
Principales resultados y conclusiones en CIRCULARCARBON

E [4.2]. [Informe de resultados de CircularCarbon]



Autor: Instituto Tecnológico de la Energía (ITE)

Dirección: Avda. Juan de la Cierva 24 (Parque Tecnológico de Valencia)

Ciudad: Paterna (Valencia) C.P.: 46980 País España

Autor: Instituto de Tecnología Cerámica (ITC)

Dirección: Campus Universitario Riu Sec, Avda. Vicent Sos Baynat s/n

Ciudad: Castellón de la Plana C.P.: 12006 País España
(Castellón)

Este informe se compone de 34 páginas.

Financiado por:

ÍNDICE GENERAL

1	Objetivos del documento.....	5
2	Resultados del proyecto	6
2.1	Resultados de la caracterización de biomasa	6
2.2	Resultados del análisis termogravimétrico (TGA)	8
2.3	Resultados de los ensayos preliminares	10
2.4	Resultados del desarrollo de carbones activados para aplicaciones medioambientales: tratamiento de aguas y gases.	11
2.5	Resultados del ensayo de producción de carbón activo sostenibles en planta piloto de pirolisis lenta 14	14
2.6	Resultados de la aplicación de carbones sostenibles en componentes para baterías.....	15
2.7	Resultados de análisis energético.....	18
2.8	Resultados de aplicación para el tratamiento de aguas residuales industriales	23
2.9	Resultados de aplicación para el tratamiento de los gases industriales	26
2.10	Resultados globales y conclusiones.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perfil térmico de descomposición de la astilla de pino en N₂ (rojo) y aire (negro)	8
Figura 2. Perfil térmico descomposición astilla de pino en N₂, 2 h a la T de carbonización seleccionada.	9
Figura 3. Perfil térmico de descomposición de la astilla de pino en CO₂.	9
Figura 4. Isoterma de adsorción de N₂ para el char de pellet de pino (izquierda) y el carbón activado de pellet de pino (derecha).	10
Figura 5. Relación entre el burn off y la superficie BET de cada muestra (porosidad).	12
Figura 6. Relación del pH del carbón activado de astilla de pino con el burn off.	12
Figura 7. Imagen de los productos obtenidos en el ensayo de carbonización de biomasa en la planta de pirólisis CIRCULARCARBON.	14
Figura 8. Imágenes de los electrodos de char de astilla de pino depositados por serigrafía y por casting	15
Figura 9. Espectro de impedancia registrado tras el montaje para las celdas ensambladas con los electrodos de grafito/char de astilla de pino, depositados por casting (4C, 2C) y por serigrafía (3S, 4S).	16
Figura 10. Ciclos de carga y descarga de los electrodos grafito/10% char de astilla de pino depositado por casting (2C) y depositado por serigrafía (4S) en configuración semicelda.	17
Figura 11. Indicadores de desagregación automática de consumos sistema SCADA. Fuente ITE.	18
Figura 12. Indicadores específicos obtenidos por sistema SCADA Fuente ITE.	20
Figura 13. Sinópticos de muestra impacto renovable en SCADA. Fuente: ITE	21
Figura 14. Curvas de adsorción para el carbón activo comercial y CIRCULARCARBON del demostrador de aguas	23
Figura 15. Curvas de adsorción para el carbón activo comercial y CircularCarbon de aceites y grasas	24
Figura 16. Curvas de adsorción para el carbón activado comercial y CIRCULAR para los COVs analizados	27
Figura 17. Capacidades de adsorción para el carbón activo comercial y el circular	28
Figura 18. Capacidades de adsorción normalizadas para el contenido en cenizas para el carbón activo comercial y el circular	29
Figura 19. Isoterma de adsorción del carbón activo circular para el formaldehído	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de los análisis de caracterización físico-química de la astilla de pino realizados en laboratorio	6
Tabla 2. Resultados del análisis elemental y análisis de Cl y S para la astilla de pino	6
Tabla 3. Resultados del análisis en materia lignocelulósica para la astilla de pino.....	6
Tabla 4. Resultados del análisis de componentes mayoritarios para la astilla de pino en mg/kg sobre biomasa seca.	8
Tabla 5. Resultados de los ensayos preliminares de carbonización-activación	10
Tabla 6. Parámetros físico-químicos y texturales de los materiales carbonosos obtenidos en los ensayos preliminares.....	11
Tabla 7. Caracterización físico-química de carbones de referencia y carbones modelo	11
Tabla 8. Medidas de pH de CAs obtenidos a diferentes tiempos de activación.	12
Tabla 9. Propiedades texturales de carbones activados a partir de astilla de pino obtenidos a diferentes tiempos de activación	13
Tabla 10. Caracterización físico-química de carbones de referencia y carbones modelo.....	13
Tabla 11. Resultados de los ensayos de carbonización de astilla de pino en la planta de pirolisis CIRCULARCARBON	14
Tabla 12. Características de los electrodos caracterizados.	16
Tabla 13. Valores de tensión inicial (OCV) tras el montaje de las celdas.	16
Tabla 14. Valores de capacidad para la primera y segunda descarga para el electrodo a caracterizar.....	17
Tabla 15. Consumos continuos de standby del piloto (%).	19
Tabla 16. Comprobación de exactitud del cálculo de Standby.	19
Tabla 17. Indicadores estimados de consumo kWh por kg de carbón activado producido.	20
Tabla 18. Capacidad de adsorción de Boro de los carbones activados.....	24
Tabla 19. Capacidad de adsorción carbón activo obtenido en CircularCarbon	25
Tabla 20. Comparativa carbón activado comercial y obtenido en CircularCarbon	25
Tabla 21. Capacidad de adsorción de Aceites y Grasas de los carbones activados.....	25
Tabla 22. Tiempo de ruptura 0.2 y 0.5 de los carbones estudiados	28

1 Objetivos del documento

El presente documento se corresponde con el entregable “E4.2. Principales resultados y conclusiones en CIRCULARCARBON” del proyecto CIRCULARCARBON el cual contiene los principales resultados de los trabajos llevados a cabo en el marco del paquete de trabajo “PT4. Pruebas del demostrador”.

En concreto, en el documento se presentan los principales resultados de las pruebas. Por lo tanto, a continuación, se pasa a describir los resultados y conclusiones obtenidos durante el transcurso del piloto, haciendo un seguimiento de los mismos y de cómo pueden contribuir a mejorar la competitividad de las empresas de la Comunitat Valenciana. Además, también se analizan los resultados de balance energético, rendimiento de los procesos y resultados de análisis de las posibilidades de integración de energías renovables.

2 Resultados del proyecto

2.1 Resultados de la caracterización de biomasa

Los resultados obtenidos en la caracterización de la astilla de pino se muestran a continuación. En primer lugar se muestran los resultados de los ensayos de caracterización físico-química relacionados con el contenido en humedad, cenizas, densidad y materia volátil. A continuación se muestran los resultados del análisis químico elemental, de componentes mayoritarios y la composición estructural de la astilla de pino.

Tabla 1. Resultados de los análisis de caracterización físico-química de la astilla de pino realizados en laboratorio

Residuo	Tamaño de partícula	Humedad (%)	Cenizas (%)	Volátiles (%)	Densidad (kg/m ³)
Astilla de pino	< 1 mm	7.3	0.4	86.2	680

La muestra se caracteriza con un tamaño de partícula reducido por debajo de 1 mm. Se obtiene un valor de humedad del 7.3%, un porcentaje de cenizas del 0.4%, un porcentaje en volátiles del 86.2% y una densidad de 680 kg/m³. Estos valores se encuentran en el rango de los valores recomendados para materias primas lignocelulósicas de producción de carbón activo.

Tabla 2. Resultados del análisis elemental y análisis de Cl y S para la astilla de pino

Residuo	%C	%H	%N	%Cl	%S
Astilla de pino	49.97	6.61	0.16	-	0.01

Los resultados del análisis elemental y de Cl y S se muestran en la Tabla 2. Los valores obtenidos también se encuentran dentro de los límites recomendados para la biomasa lignocelulósica materia prima de carbones activados. Con respecto a la composición estructural (**Tabla 3**), el componente mayoritario es la celulosa, seguido de la lignina y la hemicelulosa. Los valores se encuentran en el rango recomendado, excepto para el caso de la hemicelulosa para la cual el porcentaje está un poco por debajo del valor mínimo de referencia.

Tabla 3. Resultados del análisis en materia lignocelulósica para la astilla de pino

Residuo	%Celulosa	%Hemicelulosa	%Lignina
Astilla de pino	44.2	14.4	31.0

El análisis de componentes mayoritarios se muestra en la

Tabla 4. En general **los valores se encuentran por debajo de los 100 mg/Kg de biomasa seca**, salvo en el caso del Ca, Mg y Fe que se encuentra por encima de los mg/kg de biomasa seca. Estos valores confirman el bajo porcentaje en cenizas que se ha obtenido para la muestra.

Tabla 4. Resultados del análisis de componentes mayoritarios para la astilla de pino en mg/kg sobre biomasa seca.

Residuo	Na	K	Ca	Mg	Fe	Si	Al	Ba	Ti	P
Astilla de pino	18	9	513	154	154	128	26	13	1	64

Por tanto, la astilla de pino seleccionada como materia prima para la producción de carbones activados cumple con las especificaciones necesarias para el desarrollo de materiales carbonosos a partir de biomasa. Además, su homogeneidad, densidad intermedia y fácil manejo hacen de esta biomasa un material prometedor para las primeras pruebas en el piloto demostrador de producción de carbón activado.

2.2 Resultados del análisis termogravimétrico (TGA)

El objetivo es evaluar los perfiles de carbonización y activación mediante TGA. A partir de estos perfiles podrán determinarse las condiciones de carbonización y activación para la astilla de pino.

El procedimiento seguido para la determinación de los diferentes perfiles es el indicado a continuación:

- Análisis del perfil de descomposición térmica de la muestra tanto en atmósfera inerte (nitrógeno) como oxidante (aire)
- Carbonización de la muestra en TGA durante 120min
- Evaluación perfil de descomposición térmica del char obtenido en el punto en atmósfera de CO₂.

