1.4	1.5	1.8	0.6
Fase acuosa	72.4	96.0	94.2	87.8
Fase orgánica	27.6	4.0	5.8	13.2
Gases	14.3	12.8	13.2	15.0

Composición de gas (vol.%)

H ₂	43.4	52.9	56.3	51.6
CO	12.9	21.0	19.1	13.2
CO ₂	5.9	5.4	5.1	3.6
CH ₄	24.7	15.1	15.2	24.2
C ₂	6.7	2.9	2.9	5.6
C ₃	0.4	n.d.	n.d.	n.d.
C ₄	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
C ₅	0.1	n.d.	n.d.	n.d.
C ₆	6.0	2.8	1.5	1.8
PCS (MJ/Nm ³)	29.6	20.3	18.4	16.6

Separación rentable
mediante PSA
(Pressure Swing
Adsorption)

> 50 % volumen de H₂

Reducción del tamaño de
partícula del lecho (↓ dc)

- ↑ Gas recolectado
- ↓ Líquido recolectado
- ↑ Fase acuosa

Tratamiento volátiles en
reactor de lecho fijo

- ↑ H₂
- ↑ CO
- ↓ CO₂

Composición de gas
en base seca y libre
de O₂ y N₂

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.131111>
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.131111>

3. Valorización de matriz plástica

3.3. Resultados experimentales



Objetivo 2: estudio material del lecho

Polibenzoxazina
Toray T300/3K



100 g
20 cm x 2 cm

Pirólisis

- 500 °C
- 3 °C/min
- Isoterma:
- 30 minutos
- Flujo de nitrógeno:
- 1 L/min
- Alimentación: lotes

Tratamiento de volátiles

Temperatura de tratamiento

- 900 °C

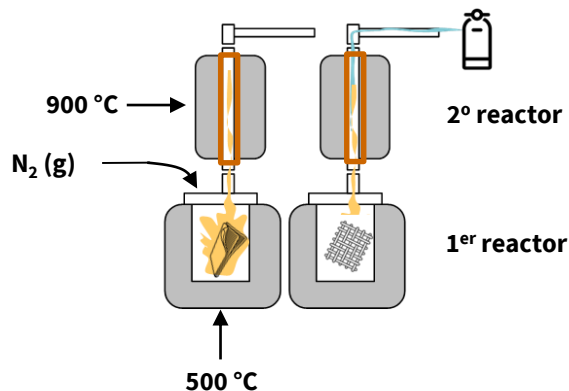
Material del lecho

- Carburo de Silicio
- Refractario
- Coque metalúrgico



Tamaño de partícula (dc)

- 1.5 mm < x < 2 mm



3.3. Resultados experimentales



Carburo de silicio (CSi)
 Navarrosic S.A.

- Buena conductividad térmica
- Estabilidad alta
- Ampliamente utilizado
- Fluido-dinámica mejorada
- Transferencia de calor mejorada



Coque metalúrgico
 Befesa Zinc Aser S.A.

- Bajo contenido de materia volátil ($\approx$ estable)
- Sustancias carbonosas para la desoxigenación de volátiles de pirólisis



Ladrillo refractario
 Beroa S.L.

- Material altamente refractario (Seeger Cone num. 37)
- Composición (% peso): 50-60 % Al_2O_3 , 30-40 % SiO_2 , 1-2 % Fe_2O_3 , 0.5-1.5 % $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$

Textural properties of the materials employed in the solid bed.

	 CSi	 Coke	 Refractory
Surface area ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	0.085	1.18	0.28
Pore volume ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	$4.18 \cdot 10^{-4}$	$3.48 \cdot 10^{-3}$	$6.15 \cdot 10^{-4}$
Pore diameter ($\text{\AA}$)	34.8	33.9	55.8

No porosos
 No ácidos
 Óxidos metálicos estables

3.3. Resultados

ID	3	7	8
Rampa de calentamiento (°C/min)	3	3	3
Tratamiento de volátiles (900 °C)	Sí	Sí	Sí
Material del lecho	CSi	Coque	Refractario
Tamaño de partícula	$1.5 < x < 2 \text{ mm}$	$1.5 < x < 2 \text{ mm}$	$1.5 < x < 2 \text{ mm}$
Catalizador	-	-	-

