

---

## Instalación demostrador CircularCarbon

---

### E3.1. Informe de Instalación del demostrador 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 (Castellón)      **C.P.:** 12006      **País:** España

Este informe se compone de 50 páginas.

Financiado por:

## **ÍNDICE GENERAL**

<b>1</b>	<b>Objetivo del documento .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Tareas instalación y desarrollo en el piloto en ITE.....</b>	<b>7</b>
2.1	Instalación de demostrador de producción de carbón activado.....	7
2.1.1	Demostrador de producción de carbón activado .....	7
2.1.2	Puesta en marcha y plan de pruebas de componentes .....	11
2.2	Instalación de demostrador de aplicación del carbón activado en baterías .....	18
2.2.1	Demostrador de aplicación de carbón activado en baterías .....	18
2.2.2	Plan de pruebas de componentes y para puesta en marcha .....	23
2.3	Análisis energético, automatización y sensórica y modelos virtuales.....	27
2.3.1	Análisis de integración renovable .....	27
2.3.2	Diseño de modelo de simulación de integración solar térmica en el proceso de pirólisis	31
2.3.3	Sistema IIoT energético .....	36
2.3.4	Usos y beneficios potenciales del sistema digital de análisis energético .....	42
<b>3</b>	<b>Tareas instalación y desarrollo en el piloto en ITC.....</b>	<b>44</b>
3.1	Instalación de demostrador de aplicación de carbón activado en tratamiento de agua.....	44
3.2	Instalación de demostrador de aplicación de carbón activado en tratamiento de gases .....	48
<b>4</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>50</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: imágenes del reactor ubicado en piloto. Fuente ITE.</i>	7
<i>Figura 2: Diferentes vistas del reactor.</i>	8
<i>Figura 3. Estufa de presecado de biomasa adquirida e instalada. Fuente: ITE</i>	11
<b>Figura 4. Ubicación de reactor en ITE. Fuente ITE</b>	11
<i>Figura 5. Curvas de temperatura prueba completa reactor. Fuente: ITE</i>	14
<i>Figura 6. Desmontaje y comprobación de funcionamiento de los distintos elementos de la planta del reactor durante el SAT en instalaciones del proveedor. Fuente: ITE</i>	14
<i>Figura 7. Imagen de datos captados en ensayo reactor. Fuente: ITE</i>	15
<i>Figura 8. Esquema lógico de funcionalidad de registro de ensayos del SCADA energético. Fuente: ITE</i>	16
<i>Figura 9. Esquema de la línea fabricación e integración de componentes de celdas de baterías CIRCULARCARBON. Fuente ITE</i>	19
<i>Figura 10. Imagen de los puntos de consumo de la caja de guantes CIRCULARCARBON</i>	21
<i>Figura 11. Imagen de las casetas de gases con botellas para alimentar la caja de guantes: (A) Argon y (B) mezcla Ar/H2</i>	22
<i>Figura 12. Imagen del sistema de extracción de caja de guantes CIRCULARCARBON</i>	22
<i>Figura 13. Fotografías de la caja de guantes con el equipamiento situado en el interior antes de la colocación del panel frontal.</i>	23
<i>Figura 14. Fotografía de la caja de guantes instalada.</i>	24
<i>Figura 15. Imagen del molino de alta energía</i>	24
<i>Figura 16. Imagen de la máquina de serigrafía integrada en la caja de guantes</i>	25
<i>Figura 17. Imagen de la línea fabricación e integración de componentes de celdas de baterías CIRCULARCARBON instalada en ITE</i>	25
<i>Figura 18. Método de introducción curvas de aporte renovable. Fuente: ITE</i>	28
<i>Figura 19. Sinópticos de muestra impacto renovable en SCADA. Fuente: ITE</i>	29
<i>Figura 20. Sinóptico cálculo de huella ecológica en SCADA. Fuente: ITE</i>	29
<i>Figura 21. Modelo de simulación análisis de integración térmica. Fuente: ITE</i>	31
<i>Figura 22. Ejemplos de resultados de simulación. Fuente: ITE</i>	33
<i>Figura 23. Ejemplo de enlaces entre elementos en TRNSYS. Fuente: ITE</i>	34
<i>Figura 24. Parámetros PID para la resistencia TIC01. Fuente: ITE</i>	35
<i>Figura 25. Esquema de entradas / Salidas consideradas de simulación. Fuente: ITE</i>	35
<i>Figura 26. Cuadro de medida del sistema físico de análisis energético y ejemplo de tomas eléctricas incableado de medida y alimentación eléctrica. Fuente: ITE</i>	36
<i>Figura 27. Sistema digital análisis energético instalado en ITE y monitores de visualización. Fuente: ITE</i>	38
<i>Figura 28. Metodología general de diseño de análisis energético. Fuente: ITE.</i>	38
<i>Figura 29. Comparativa preliminar de estudio de rendimiento energético de producción de carbón activo según tecnología empleada. Fuente: ITE.</i>	39
<i>Figura 30. Tabla de seguimiento de Indicadores calculados. Fuente: ITE</i>	41
<i>Figura 31. Ejemplo de objeto en SCADA de correlación energía - emisiones. Fuente: ITE</i>	41
<i>Figura 32. Diseño esquemático de los reactores de adsorción</i>	45