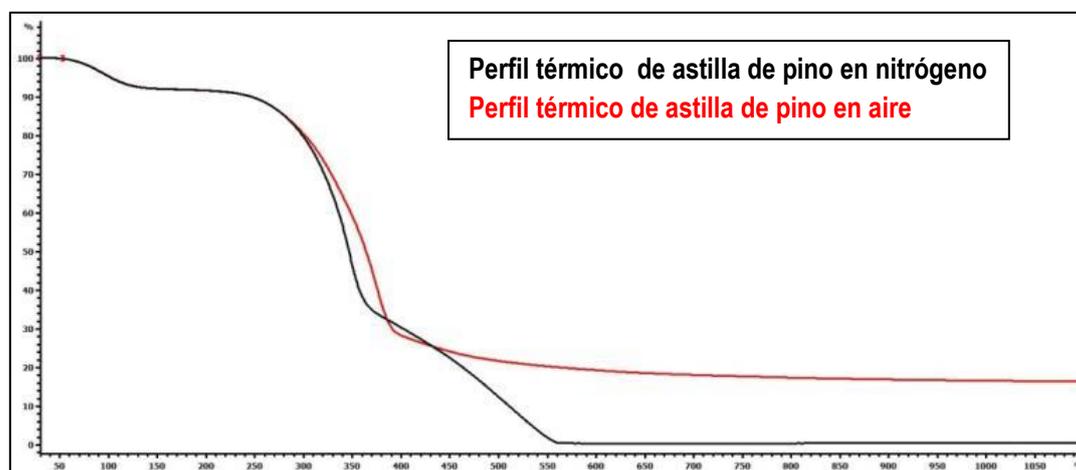


Figura 1. Perfil térmico de descomposición de la astilla de pino en N₂ (rojo) y aire (negro)

Los perfiles térmicos de la astilla de pino en nitrógeno y aire son similares hasta 350°C; a partir de este punto difieren significativamente obteniéndose como resultado un residuo de aproximadamente 16,3% en el caso de la curva registrada en nitrógeno y del 0,5% para el aire. Se trata, por tanto, de una muestra con un contenido en cenizas del 0,5%. Este valor es del mismo orden que el valor obtenido en el ensayo de determinación de cenizas.

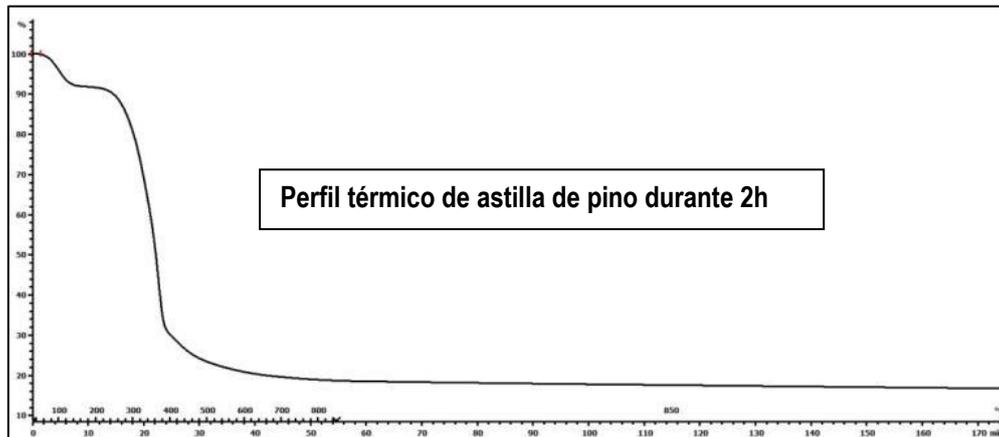


Figura 2. Perfil térmico descomposición astilla de pino en N₂, 2 h a la T de carbonización seleccionada.

Como puede verse en la Figura 2. al mantener la temperatura de carbonización, la masa de la muestra permanece prácticamente constante durante las dos horas experimentando una caída de aproximadamente del 2,0%. Por tanto, la temperatura seleccionada es adecuada para llevar a cabo la carbonización de este residuo.

La Figura 3. muestra el perfil de descomposición térmica en atmósfera de CO₂ del carbón obtenido en la etapa anterior. Gracias a este perfil será posible seleccionar la temperatura de activación adecuada en función del grado de “burn-off” deseado.

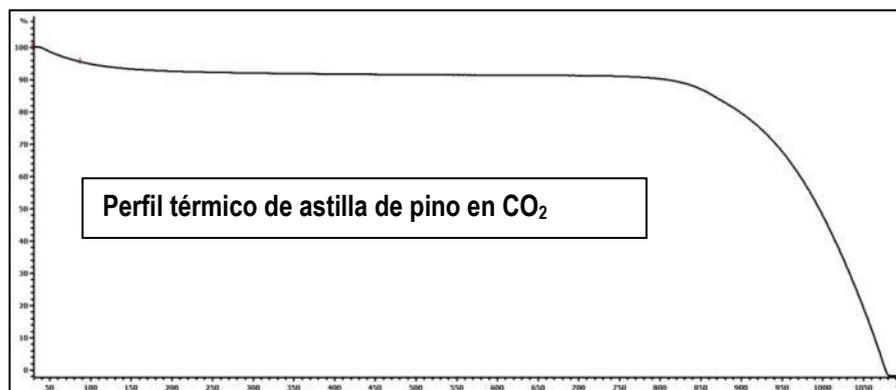


Figura 3. Perfil térmico de descomposición de la astilla de pino en CO₂.

De los resultados obtenidos en estos análisis, se obtienen las condiciones para los ensayos preliminares de carbonización-activación antes de pasar a los ensayos en la planta piloto.

2.3 Resultados de los ensayos preliminares

RESULTADOS DE CARBONIZACIÓN-ACTIVACIÓN DE ASTILLA DE PINO Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES CARBONOSOS OBTENIDOS

En base al análisis preliminar realizado en TGA se procede a llevar a cabo las carbonizaciones y activaciones con astilla de pino. Se realizan diferentes ensayos de carbonización y activación con el objetivo de analizar la tipología de porosidad que se produce en carbones obtenidos a partir de astilla de pino y el rendimiento de cada etapa.

Tabla 5. Resultados de los ensayos preliminares de carbonización-activación

Material	Rendimiento (%)
Char de astilla de pino	21,6
CA de astilla de pino	64,3

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la caracterización tanto del char, como del carbón activado obtenido. En primer lugar se muestran las isothermas de adsorción de N₂ para el char y para el carbón activado.

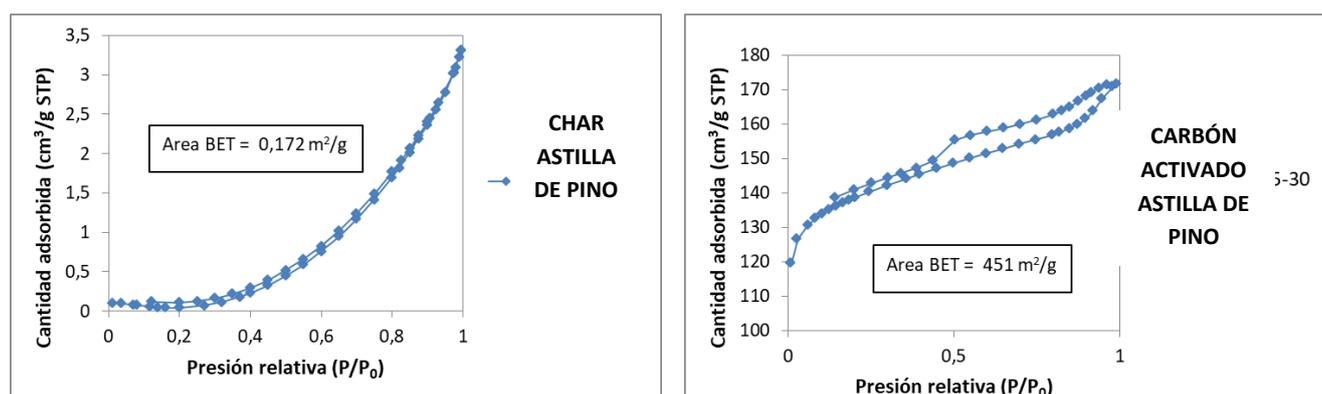


Figura 4. Isotherma de adsorción de N₂ para el char de pellet de pino (izquierda) y el carbón activado de pellet de pino (derecha).

La isoterma de adsorción obtenida para el char es de tipo no poroso. El char obtenido no presenta porosidad y tiene un valor del área BET de 0.17 m²/g. Sin embargo, tras el proceso de activación física, se desarrolla una micro-mesoporosidad en el material como se observa de la isoterma tipo I-IV obtenida, según la clasificación IUPAC. El resumen de los parámetros texturales y los parámetros físico-químicos evaluados para el char y para el carbón activado de astilla de pino se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 6. Parámetros físico-químicos y texturales de los materiales carbonosos obtenidos en los ensayos preliminares.

CARBÓN	Parámetros texturales				Parámetros físico-químicos			
	S _{bet} (m ² g ⁻¹)	Tipología de isoterma*	V _{mic} (cm ³ g ⁻¹)	S _{ext} (m ² g ⁻¹)	Humedad (%)	Densidad (kg m ⁻³)	pH	PZC
Char Astilla de pino	0,17		0,0001	0,22	2,7	371	9,5	9,7
CA Astilla de pino	451	I-IV	0,22	107	4,2	350	10,7	10,3

2.4 Resultados del desarrollo de carbones activados para aplicaciones medioambientales: tratamiento de aguas y gases.

En el proyecto CIRCULARCARBON el carbón activado de astilla de pino, se ha desarrollado buscando obtener unos materiales con las especificaciones adecuadas para su uso en tratamiento de aguas y gases. Para ello se han utilizado dos carbones activados de referencia para tratamiento de aguas y gases proporcionados por ITC en el marco del proyecto. Los carbones de referencia para aguas y gases se han caracterizado evaluando propiedades físico-químicas como el área específica superficial, el contenido en humedad y cenizas, y el pH de contacto. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 7. Caracterización físico-química de carbones de referencia y carbones modelo

CARBÓN	Parámetros texturales				Parámetros físico-químicos				
	S _{bet} (m ² g ⁻¹)	Tipología de isoterma*	V _{mic} (cm ³ g ⁻¹)	S _{ext} (m ² g ⁻¹)	Humedad (%)	Cenizas (%)	Densidad* (kg m ⁻³)	Morfología	pH
CAR_AGUA_CC	789	I-IV	0,21	357	2,8	12,6	490	Granular	10
CAR_GASES_CC	816	I-IV	0,24	344	11,6	13	546	Pellet	9,7

Para el desarrollo de carbones activados con aplicación en medioambiente, se han llevado a cabo ensayos de activación del char de astilla de pino a distintos tiempos con el fin de evaluar la influencia del tiempo de activación en la porosidad y el pH de los materiales obtenidos, ya que estas propiedades son importantes en materiales con aplicaciones medioambientales como las que se plantean en CIRCULARCARBON.