Rendimientos

Sólidos	75.2	74.1	75.0
Condensados totales	10.5	9.4	7.9
Líquidos recolectados	1.4	1.1	0.9
Fase acuosa	72.4	64.9	91.1
Fase orgánica	27.6	35.1	8.9
Gases	14.3	16.5	17.1

Composición de gas (vol.%)

H ₂	43.4	51.3	56.0
CO	12.9	11.2	10.4
CO ₂	5.9	7.4	3.6
CH ₄	24.7	23.1	19.6
C2	6.7	5.1	5.4
C3	0.4	n.d.	n.d.
C4	n.d.	n.d.	n.d.
C5	0.1	n.d.	0.1
C6	6.0	1.9	4.8
PCS (MJ/Nm ³)	29.6	21.7	25.9

Composición de gas
en base seca y libre
de O₂ y N₂

<https://doi.org/>
<https://doi.org/>

**Separación rentable
mediante PSA
(Pressure Swing
Adsorption)**

> 50 % volumen de H₂



**Material refractario como
lecho fijo**

- ↓ Líquido recolectado
- ↑ Fase acuosa
- ↑ Gas recolectado

**Tratamiento volátiles en
reactor de lecho fijo**

- ↑ H₂
- ↓ CO₂

3. Valorización de matriz plástica

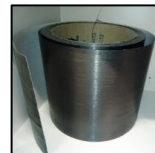
3.3. Resultados experimentales



Residuo: pre-preg compuesto por resina **epoxi** y fibras de carbono

Objetivo 3: material del lecho

- Pirólisis + tratamiento térmico (900 °C) con CSi ($0.5 < x < 1$ mm)
- Pirólisis + tratamiento térmico (900 °C) con refractario ($0.5 < x < 1$ mm)



Cantidad de gas generada (%peso) y contenido en hidrógeno (%vol.)

Objetivo 4: nitrógeno del proceso

- Pirólisis + tratamiento térmico (900 °C) con refractario ($0.5 < x < 1$ mm) sin isoterma
- Pirólisis + tratamiento térmico (900 °C) con refractario ($0.5 < x < 1$ mm) sin isoterma | sin N₂ (L/min) | con purga N₂
- Pirólisis + tratamiento térmico (900 °C) con refractario ($0.5 < x < 1$ mm) sin isoterma | sin N₂ (L/min) | sin purga N₂

Objetivo 5: parámetros térmico-catalíticos (sin isoterma, sin N₂ (L/min), sin purga N₂)

- Pirólisis + tratamiento térmico (700 °C) con refractario ($0.5 < x < 1$ mm)
- Pirólisis + tratamiento térmico (900 °C) con refractario ($0.5 < x < 1$ mm)
- Pirólisis + tratamiento térmico-catalítico (700 °C + HZSM-5) con refractario ($0.5 < x < 1$ mm)
- Pirólisis + tratamiento térmico-catalítico (900 °C + HZSM-5) con refractario ($0.5 < x < 1$ mm)
- Pirólisis + tratamiento térmico-catalítico (900 °C + HZSM-5-d.) con refractario ($0.5 < x < 1$ mm)

3.3. Resultados experimentales

- Resina epoxi
- 34 % en peso
- Fibra de carbono
- 66 % en peso



Tensile strength (MPa)	5880
Tensile modulus (GPa)	294
Strain (%)	2.0
Density (g/cm ³)	1.80
Filament diameter (μm)	5
Sizing amount (%)	0.5

ASTM D3171 (H₂SO₄/H₂O₂)

	Waste composite	Carbon fibre
Proximate analysis (wt%)		
Moisture	0.3	0.1
Volatiles	29.7	7.0
Fixed carbon ^a	69.4	92.5
Ash	0.6	0.1
Ultimate analysis (wt%)		
C	85.4	95.6
H	2.7	0.1
N	4.5	3.2
S	1.6	u.q.l. ^b
Others ^c	4.9	0.9