*Figura 33. Imagen de la instalación del sistema de adsorción ..... 47*  
*Figura 34. Esquema del demostrador de aplicación ambiental de carbón activado para el tratamiento de gases ..... 50*

## **ÍNDICE DE TABLAS**

<i>Tabla 1. Resumen de pruebas realizadas para conformidad e instalación de reactor. Fuente: ITE</i>	13
<i>Tabla 2. Listado y tipología de puntos de medida de condiciones ambientales instalados. Fuente: ITE</i>	37
<i>Tabla 3. Resumen de las especificaciones definidas en el E.2.1</i>	46
<i>Tabla 4. Características de la configuración de los reactores de adsorción</i>	46
<i>Tabla 5. Características de las aguas residuales estudiadas</i>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## 1 Objetivo del documento

El presente documento se corresponde con el entregable “E3.1. Instalación del demostrador CircularCarbon” del proyecto CIRCULARCARBON el cual contiene los principales resultados de los trabajos llevados a cabo en el marco del paquete de trabajo “PT3. Instalación del demostrador”.

En este documento se plasman los principales trabajos de diseño de detalle e instalación del demostrador, así como las tareas de diseño y desarrollo de detalle de monitorización y los planteamientos de análisis energético del piloto.

Por claridad en la exposición, el documento se divide entre los procesos del demostrador ubicados en las instalaciones de ITC, y los procesos ubicados en las instalaciones de ITE.

## 2 Tareas instalación y desarrollo en el piloto en ITE

### 2.1 Instalación de demostrador de producción de carbón activado

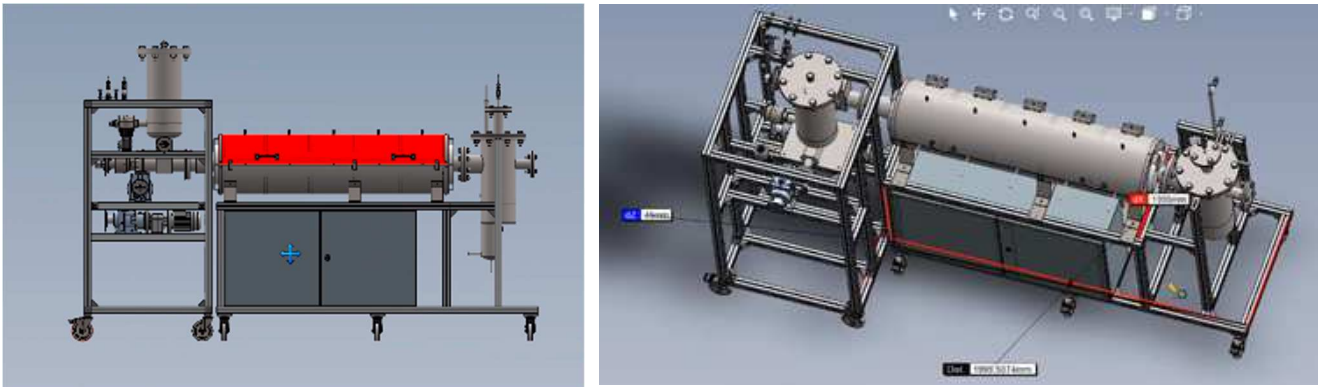
En este apartado se procederá a describir la instalación e implementación del demostrador para la obtención de carbón activo a partir de biomasa lignocelulósica en base a la tarea T2.1.