El burn-off o grado de quemado está directamente relacionado con la porosidad del carbón activado como se puede observar claramente en la Figura 5. . Se observa un aumento significativo de la S_{bet} con el grado de burn-off hasta valores del 60% a partir de este valor la superficie porosa no aumenta en relación con el burn-off.

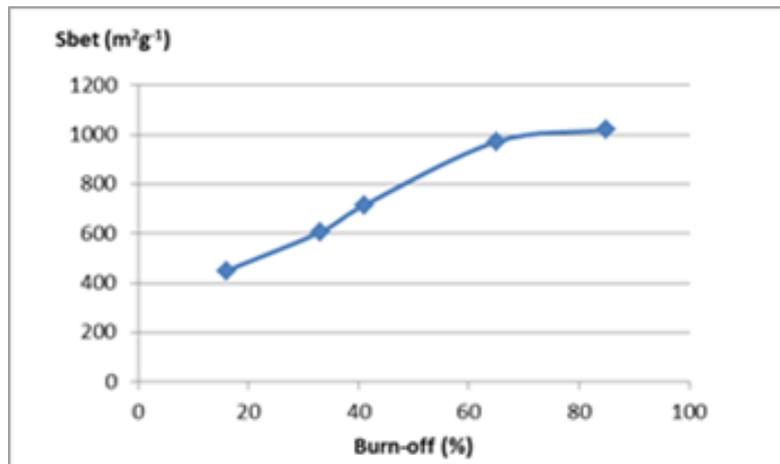


Figura 5. Relación entre el burn off y la superficie BET de cada muestra (porosidad).

Con relación a la influencia del tiempo de activación en el pH, tal y como podemos observar en la Tabla 8 y en la Figura 6., el pH no está relacionado con el tiempo de activación ni con el burn-off de la muestra y se mantiene entre 10,4 y 10,8.

Tabla 8. Medidas de pH de CAs obtenidos a diferentes tiempos de activación.

Muestra_tiempo de activación	pH muestra
CA_CC1	10,7
CA_CC2	10,4
CA_CC3	10,4
CA_CC4	10,7
CA_CC5	10,8

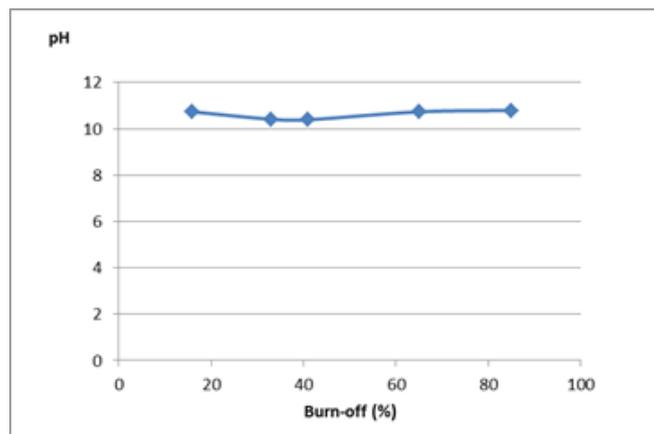


Figura 6. Relación del pH del carbón activado de astilla de pino con el burn off.

Como puede verse en la se obtienen diferentes carbones activados con diferentes S_{bet} que van desde 400 hasta 1000 $m^2 g^{-1}$ a partir de astilla de pino en las condiciones seleccionadas.

Tabla 9, se obtienen diferentes carbones activados con diferentes S_{bet} que van desde 400 hasta 1000 $m^2 g^{-1}$ a partir de astilla de pino en las condiciones seleccionadas.

Tabla 9. Propiedades texturales de carbones activados a partir de astilla de pino obtenidos a diferentes tiempos de activación

Muestra	Parámetros texturales			
	S_{bet} ($m^2 g^{-1}$)	Tipología de isoterma*	V_{mic} ($cm^3 g^{-1}$)	S_{ext} ($m^2 g^{-1}$)
CA_CC1	450	I-IV	0,17	107
CA_CC2	606	I-IV	0,20	219
CA_CC3	715	I-IV	0,22	283
CA_CC4	972	I-IV	0,26	471
CA_CC5	1020	I-IV	0,28	450

El tiempo de activación influye directamente en el porcentaje de burn-off del carbón activado de astilla de pino, por tanto a mayores tiempos de activación obtendremos burn-off más altos. La microporosidad generada en el char mediante la activación también se encuentra directamente relacionada con el burn-off a excepción de la muestra de carbón activada durante tiempos más largos, debido a que el carbón activado de astilla de pino alcanza su máximo de porosidad a un burn-off entre 65-85% (en las condiciones descritas). Por lo tanto, el tiempo de activación también influirá en los microporos del char y el ensanchamiento de estos.

A partir de los resultados obtenidos, se han seleccionado dos carbones modelo, para validar las propiedades obtenidas en carbones sostenibles CIRCULARCARBON en aplicaciones de tratamiento de aguas y gases. La comparativa entre los carbones modelo y los carbones activados comerciales de referencia se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Caracterización físico-química de carbones de referencia y carbones modelo

CARBÓN	Parámetros texturales				Parámetros físico-químicos				
	S_{bet} ($m^2 g^{-1}$)	Tipología de isoterma*	V_{mic} ($cm^3 g^{-1}$)	S_{ext} ($m^2 g^{-1}$)	Humedad (%)	Cenizas (%)	Densidad* ($kg m^{-3}$)	Morfología	pH
CAR_AGUAS_CC	789	I-IV	0,21	357	2,8	12,6	490	Granular	10
MOD_28	728	I-IV	0,23	262	13,8	2	180	Granular	10,3
CAR_GASES_CC	816	I-IV	0,24	344	11,6	13	546	Pellet	9,7
MOD_05	947	I-IV	0,34	249	3,9	5,9	290	Pellet	9

2.5 Resultados del ensayo de producción de carbón activo sostenibles en planta piloto de pirolisis lenta

Una vez optimizadas las condiciones para la carbonización de la astilla de pino, el proceso se extrapolaron las condiciones seleccionadas en los ensayos preliminares a la planta piloto de pirolisis lenta CIRCULARCARBON. Se llevaron a cabo 4 ensayos de carbonización de astilla de pino.

Los resultados obtenidos en los ensayos de carbonización se muestran a continuación

Tabla 11. Resultados de los ensayos de carbonización de astilla de pino en la planta de pirolisis CIRCULARCARBON

Parámetros	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4
Masa de astilla alimentada (kg)	1,09	1,31	1,49	1,32
Tiempo de carbonización* (min)	135	165	165	165
Rendimiento biochar (%)	20,28	20,31	18,18	20,27
Rendimiento bio-aceite (%)	4,35	4,77	4,84	4,35
Rendimiento biogas (%)	75,37	74,92	76,98	75,38

Los resultados obtenidos para las carbonizaciones llevadas a cabo a partir de astilla de pino, muestran valores similares en todos los parámetros, con un rendimiento de char alrededor del 20%, un rendimiento cercano al 4.5% para el bio-aceite y un rendimiento del orden del 75% para el biogás. Estos resultados muestran la reproducibilidad del proceso a escala piloto a partir de las condiciones optimizadas a escala de laboratorio. Cabe destacar además, que el rendimiento del char obtenido en la planta piloto es del mismo orden que el rendimiento obtenido en la carbonización realizada a escala de laboratorio. Por tanto, se puede afirmar que **la extrapolación de las condiciones de operación en laboratorio a la planta piloto CIRCULARCARBON se ha llevado a cabo con éxito.**



Figura 7. Imagen de los productos obtenidos en el ensayo de carbonización de biomasa en la planta de pirolisis CIRCULARCARBON.

2.6 Resultados de la aplicación de carbones sostenibles en componentes para baterías

DESARROLLO DE ELECTRODOS

Para la síntesis de electrodos conteniendo el char de astilla de pino, se emplea la misma formulación optimizada para electrodos de grafito (referencia), manteniendo las proporciones entre material activo y agentes ligantes. Se sustituye un 10 % en peso de grafito por la misma cantidad de carbon sostenible CIRCULARCARBON, concretamente el char de astilla de pino obtenidos. La deposición de los electrodos se lleva a cabo sobre un colector de corriente de cobre por casting y serigrafía utilizando el mismo slurry. Los electrodos obtenidos se muestran en la figura siguiente:



Figura 8. Imágenes de los electrodos de char de astilla de pino depositados por serigrafía y por casting

ENSAMBLAJE Y TESTEO DE CELDAS

Los electrodos desarrollados se utilizan como ánodo en el ensamblaje de una celda tipo pouch, en configuración de semi-celda, utilizando un ánodo a base de litio metálico. A continuación se muestran las especificaciones de los componentes que se han empleado en el ensamblaje de las celdas para el testeo de los mismos:

- Colector de corriente (sustrato): lámina de cobre
- Material anódico: composite de grafito y char de astilla de pino
- Ligante: CMC+ SBR base agua

En la Tabla 12 se recogen los resultados de la caracterización de los electrodos desarrollados relativos al espesor y a la densidad de los mismos. El valor del espesor no incluye el colector de cobre. Los componentes y especificaciones de la semi-celda para el testeo de los electrodos se muestran en la tabla 13:

Tabla 12. Características de los electrodos caracterizados.

Batch	Electrodo*	Espesor* (μm)	Densidad electrodo (g/cm^3)
PSN057_73-E1	2C	39	0.85
PSN057_73-E1	4C	42	0.83
PSN057_73-S1	3S	14	0.42
PSN057_73-S1	4S	13	0.52

(C) Casting y (S) Serigrafía

Los valores de tensión inicial, tras su montaje, para cada celda ensamblada con los diferentes electrodos se recogen en la Tabla 13. En la Figura 9. se muestra el espectro de impedancia realizado tras el montaje de cada una de las celdas ensambladas con los electrodos de grafito/char de astilla de pino. Los valores de resistencia interna tras el montaje se recogen también en la Tabla 13.