Carbono fijo → FC
 Materia volátil → resina

^aBy difference

^bUnder quantification level

^cCalculated as 100-moisture-ash-C-H-N-S

Resina (fenoles, aminos, amidas): C, H, N, O
 Sulfonas: S

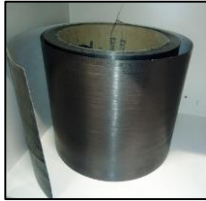
3.3. Resultados experimentales

Resina epoxi

- 34 % en peso

Fibra de carbono

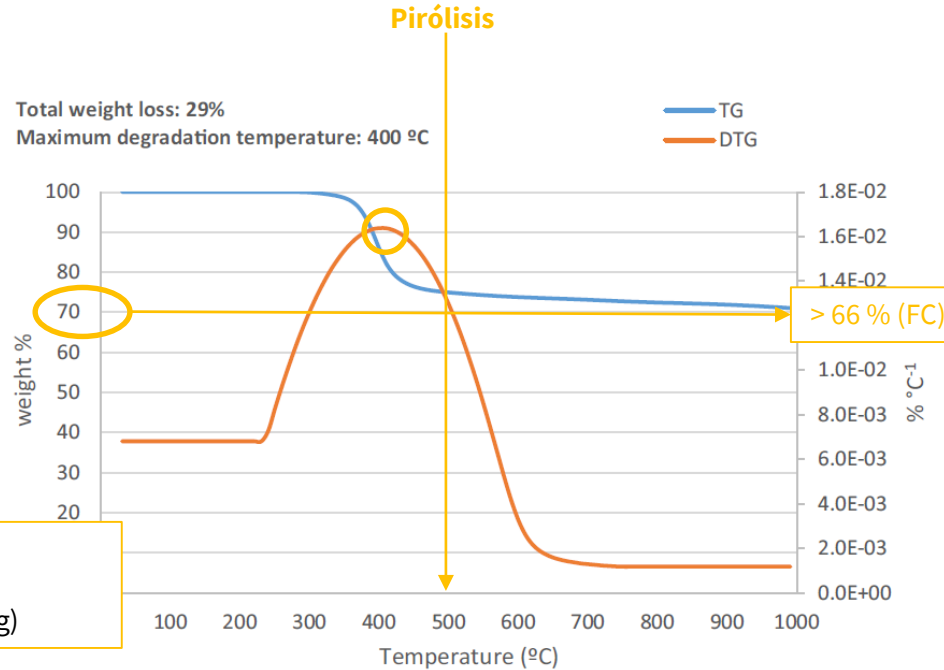
- 66 % en peso



Material carbonoso

Ensimaje (≈ 1 %)

FC estables hasta 1000 °C en N₂ (g)



3. Valorización de matriz plástica

3.3. Resultados experimentales



Objetivo 3: estudio material del lecho

Resina epoxi
Fibra de carbono



100 g
112 cm x 5 cm

Pirólisis

500 °C (3 °C/min)

Isoterma:

- 30 minutos

Flujo de nitrógeno:

- 1 L/min

Alimentación: lotes

Tratamiento de volátiles

Temperatura de tratamiento

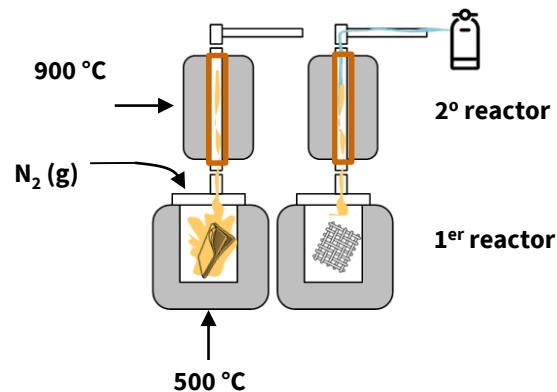
- 900 °C

Material del lecho

- Carburo de Silicio
- Refractario

Tamaño de partícula (dc)

- $0.5 \text{ mm} < x < 1 \text{ mm}$



3.3. Resultados experimentales

ID	1	2
Pirólisis (°C/min)	3	3
Tto de volátiles (900 °C)	Sí	Sí
Material del lecho	CSi	Refractario
Tamaño de partícula	0.5 < x < 1 mm	0.5 < x < 1 mm
Catalizador	-	-

Rendimientos

Sólidos	76.8	76.8
Condensados totales	12.5	12.4
Líquidos recolectados (acuoso)	0.4	0.3
Gases	10.7	10.8

Composición de gas (vol.%)

H ₂	40.4	52.4
CO	26.7	29.9
CO ₂	5.8	5.5
CH ₄	20.4	9.7
C ₂	6.7	3.5
PCS (MJ/Nm ³)	19.3	15.0

Composición de gas
en base seca y libre
de O₂ y N₂

Separación rentable
mediante PSA
(Pressure Swing
Adsorption)

> 50 % volumen de H₂



Material del lecho	CSi	Refractario
--------------------	-----	-------------

Composición líquido (% área)

Agua	6.7	78.3
Anilina	8.8	21.4
Otros aromáticos-N	25.6	n.d.
Aromáticos-O	8.5	n.d.
HC-s aromáticos policíclicos	42.4	n.d.
Otros (área < 3%)	6.0	n.d.
No identificados	2.0	0.3

Conductividad térmica:

CSi = 41-90 W/mK
Refractario = 0.3-0.5 W/mK

3. Valorización de matriz plástica

3.3. Resultados experimentales



Objetivo 4: nitrógeno del proceso

Resina epoxi
Fibra de carbono



100 g
112 cm x 5 cm

Pirólisis

500 °C (3 °C/min)

Isoterma:

- (-)

Flujo de nitrógeno:

- 1 L/min
- (-)

Purga de nitrógeno:

- Sí
- No

Alimentación: lotes

Tratamiento de volátiles

Temperatura de tratamiento

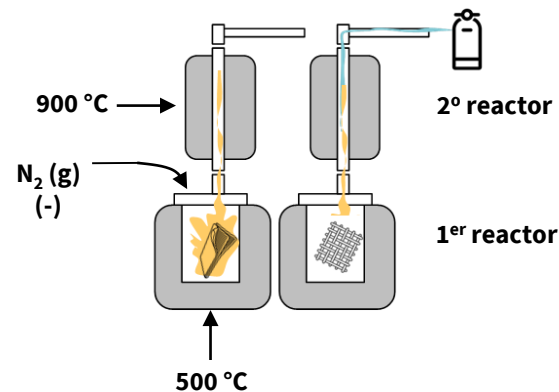
- 900 °C

Material del lecho

- Refractario

Tamaño de partícula (dc)

- $0.5 \text{ mm} < x < 1 \text{ mm}$



3.3. Resultados

ID	Sin isoterma			
	Sin N ₂ (1 L/min)			
	Con isoterma Con N ₂ (1 L/min)	Sin isoterma Con N ₂ (1L/min)	Con purga	Sin purga
2	3	3	4	5
Pirólisis (°C/min)	3	3	3	3
Tto de volátiles (900 °C)	Sí	Sí	Sí	Sí
Material del lecho	Refractario	Refractario	Refractario	Refractario
Tamaño de partícula	0.5 < x < 1 mm	0.5 < x < 1 mm	0.5 < x < 1 mm	0.5 < x < 1 mm
Catalizador	-	-	-	-

Rendimientos

Sólidos	76.8	77.5	79.7	↑ 80.0
Condensados totales	12.4	12.9	13.5	13.3
Líquidos recolectados	0.3	0.5	3.8	↑ 3.9
Gases	10.8	9.6	6.8	↓ 6.7

Composición de gas (vol.%)

H ₂	52.4	52.3	75.3	↑ 75.0
CO	29.9	28.6	19.4	↑ 20.5
CO ₂	5.5	6.9	0.1	↓ 0.2
CH ₄	9.7	10.0	5.2	↓ 4.3
C ₂	3.5	2.2	n.d.	↓ n.d.
PCS (MJ/Nm ³)	15.0	14.3	13.0	12.7

↑ Sólido pirolizado
↑ Líquido recogido
↓ Gas generado

No hay diferencias en los
resultados con y sin
isoterma a 500 °C

↑ Fase acuosa
↑ H₂, CO
(H₂ + CO) > 90 % vol.