Tabla 13. Valores de tensión inicial (OCV) tras el montaje de las celdas.

Electrodo	Celda	OCV (V)	Resistencia ($\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$)
4C	4C	1,54	15,75
2C	2C	2,57	15,75
3S	3S*	0,01	7,48
4S	4S	1,80	5,51

*Esta celda no cicló.

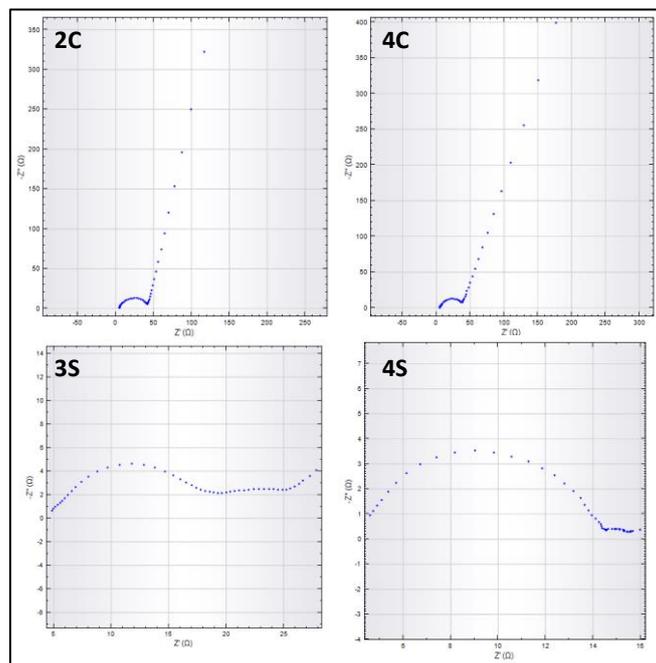


Figura 9. Espectro de impedancia registrado tras el montaje para las celdas ensambladas con los electrodos de grafito/char de astilla de pino, depositados por casting (4C, 2C) y por serigrafía (3S, 4S).

Uno de los parámetros de utilidad a la hora de caracterizar electroquímicamente un electrodo es la pérdida de capacidad inicial irreversible (Q_{irr}), que es la diferencia entre las capacidades de la primera (Q_1) y de la segunda (Q_2) descarga, es decir, la capacidad que se consume en el primer ciclo y que es irre recuperable.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los valores de capacidad para la primera y segunda descarga de los electrodos caracterizados y el valor de capacidad irreversible. El electrodo 3S no cicló.

Tabla 14. Valores de capacidad para la primera y segunda descarga para el electrodo a caracterizar.

Electrodo	$Q_1 / \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$	$Q_2 / \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$	$Q_{irr} / \text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$	% Q_{irr}
2C	419	337	82	19,6
4C	426	346	80	18,8
3S	-	-	-	-
4S	358	343	15	4,2

En la Figura 10. se muestran los ciclos de carga y descarga de los electrodos de grafito/10% char de astilla de pino depositado por casting (2C) y por serigrafía (4S) registrados a C/10 y C/5. Se observa que la capacidad reversible obtenida para el electrodo depositado por casting (2C) es superior, en torno a 3.2mAh (359 mAh/g), a la capacidad reversible obtenida para el electrodo depositado por serigrafía (4S), que presenta un valor de 0.48 mAh (342 mAh/g). Si bien es cierto que se obtienen valores similares en cuanto a valores de capacidad específica. También se observa que los valores de capacidad en el electrodo depositado por casting se mantienen a la misma C-rate, mientras que en el electrodo depositado por serigrafía la capacidad va disminuyendo con el número de ciclos.

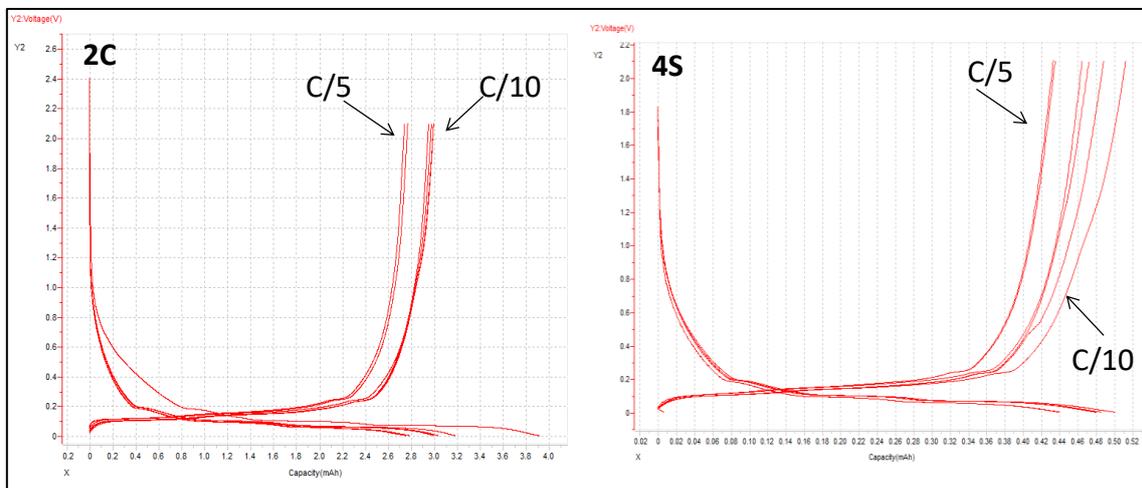


Figura 10. Ciclos de carga y descarga de los electrodos grafito/10% char de astilla de pino depositado por casting (2C) y depositado por serigrafía (4S) en configuración semicelda.

Empleando el mismo slurry y por tanto, la misma composición de electrodo, grafito y 10% de char de pellet de pino, se observa que la técnica de serigrafía permite obtener electrodos aptos para ser utilizados en celdas de litio. En cuanto a las primeras pruebas en cuanto a propiedades, en el caso de los electrodos depositados por serigrafía la capacidad obtenida es ligeramente menor que en el caso de los electrodos depositados por casting y además, esta capacidad se va perdiendo con los ciclos en el caso de electrodos depositados por serigrafía. Sin embargo, son pruebas preliminares basadas en la técnica de referencia (casting) y es necesario optimizar tanto el slurry como la deposición para explotar esta técnica de deposición en el ámbito de las baterías.

2.7 Resultados de análisis energético

En lo que respecta a los resultados de análisis energético, se han obtenido los siguientes resultados particulares:

- En cuanto al peso de consumo energético de las etapas, se aprecia que el mayor consumo proviene del consumo de los purificadores de la línea de ensamblaje de electrodos en atmósfera inerte, tanto en el propio proceso de ensamblaje como en el recinto de impresión (Cabina solventes), tal y como refleja la figura siguiente:

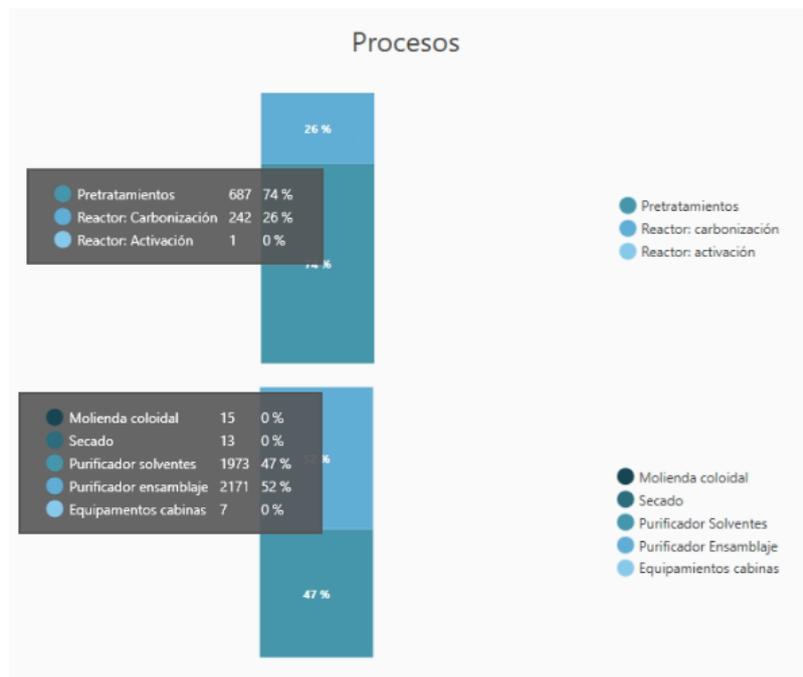


Figura 11. Indicadores de desagregación automática de consumos sistema SCADA. Fuente ITE.

- En cuanto a análisis energéticos particulares, el SCADA permite realizar consultas personalizadas y filtradas por fecha y sensor o analizador. En base a ello, se ha realizado un estudio de consumo de standby (consumos permanentes del laboratorio) mediante el empleo de la funcionalidad de consulta de datos. Los resultados obtenidos fueron que los purificadores de la caja de guantes consumen la práctica totalidad.

Tabla 15. Consumos continuos de standby del piloto (%).

Consumo	Conclusión
Purificadores	Aproximadamente 70 % del consumo de standby de la planta
Chiller de soporte a los purificadores	Aproximadamente 28 % del consumo de standby de la planta
Resto	Menor al 2 %

Además, se comprobó que las discrepancias de la suma de consumos de standby respecto al registro del analizador general eran bajas, indicando que los consumos considerados eran representativos del standby de la planta:

Tabla 16. Comprobación de exactitud del cálculo de Standby.