ID	3	4	5
Composición líquido (% área)			
Agua	76.0	95.9	92.1
Anilina	17.7	n.d.	1.3
Otros aromáticos-N	n.d.	n.d.	1.7
Aromáticos-O	n.d.	n.d.	1.2
HC-s aromáticos policíclicos	n.d.	n.d.	n.d.
Otros (área < 3%)	n.d.	n.d.	n.d.
No identificados	6.3	4.1	3.7

Composición de
gas en base seca y
libre de O₂ y N₂

<https://doi.org/10.1>

3. Valorización de matriz plástica

3.3. Resultados experimentales



Objetivo 5: proceso térmico-catalítico

Resina epoxi
Fibra de carbono



100 g
112 cm x 5 cm

Pirólisis

500 °C (3 °C/min)

Isoterma:

- (-)

Flujo de nitrógeno:

- (-)

Purga de nitrógeno:

- No

Alimentación: lotes

Tratamiento de volátiles

Temperatura de tratamiento

- 700 °C
- 900 °C

Material del lecho

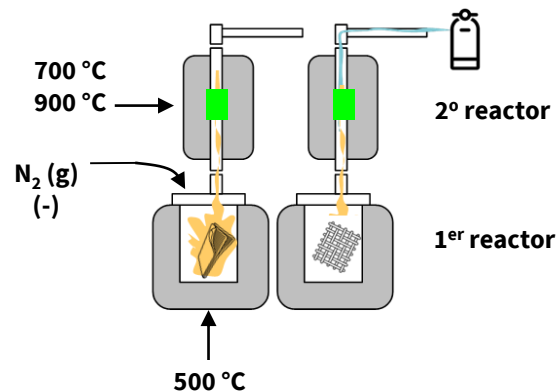
- Refractario

Tamaño de partícula (dc)

- 0.5 mm < x < 1 mm

Catalizadores

- HZSM-5 CBV 5524G



3.3. Resultados experimentales

ID	Sólo pirólisis	1	2	3	4	5
Pirólisis (°C/min)	-	3	3	3	3	3
Tto de volátiles (°C)	-	700	700	900	900	900
Material del lecho	-	Refractario	Refractario	Refractario	Refractario	Refractario
Tamaño de partícula	-	0.5 < x < 1 mm	0.5 < x < 1 mm	0.5 < x < 1 mm	0.5 < x < 1 mm	0.5 < x < 1 mm
Catalizador	-	-	Concentrado	-	Concentrado	Distribuido
Rendimientos						
Sólidos	80.7	79.9	79.9	80.0	79.7	80.4
Líquidos recolectados	8.3	7.1	7.0	3.9	3.0	3.4
Gases	3.0	3.1	2.8	6.7	7.3	6.2
Composición de gas (vol.%)						
H ₂	n.d.	91.7	≈ 92.3	75.0	67.7	68.8
CO	97.0	8.0	7.4	20.6	20.5	19.8
CO ₂	3.0	n.d.	n.d.	0.2	3.7	5.1
CH ₄	n.d.	0.3	0.3	4.3	8.1	6.3
C ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
PCS (MJ/Nm ³)	11.2	11.8	11.7	12.7	13.2	12.6

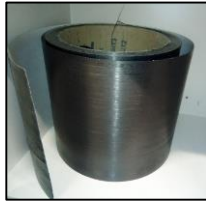
Composición de gas
en base seca y libre
de O₂ y N₂

3. Valorización de matriz plástica

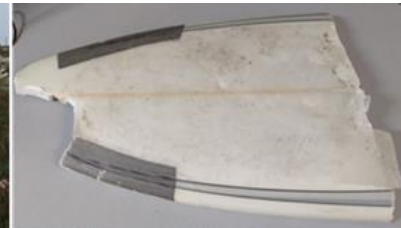
3.3. Resultados experimentales



Objetivo: evaluar la capacidad de tratamiento de volátiles con residuos FdVU



Robustez

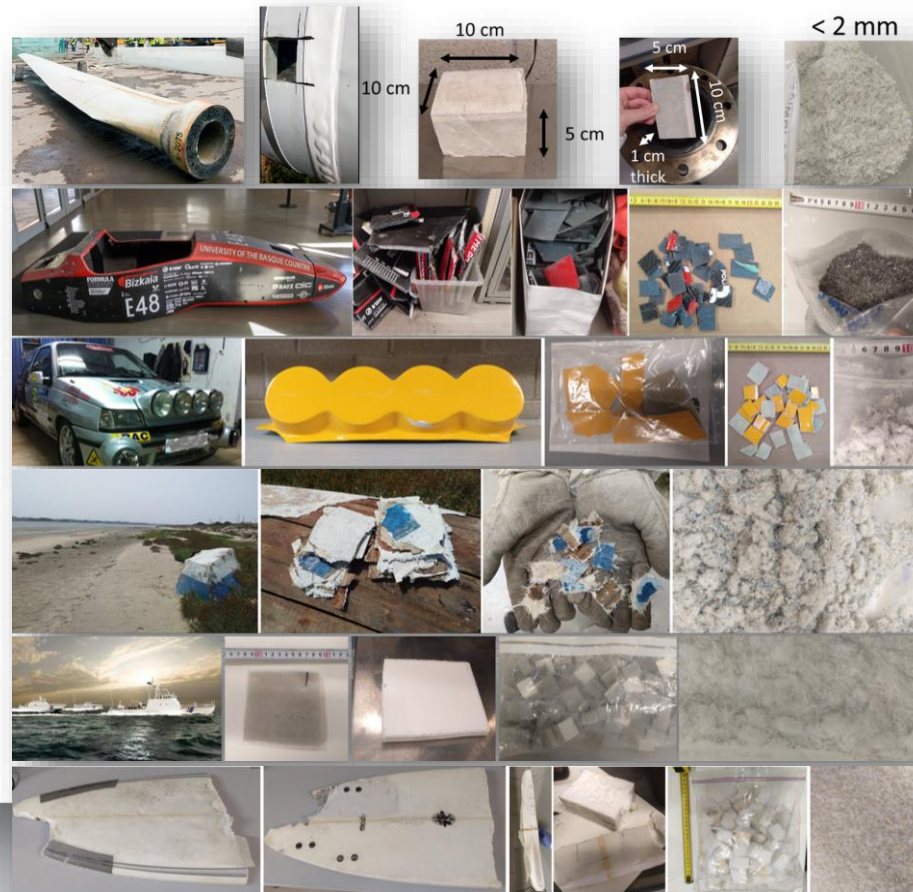


3.3. Resultados experimentales

Pinturas
 Lacas
 Gelcoat
 Masilla
 Adhesivos
 Madera
 Espuma de poliuretano
 Parafina
 ...

Epoxi
 (FC/FV)

Poliester
 (FV)