Total calculado:	1.994	W
Total analizador General:	2.280	W
Diferencia General - calculado:	286	W

Lo que da una diferencia del 12 %, no siendo excesiva en este caso y considerándose por ello representativos los datos. Las posibles discrepancias se reflejan en la tabla siguiente:

Posibles consumos que causan la discrepancia del standby:

Ordenadores encendidos
 Equipos comunicación (se estiman en 100 W)
 Equipos extracción que se activen automáticamente

- Como acción de mejora, se puede emplear el modo bajo consumo de los purificadores. A raíz de ello, se realizó un estudio de la mejora e impacto del modo de bajo consumo de manera empírica, conviniendo que el ahorro que se podía conseguir era de más del 50 % del consumo anteriormente referenciado de los purificadores. Dicho modo de bajo consumo, que se incluyó en las especificaciones durante la fase de diseño y selección del equipo, está pensado para períodos en que no se opera la línea pero el equipo ha de mantener la atmósfera inerte, permitiendo al equipamiento activar solo sus funciones más básicas.
- Además, en varios de los ensayos de pirólisis se revisó el cálculo de los indicadores de consumo específico por kg de producto obtenido con el fin de examinar la mejora de rendimiento

energético gracias al diseño del nuevo equipamiento de proceso, que presenta un mejor rendimiento de escala. Para ello, partiendo de la tabla de estimaciones desarrollada en el PT3:

Tabla 17. Indicadores estimados de consumo kWh por kg de carbón activado producido.

Opción contemplada	Tasa de alimentación considerada (kg/h)	Potencia eléctrica nominal (kW)	Tiempo de uso considerado precalentamiento(h)	Tiempo de uso considerado tratamiento (h)	Consumo energético por ensayo (pirólisis+activación) (kWh)	Consumo (kWh/kg CA producido)
Tecnología discontinua de laboratorio (Mufia)	Alim. Discontinua (de 10 gr de gramos a 200 gr por ensayo)	7	5		7,5	416,7
Tecnología continua semiindustrial (Reactor tornillo)	0,2	3,6	6	7	29,88	207,5
Tecnología continua semiindustrial (Reactor tornillo)	1	23,75	6	7	197,125	273,8

Se obtuvieron los siguientes indicadores basados en las pruebas del piloto:



Figura 12. Indicadores específicos obtenidos por sistema SCADA Fuente ITE.

Dichos indicadores son el resultado del cálculo automático realizado por el sistema digital según los datos obtenidos del funcionamiento de la planta, junto a los datos de biomasa tratada, sus características, y sus resultados, indicados por los técnicos especialistas operadores del proceso. Se aprecia una mejora del indicador muy significativa comparando las dos primeras y la tercera prueba, debida fundamentalmente a la mejora operativa del proceso, tanto en el mejor rendimiento en tiempo en las operaciones de manipulación, configuración y operativa del proceso, como en las acciones de preparación de la atmósfera de trabajo mediante una optimización del precalentamiento. Como resultado, y teniendo en cuenta el dato de consumo por kg de char obtenido en la tercera prueba para la

carbonización, es previsible esperar un consumo de energético típico para la biomasa tratada de aproximadamente 260 kWh/kg, valor aproximadamente coincidente con las estimaciones realizadas. Además, se espera que mejore notablemente mediante una operativa optimizada del reactor basada en la sectorización del calentamiento mediante configuración de distintas consignas de las resistencias, que se llevará a cabo en el futuro, evitando períodos de precalentamiento tan largos.

- Este indicador global de producción de manufactura de carbones activos que enlaza la cantidad de producto principal a obtener respecto a su consumo energético puede seguirse de manera automática con cada ensayo a realizar por parte del sistema de análisis digital diseñado e implementado. Algunas de las formas consideradas de mejora de este indicador podrían ser:
 - Optimizando la etapa de precalentamiento, ya sea en subprocesos previos externos al equipo de fabricación de carbón (por ejemplo estufas) o mejorando la dinámica térmica del propio equipo al ser precalentado con el objetivo de obtener la misma atmósfera en un menor tiempo y con un consumo energético total del proceso de precalentamiento menor en su conjunto.
 - Minimizando los tiempos operativos muertos de proceso, como la etapa de alimentación manual de la tolva.
 - Optimizando las principales variables de manufactura de la propia biomasa, que tal y como se ha identificado preliminarmente, son la densidad y tamaño de partícula, apoyándose en el tipo de biomasa para seleccionar aquellas de menor consumo.
 - Integrando energía eléctrica renovable como la fuente solar fotovoltaica y/o eólica para disminuir el consumo y potenciar la descarbonización. Como conclusión se hace referencia a los resultados de análisis continuo de integración solar fotovoltaica y eólica trabajados en el entregable E3.1. A continuación se muestra el sinóptico desarrollado para el análisis basado en balances horarios de datos reales de generación renovable y del consumo del demostrador que se realiza por parte del sistema diseñado:

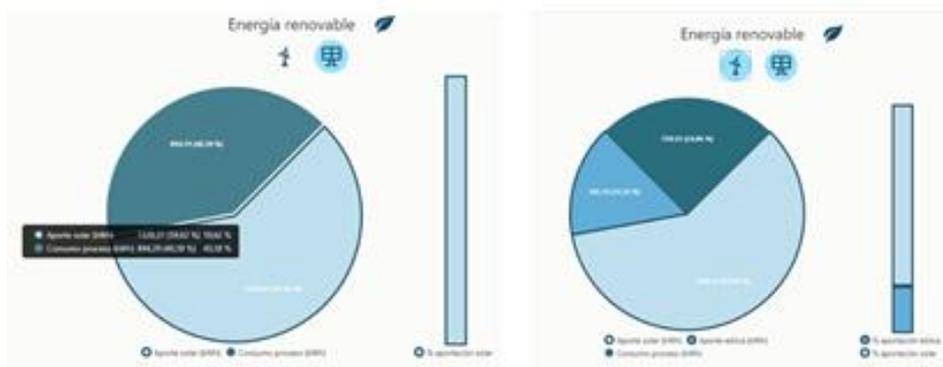


Figura 13. Sinópticos de muestra impacto renovable en SCADA. Fuente: ITE

Tal y como se ha desarrollado en el entregable E4.1, se destaca que con ambas fuentes de energía podría cubrirse un porcentaje de energía del proceso; según los escenarios analizados de, como mínimo, un 20% de la energía pero que depende, en gran medida,

del momento en el que se consume, pudiendo llegar a porcentajes de autoconsumo del orden del 50 o 60 % del consumo del piloto, según el caso.

El sistema sigue un criterio de dimensionar a las instalaciones actuales para cubrir la máxima necesidad posible de energía renovable pero permitiendo modificar los datos de entrada para adecuarlos a posibles escalados o estudios particulares de diferente potencia renovable, con el objetivo de abrir nuevas vías de análisis de flexibilidad energética según patrones de consumo de proceso y distintas potencias renovables.

Al respecto se descartan algunas posibilidades analizadas como la implantación de energía solar térmica, ya que con las simulaciones desarrolladas se demuestra que su introducción en procesos industriales está condicionada a asegurar su compatibilidad con las dinámicas térmicas del proceso y el análisis de su funcionamiento práctico y método de integración. En este sentido, tal y como se ha detallado en el punto 2.3.1 del entregable E3.1, se descarta un mayor desarrollo de la solución por el bajo impacto que se conseguiría, tal y como se justifica en dicho punto apoyado en los resultados de la simulación de integración renovable. El motivo de descarte se fundamenta en que, tras el desarrollo del modelo energético y la variación de parámetros de simulación del sistema solar como el caudal recirculado, el área de captación solar, y la longitud de los tubos del intercambiador, no se refleja en mejoras apreciables de la energía requerida por el reactor del proceso.

2.8 Resultados de aplicación para el tratamiento de aguas residuales industriales

Se ha realizado una comparativa entre carbones comerciales y el carbón de CIRCULARCARBON, para el tratamiento de aguas residuales industriales de la industria cerámica y petroquímica.

Industria Cerámica

El contaminante objeto de análisis de viabilidad de su eliminación es el boro, elemento común en las aguas residuales de esta industria; y por tanto objeto de aplicación del carbón de CIRCULARCARBON.

En la siguiente figura se muestra la capacidad de adsorción tanto para el carbón activo comercial como para el circular. En el eje vertical se representa el cociente entre la concentración de salida y la concentración de entrada y en el horizontal, el tiempo de ensayo en horas. Las conclusiones obtenidas se encuentran a continuación:

- La curva de adsorción de los dos carbones activos ensayados tiene un comportamiento similar en forma de S.
- El rendimiento del carbón activo circular muestra el punto de ruptura una hora más tarde que el comercial, por lo que su rendimiento y capacidad de adsorción es mayor.

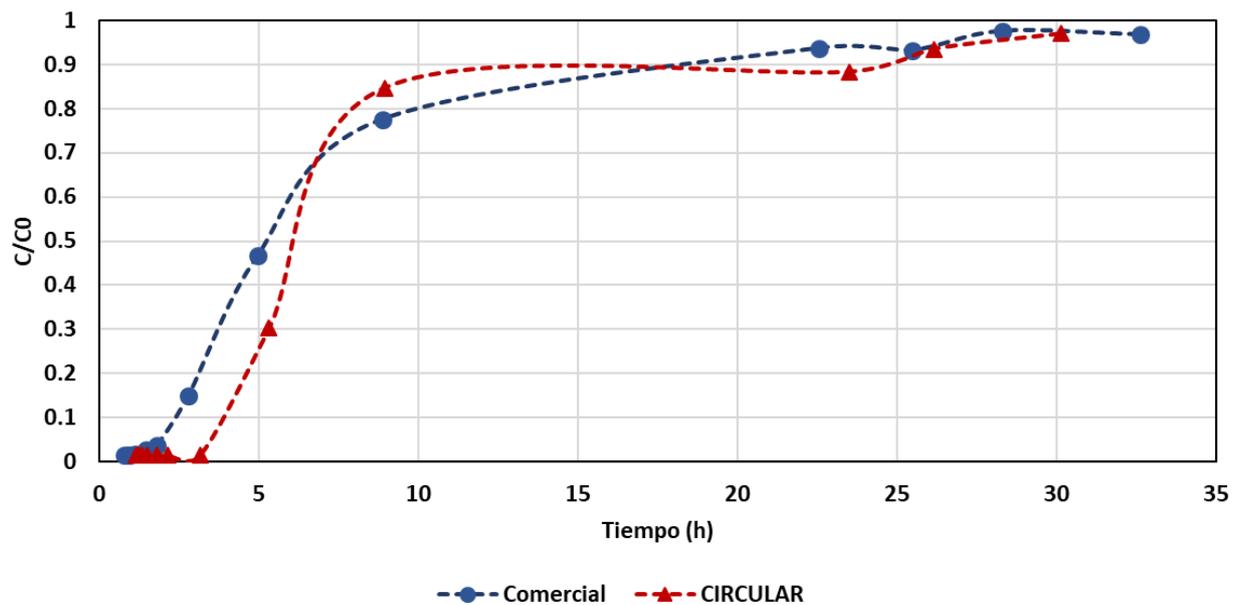


Figura 14. Curvas de adsorción para el carbón activo comercial y CIRCULARCARBON del demostrador de aguas

En la siguiente tabla se muestra la capacidad de adsorción de Boro en los carbones activados ensayados. En la misma se observa que el carbón de CIRCULARCARBON tiene una capacidad de adsorción ligeramente superior al carbón comercial, aunque en ambos casos su capacidad de adsorción es muy reducida.

Tabla 18. Capacidad de adsorción de Boro de los carbones activados

Capacidad de adsorción	Comercial	CircularCarbon
Capacidad adsorción (mg B/g CA)	0.02	0.10
Capacidad adsorción normalizada (mg B/g CA)	0.03	0.10

Industria Petroquímica

El contaminante objeto de análisis de viabilidad de su eliminación de los hidrocarburos ligeros como los aceites y grasas, elementos comunes en las aguas residuales de esta industria; y por tanto objeto de aplicación del carbón de CIRCULARCARBON.

En la siguiente gráfica se observa el comportamiento de ambos carbones estudiados, el comercial y el de CIRCULARCARBON. Las curvas de adsorción para ambos carbones se representan en la siguiente figura. En la misma se muestra como ambas curvas tienen un comportamiento similar en el tiempo. Sin embargo, el carbón de CIRCULARCARBON alcanza el valor del 20% de saturación en tiempos ligeramente superiores al carbón comercial.

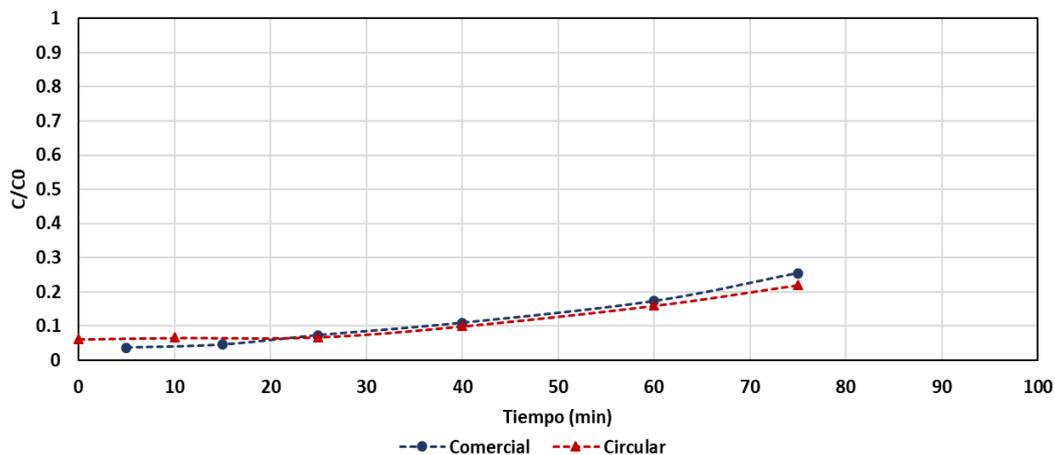


Figura 15. Curvas de adsorción para el carbón activo comercial y CircularCarbon de aceites y grasas

Finalmente, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** siguiente se muestra la capacidad de adsorción de los Aceites y Grasas (hidrocarburos ligeros), presentes en las aguas residuales de la industria petroquímica, que tienen los carbones activados ensayados y su capacidad normalizada según el contenido de cenizas. En la misma se observa que el carbón desarrollado en CircularCarbon para tratamiento de aguas tiene una capacidad de adsorción superior al carbón comercial y que el contenido en cenizas no influye significativamente en su capacidad.

Tabla 19. Capacidad de adsorción carbón activo obtenido en CircularCarbon

Capacidad de adsorción	Comercial	CircularCarbon
Capacidad adsorción (mg AG/g CA)	1.12	1.68

Comparativa de carbones del carbón comercial empleado (CAR_AGUA_CC) y el carbón de CIRCULARCARBON (MOD_28):

Tabla 20. Comparativa carbón activado comercial y obtenido en CircularCarbon

CARBÓN	Parámetros texturales				Parámetros fisico-químicos				
	S_{het} ($m^2 g^{-1}$)	Tipología de isoterma *	V_{mic} ($cm^3 g^{-1}$)	S_{ext} ($m^2 g^{-1}$)	Humedad (%)	Cenizas (%)	Densidad* ($kg m^{-3}$)	Morfología	pH
CAR_AGUA_CC	789	I-IV	0,21	357	2,8	12,6	490	Granular	10
MOD_28	728	I-IV	0.23	262	13,8	2	180	Granular	10,3

Este carbón comercial presenta un carácter básico con un pH de contacto de 10,03 y un punto de carga cero (PZC) de 8,2; tiene una isoterma de adsorción de nitrógeno de tipo I-IV, lo que indica la presencia de micro- y mesoporos en su estructura y un contenido de cenizas 12,6% típico de carbones bituminosos.

La diferencia entre ambos carbones son la presencia de cenizas y la densidad, donde se ha visto que el contenido en cenizas no altera los resultados y que una densidad menor hace más efectivo el carbón de CIRCULARCARBON, dado que hace falta menos contenido de carbón activo para eliminar la misma cantidad de boro y/o aceites y grasas.

En la siguiente tabla se muestra el resultado a modo de las conclusiones de la viabilidad de la aplicación del carbón activo desarrollado en CIRCULARCARBON para tratamiento de aguas residuales industriales.

Tabla 21. Capacidad de adsorción de Aceites y Grasas de los carbones activados

Capacidad de adsorción	Comercial	CircularCarbon
Capacidad adsorción (mg AG/g CA)	1.12	1.68
Capacidad adsorción normalizada (mg B/g CA)	1.28	1.71

2.9 Resultados de aplicación para el tratamiento de los gases industriales

Aquí también se ha procedido a realizar una comparativa entre el carbón activo comercial y el desarrollado en CIRCULARCARBON y evaluado sus rendimientos.

En la prueba llevada a cabo se compara el comportamiento de la adsorción de los dos carbones para diferentes compuestos de interés. Para ello se ha representado la evolución con el tiempo del cociente C/C_0 en la figura 29.

Los compuestos de interés han sido gases orgánicos individuales y el Carbón Orgánico Volátil Total (COVT). Este último parámetro se define como suma de los compuestos individuales considerando el número de carbonos de cada compuesto. En el eje vertical de cada gráfico se ha representado el cociente entre la concentración de salida y la concentración de entrada del compuesto de interés en el reactor mientras que en el eje horizontal se muestra el tiempo de ensayo en horas.

De la observación de la figura siguiente se deduce los siguientes puntos:

- El comportamiento de la adsorción de los dos carbones utilizados difiere en función del gas analizado. Se pueden diferenciar tres grupos de comportamiento. El primer grupo incluye solamente al etano. El segundo al eteno y el propano mientras que el tercer grupo incluye tres parámetros el hexano, el formaldehído y los COVT.
- En el caso del etano, las curvas de adsorción para ambos carbones presentan una pérdida de rendimiento paulatina durante las cuatro primeras horas de test. Ambas curvas de adsorción se estabilizan en torno a un rendimiento del 20%. El carbón comercial presenta un peor rendimiento que el carbón circular.
- En el caso del eteno y del propano, los resultados obtenidos no permiten extraer ninguna conclusión respecto a la capacidad de adsorción de los carbones activados estudiados.
- Los parámetros de la tercera agrupación (hexano, formaldehído y COVT) muestran unos resultados de adsorción similares en cuanto a su forma y presentan rendimientos de adsorción que se sitúan por encima del 50%.
- Las curvas de adsorción del hexano tienen un comportamiento en forma de ese similar al etano, pero, en este caso, la estabilización de rendimiento se produce sobre el 70% en el caso del carbón comercial y el 60% en el caso del carbón circular.