Pala de
 aerogenerador

Chasis de coche

Soporte faros
 coche de rally

Casco de barco
 de pesca

Casco de barco
 guardacostas

Tabla de surf

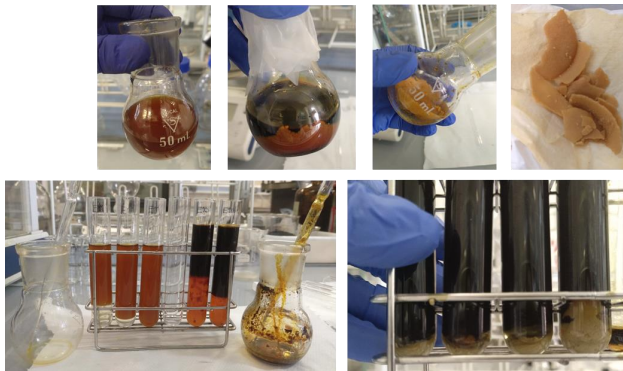
3. Valorización de matriz plástica

3.3. Resultados experimentales

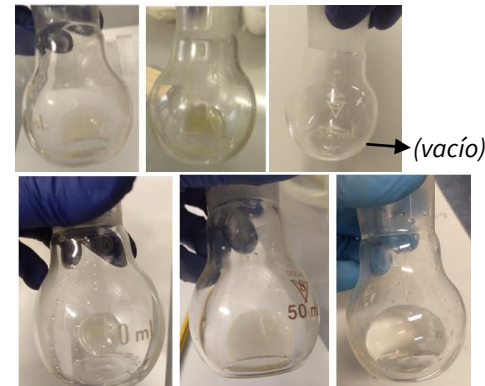


Objetivo: evaluar la capacidad de tratamiento de volátiles con residuos FdVU

Sin tratamiento



Con tratamiento



+ ↑ Gas
+ ↑ H₂



Se cumplen los indicadores

3. Valorización de matriz plástica

3.4. Líneas de trabajo actuales/futuras

1. Material del lecho

- Refractario

2. dc

- $0.5 \text{ mm} < x < 1 \text{ mm}$

3. Material adsorbente/catalítico

- (-)

4. ΔT longitudinal

- 900°C

5. Tipo de residuo

- Epoxi

L = cte | D = cte | Alimentación: continua

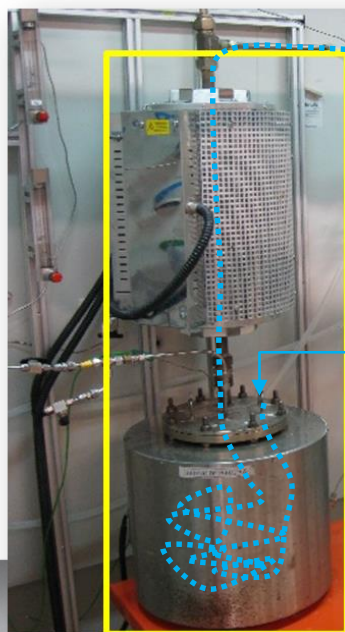
Pirólisis

Isoterma:

- (-)

Flujo de nitrógeno:

- (-)



2º reactor

Alimentación
continua (tamaño de
partícula $\approx 2 \text{ mm}$)

1er reactor

3. Valorización de matriz plástica

3.4. Líneas de trabajo actuales/futuras



1. Material del lecho

- Refractario

2. dc

- $0.5 \text{ mm} < x < 1 \text{ mm}$

3. Material adsorbente/catalítico

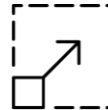
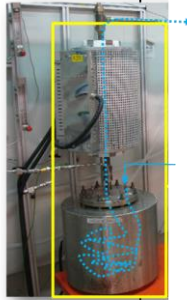
- (-)

4. ΔT longitudinal

- 900°C

5. Tipo de residuo

- Epoxi



Simulación (cinética-fluido-dinámica)
Análisis de Ciclo de Vida (ACV)
Análisis técnico-económico

+

$L = \text{cte} \mid D = \text{cte} \mid \text{Alimentación: continua}$

$L \uparrow \mid D \uparrow \mid \text{Alimentación: continua}$

Ciclos de actividad
(operación/regeneración)

Pirólisis

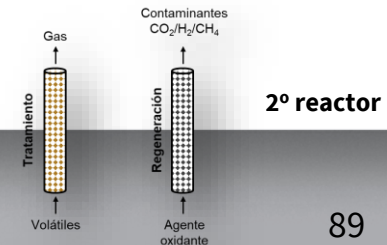
Isoterma:

- (-)

Flujo de nitrógeno:

- (-)

Números adimensionales
Similitud parcial



The noun Project icons credits



DPI Icons
Iconsparks
Ainul Muttaqin
Alex Muravev
Minnie Pigeon
Y
Dolly Holmes
Alex Muravev
Olivia Habermel
Pete Fecteau
Asiah
Design Hawk

Peter Van Driel
Eucalyp
Ana María Lora Macías

MUCHAS GRACIAS



Adriana Serras Malillos

adriana.serras@ehu.eus

SUPREN: <https://www.ehu.eus/es/web/supren/hasiera>

Reciclado y valorización de residuos: <https://www.ehu.eus/es/web/supren/pirolisi-eta-gasifikazioa>

Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente

Escuela de Ingeniería de Bilbao. Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU