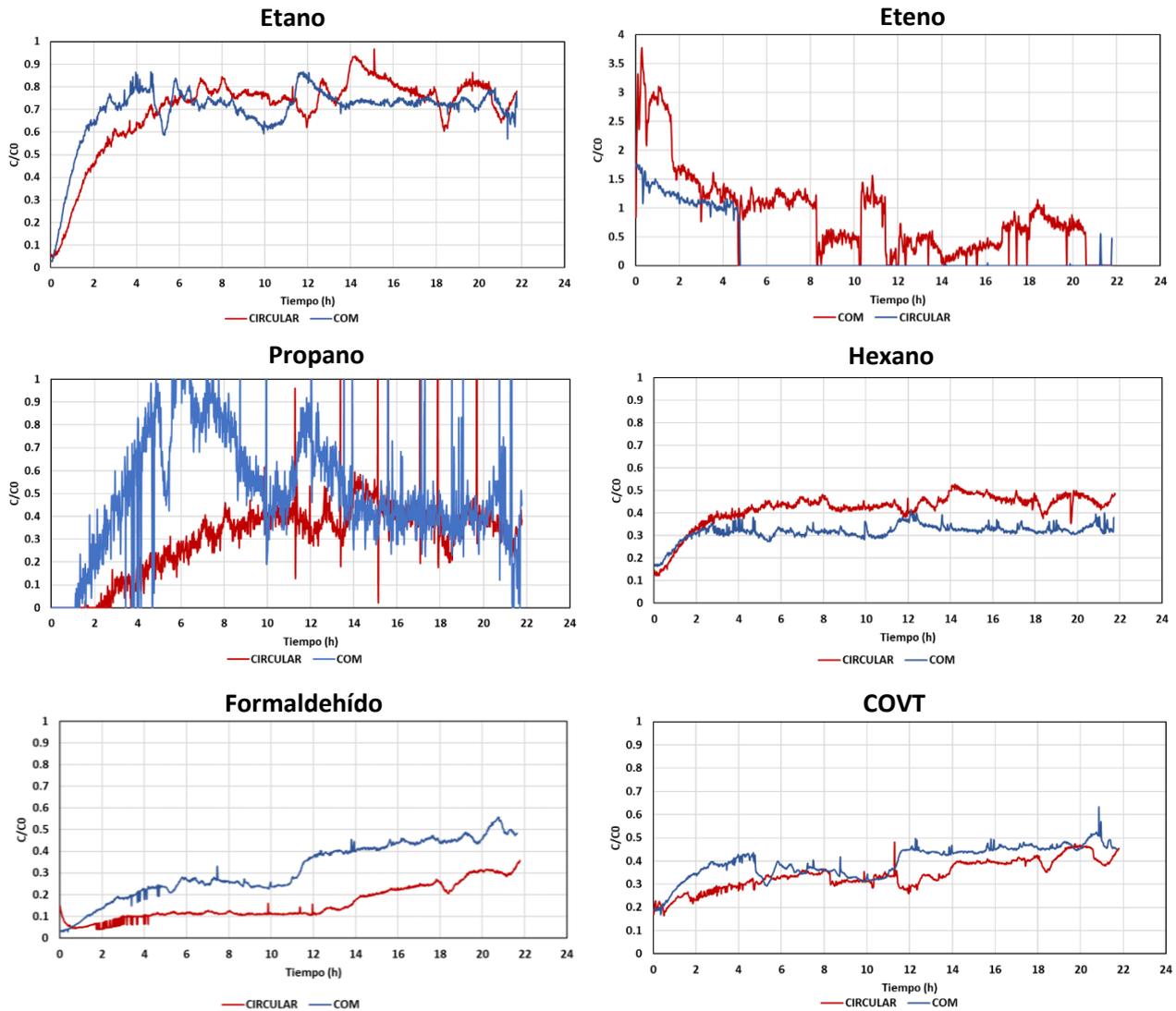


Figura 16. Curvas de adsorción para el carbón activado comercial y CIRCULAR para los COVs analizados

- En cuanto al formaldehído, las curvas de adsorción de ambos carbones presentan una menor pendiente comparados con los compuestos previamente comentados. Ambas pendientes son crecientes en el tiempo. El rendimiento mostrado por el carbón circular es mayor al mostrado por el carbón comercial.
- Finalmente, en el caso de los COVT se observa que el comportamiento de adsorción a lo largo del ensayo es similar para ambos carbones, aunque el carbón comercial presenta un rendimiento ligeramente inferior comparado con el carbón circular.

En la Tabla 22 se han recopilado los tiempos correspondientes de las curvas de adsorción para ambos carbones. En este caso, debido a las condiciones limitantes de las pruebas industriales, se ha seleccionado como tiempo de ruptura el valor de 0.2 entre el cociente de la concentración de salida y la inicial. También se ha añadido el valor de 0.5 en los casos donde dicho dato estaba disponible.

Tabla 22. Tiempo de ruptura 0.2 y 0.5 de los carbones estudiados

Compuesto	Carbón comercial (CAR_GASES_CC)		Carbón circular (mod_05)	
	t0.2 (h)	t0.5 (h)	t0.2 (h)	t0.5 (h)
C ₂ H ₆ (Etano)	0.46	1.2	0.86	2.1
C ₂ H ₄ (Eteno)	NA	NA	NA	NA
C ₃ H ₈ (Propano)	1.76	3.3	4.86	NA
C ₆ H ₁₄ (Hexano)	0.51	NA	0.80	NA
CH ₂ O (Formaldehído)	3.50	NA	14.90	NA

En la tabla anterior se observa de forma sencilla la diferencia existente en la capacidad de adsorción de los carbones estudiados para cada uno de los compuestos de interés. El valor de t0.2 del carbón circular es superior al del carbón comercial en todos los casos. Por su parte, en la figura siguiente, se han representado de forma gráfica las capacidades de adsorción en unidades diferentes: en miligramo de compuesto adsorbido por gramo de carbón activado.

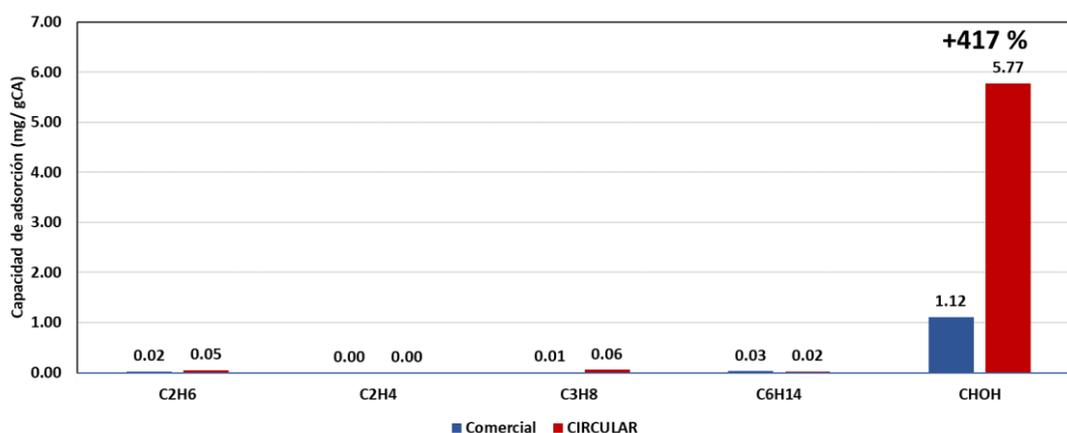


Figura 17. Capacidades de adsorción para el carbón activo comercial y el circular

De la figura anterior se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La capacidad de adsorción para los hidrocarburos analizados por el sistema de monitorización es mínima para ambos tipos de carbones estudiados. No obstante, es importante recordar que la capacidad de adsorción máxima depende directamente de la concentración de entrada de cada compuesto, según lo expuesto en el entregable E2.1, por lo que el hecho de que la concentración de hidrocarburos no sea elevada tiene una enorme influencia en este resultado.
- En el caso del formaldehído los resultados difieren del mostrado por los hidrocarburos. En este caso, la capacidad de adsorción es significativamente superior al resto de compuestos orgánicos. El carbón comercial presenta una capacidad de adsorción de 1.12 mg CHOH/g CA, frente a los 5.77 mg CHOH/g CA obtenidos por el carbón circular. Este hecho representa un porcentaje de capacidad de adsorción superior de 417% del carbón desarrollado en este proyecto frente al carbón comercial.

Parte de los resultados obtenidos hasta el momento pueden estar influenciados por el hecho de que los carbones comparados en este trabajo presentan propiedades diferenciadas tanto en el caso de los parámetros texturales, como en el caso de los parámetros fisicoquímicos. Al ajustar la comparación realizada mediante la normalización del resultado en función del contenido en cenizas que presenta cada uno de los carbones estudiados, se obtiene la figura siguiente:

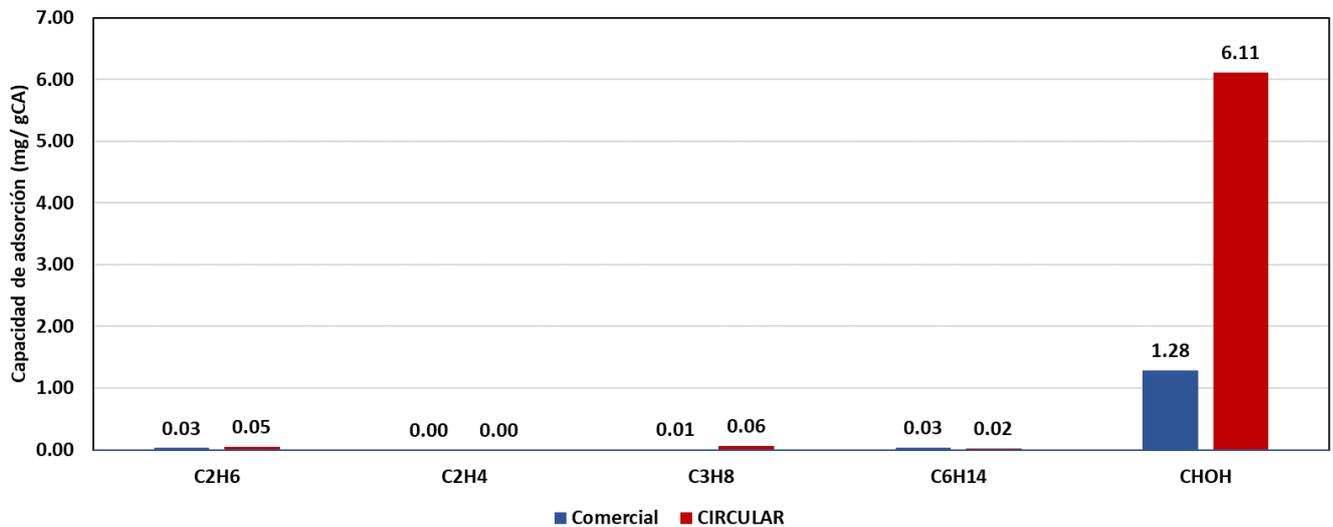


Figura 18. Capacidades de adsorción normalizadas para el contenido en cenizas para el carbón activo comercial y el circular

El contenido en cenizas, que puede ser considerado como material no activo, no influye significativamente en la capacidad de adsorción máxima de los carbones activados estudiados. No se ha estudiado en detalle la influencia del resto de características diferenciadoras de ambos carbones y no se ha podido determinar la causa de la diferencia de rendimiento que presenta cada carbón. Este objetivo puede ser tratado en investigaciones posteriores.

Además de los compuestos orgánicos, la composición de la corriente de entrada en el reactor industrial presenta elevadas cantidades de azufre en forma de SO_2 . En las pruebas industriales realizadas con el carbón circular, se ha observado que la capacidad de adsorción de este compuesto ha sido máxima a lo largo del tiempo de realización del ensayo, es decir, la concentración de SO_2 a la salida del reactor era igual a cero. Estos resultados muestran que el carbón circular es capaz de retener este compuesto en las condiciones de realización de los ensayos. No obstante, el alcance del trabajo realizado no ha permitido la investigación en profundidad de este fenómeno y su implicación ambiental y económica.

Obtención de isotermas de adsorción

La campaña de ensayos industriales llevada a cabo ha permitido igualmente obtener la isoterma de adsorción del formaldehído. Así, es posible conocer la capacidad de adsorción del carbón circular en función de la concentración inicial del contaminante de interés.

La isoterma de adsorción se define como la capacidad de adsorción del carbón activado sin variaciones de temperatura. En la figura siguiente se muestra la isoterma de adsorción del carbón activo circular para el formaldehído a tres rangos de concentración. Como se observa, la capacidad de adsorción del carbón circular aumenta con la cantidad de formaldehído hasta alcanzar una asíntota a concentraciones elevadas. El comportamiento mostrado por este carbón tiene una forma similar a la recogida en la bibliografía para este tipo de adsorbentes.

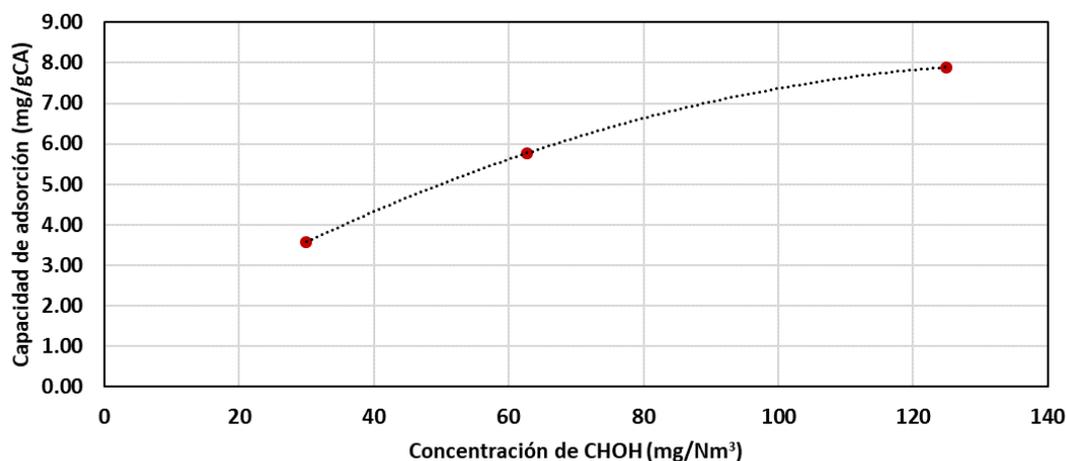


Figura 19. Isoterma de adsorción del carbón activo circular para el formaldehído

Si se realiza el ejercicio de comparan las capacidades de adsorción máxima obtenida para el formaldehído entre el carbón comercial evaluado durante la validación y el carbón circular en el entorno industrial, se observan diferencias significativas. Sin embargo, este comportamiento puede estar muy influenciado por la temperatura de trabajo en cada caso (30°C en el caso del carbón comercial en la validación, 60°C en el caso del carbón circular en la industria). **Por lo tanto, es posible afirmar que el carbón circular presenta una mejor capacidad de adsorción que el carbón comercial, aunque no es posible cuantificarlo de forma adecuada.** Por otro lado, la baja concentración inicial que presentan otros compuestos orgánicos estudiados no ha permitido extender el estudio de las isothermas de adsorción asociadas a los mismos.

2.10 Resultados globales y conclusiones

A modo de síntesis se enumeran los resultados y conclusiones obtenidas a raíz del desarrollo con éxito del proyecto CIRCULARCARBON, que pueden contribuir a contribuir a mejorar la competitividad de las empresas de la Comunitat Valenciana:

- **Procesos prototipo piloto innovadores creados** que aportan nuevas capacidades para la generación y uso de Carbones Activos desde el punto de vista de la experimentación para hacerlos más sostenibles y aplicables:
 - o Generación de cadenas de carbón y CA por medio de proceso pirolizador innovador
 - o Uso de CA para producción de componentes de baterías de valor añadido
 - o Uso de CA para aplicaciones medioambientales sostenibles
- Implementado y validado un **reactor de pirolisis lenta** CIRCULARCARBON para desarrollo del proceso de obtención de carbones, que hasta la actualidad se ejecutaba a escala de laboratorio, a una escala cuasi semi-industrial, acercando el proceso más a los procesos que se llevan a cabo en la industria. Cabe mencionar que los rendimientos del proceso a escala piloto y a escala de laboratorio son del mismo orden (~20% char) por lo que la extrapolación a una escala mayor del proceso ha sido satisfactoria. El piloto además permite trabajar con una alimentación de biomasa desde 1 a 5 kg/h. Además, mediante el trabajo con la planta piloto de CIRCULARCARBON, se recuperan los tres productos que se producen en el proceso de carbonización de biomasa: biochar, bio-aceite y biogás.
- Desarrollo de pruebas con materiales carbonosos obtenidos e integrarlos en la **formulación de electrodos para baterías sustituyendo materiales críticos como el grafito**. Los carbones producidos en la planta de pirolisis se han utilizado en el desarrollo de electrodos para baterías de Li por técnicas avanzadas como la molienda de alta energía y la impresión por serigrafía. Tanto los electrodos como las celdas que componen las baterías, se han de preparado utilizando la caja de guantes integrada en el laboratorio de CIRCULARCARBON a este propósito, lo cual contribuye a mejorar el grado de innovación de los desarrollos de componentes de baterías de nueva generación
- Durante el proyecto CIRCULARCARBON también se han desarrollado **carbones activados a partir de astilla de pino** con especificaciones similares a las de carbones activados comerciales de referencia para tratamiento de aguas y gases.
- Generación de **capacidades de análisis energético y de sostenibilidad** de los procesos de fabricación de carbones activos y del entorno controlado de fabricación de electrodos para baterías a partir de CA. Por la parte de generación de carbones activos se genera un **método de análisis de obtención de un indicador de producción de manufactura de carbones activos** que enlaza la cantidad de producto principal a obtener respecto a su consumo energético (**kWh/kgCA**). Este indicador se desarrolla de manera automática en cada proceso de fabricación (ensayo) por parte del sistema de monitorización y análisis energético diseñado. También se

destaca que para la mejora de este indicador es viable la integración de energía renovable eléctrica y se descarta la aplicación de solar térmica. En la fase de fabricación de electrodos se destaca el **alto coste energético de mantenimiento controlado del entorno ambiental inerte de manufactura**.

- Se desarrolla un **método de analítica energética digital** apropiada para los procesos mencionados que permite analizar en continuo el comportamiento energético respecto a la producción llevada a cabo. Este método se diseña y desarrolla en un entorno digital a modo de **sistema IIoT y SCADA de análisis energético digital**, desde nivel de campo a nivel de información, siguiendo el arquetipo de la Industria 4.0. que le otorgan al sistema altas capacidades, además de la analítica implementada, de interoperabilidad, comunicaciones y escalabilidad.
- Procesos de **tratamiento medioambiental** mediante la utilización de carbones activados **aplicados a corrientes de agua y de gases** procedentes de la industria.
 - Los resultados obtenidos **en la aplicación sobre tratamiento de aguas** han sido los siguientes:
 - Se ha logrado poder dimensionar y diseñar **reactores de tratamiento de aguas con carbón activo** capaces de depurar volúmenes de aguas residuales industriales específicos como el del sector cerámico y petroquímico.
 - Se ha hecho el montaje de tal forma que se puede monitorizar caudales, velocidades y alturas de lecho, lo que permite adecuar los reactores a las necesidades identificadas, tanto por volúmenes de agua a tratar como por rendimientos de tratamientos.
 - Se ha puesto en marcha un sistema donde se pueden comparar la eficacia de diferentes carbones activos para el tratamiento de aguas, y en especial para la eliminación de contaminantes claves de las industrias analizadas.
 - Se ha validado la viabilidad de aplicar carbones activos generados a partir de restos de poda de pino como una alternativa funcional y de mayor rendimiento que los carbones activos comerciales para la **eliminación del boro presente en las aguas residuales de la industria cerámica**. Parámetro clave en el sector. El carbón de CIRCULARCARBON tiene una capacidad de eliminar estos contaminantes en una relación de 1,71 mg de boro por gramo de carbón de CIRCULARCARBON.
 - Se ha validado la viabilidad de aplicar carbones activos generados a partir de restos de poda de pino como una alternativa funcional y de mayor rendimiento que los carbones activos comerciales para la **eliminación de hidrocarburos ligeros (aceites y grasas) presente en las aguas residuales de la industria petroquímica**. Parámetro clave en el sector. El carbón de CIRCULARCARBON

tiene una capacidad de eliminar estos contaminantes en una relación de 1,68 mg de aceites y grasas por gramo de carbón de CIRCULARCARBON.

- Por su parte, los resultados obtenidos en la aplicación para **el tratamiento de corrientes gaseosas** han sido los siguientes:
 - Se ha diseñado y validado un demostrador para la caracterización de la aplicación de carbón activado en la depuración de corrientes gaseosas procedentes de entornos industriales.
 - El demostrador es **portable** y puede ser utilizado en laboratorio con gases sintéticos o en instalaciones industriales con corrientes de gases reales. También es **flexible** dado que permite la utilización de adsorbentes con características de forma y composición diferenciadas (diferentes tipos de adsorbente (zeolitas, polímeros, gel de sílice) o de materiales carbonosos (carbones activos, biochar, composites, etc.). Es demostrador es **adaptable** para el estudio de compuestos de diferente naturaleza (orgánica o inorgánica) en función del sistema de análisis acoplado al mismo. El diseño del demostrador es **modular** y puede adaptarse a diferentes caudales y temperaturas de la corriente de gases a estudiar.
 - Se ha preparado y aplicado una sistemática de trabajo específica para corrientes de origen industrial. La metodología seguida ha permitido **caracterizar el comportamiento de adsorbentes in situ** para diferentes finalidades.
 - La sistemática de trabajo planteada en CIRCULARCARBON permite caracterizar el comportamiento de adsorbentes y compararlos entre ellos en una amplia variedad de escenarios de aplicación. Durante el desarrollo del proyecto se ha podido comparar el comportamiento de carbones en el tratamiento de emisiones gaseosas tales como el formaldehído, como compuesto orgánico volátil característico de las etapas de combustión a alta temperatura, mediante la utilización de un carbón de origen circular fabricado a partir de astilla de pino y un carbón comercial que ha servido como estándar de comparación.