#### 2.1.1 Demostrador de producción de carbón activado

El demostrador está compuesto principalmente por un reactor donde tenga lugar el proceso de pirólisis, que se compone a su vez de un horno rotatorio que aporte la temperatura requerida, y que emplea un sistema de gases que permita trabajar en una atmósfera controlada, un sistema de alimentación por donde se introduce la materia prima a tratar, y una serie de filtros y recipientes de condensación, de forma que terminado el proceso permita separar los tres productos principales: biochar (material carbonoso), bio-oil y gas. El **reactor como planta de obtención de carbón activo mediante pirólisis lenta**, que se ha seleccionado y diseñado a partir de una serie de posibilidades tecnológicas consideradas, es el siguiente:



*Figura 1: imágenes del reactor ubicado en piloto. Fuente ITE.*



*Figura 2: Diferentes vistas del reactor.*

Se trata de un equipo compacto que engloba una tolva, a través de la cual se alimenta al reactor circular eléctrico, la cámara de reacción, una cámara de recogida de los productos, una enfriadora, elementos de medición y toda la sensórica necesaria para la operación y el control.

Los **requerimientos técnicos** iniciales de operación e instalación que se han tenido en cuenta son los siguientes:

- **Reactor de pirólisis lenta y activación de carbón para revalorización de biomasa. Reactor cilíndrico horizontal con alimentación en modo continuo.**
- La **planta estará controlada y monitorizada** con un sistema de control automático y computacional. Se tiene acceso a monitorización en continuo de multitud de variables operativas, entre ellas las de caudal de salida de gases y del caudal másico de entrada.
- El **sistema de monitorización** adquiere multitud de variables operativas del sistema. Que pueden ser visualizadas en el sistema SACADA y adquiridas desde el sistema digital e IIoT del laboratorio.
- **Alimentación nominal de hasta 5 Kg/h (según densidad de biomasa).**
- **Partículas de entrada hasta 30mm**
- Máxima operación de control de temperatura de reactor **hasta 950°C**
- **Recogida de productos desde diversas ubicaciones** de la etapa de salida del sistema según tipo de fracciones elaboradas: sólido, bioaceite, y biogás.
- La unidad es de fácil **transporte y operatividad.**

Estas especificaciones son necesarias para poder implementar funcionalidades críticas en la operación del piloto de laboratorio propuesto, lo que lo hace un equipo muy específico. Estas funcionalidades son las siguientes:

- Disponer de un proceso de pirólisis de biomasa y otro de activación del carbón obtenido en la etapa previa, que requieren de diferentes atmósferas, en una misma estructura de reacción



termoquímica y de gasificación en la que puedan suceder las 2 etapas operativas y con la posibilidad de control total de la extracción de sub productos y residuos en todo momento.

- Flexibilidad de extracción de productos.
- Alta versatilidad de uso de tipo de biomasa y productos por ser un equipo de experimentación y caracterización. Funcionamiento de equipo en continuo con una dosificación y extracción automática con una alimentación hasta cierta cantidad máxima fijada entre 1 y 5 Kg/h.

En todo momento se ha pensado en el diseño del equipo en que pueda extrapolarse, en su momento, a un despliegue de equipo con enfoque “industrial”: redimensionado de componentes operativos, admisión continua, necesidad de alguna etapa adicional, etc.) que se consideren que sean reconocibles en las especificaciones del proceso.

Como **conclusión a la selección de la tecnología de revalorización y su diseño** se destaca que se ha realizado una búsqueda, tanto a nivel nacional como internacional, de empresas que pudieran suministrar al proyecto la tecnología descrita. En este sentido se buscan más proveedores con los que obtener un planteamiento similar y no se encuentran debido a que, pese a trabajar en el sector de revalorización de biomasa y/o producción de carbón activo, sus tecnologías disponibles no cubrían las necesidades y no han podido suministrar las características propias del equipo buscado por:

1. Disponer de opciones demasiado ligadas a una pirolización y activación en procesos de laboratorio en alimentación por lote, sin opción de alimentación en continuo, y sin extracción de residuos tan versátil como la necesitada
2. Disponer de tecnología industrial con producciones menos flexibles en tipología, de mayor volumen productivo y menor versatilidad de operación.

Lo cual justifica la selección del proveedor con el que finalmente se lleva a cabo la contratación de este equipo, dadas sus particularidades.

Para ubicar y dar operativa al reactor se ha hecho necesario desarrollar y poner en marcha una serie de **instalaciones auxiliares** que son las siguientes:

- Líneas de gas: N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y Aire
- Línea de venteo:

La línea de venteo necesaria para evacuar los gases generados el extractor que dispone de orificio de extracción al exterior y conductos necesarios desde reactor hasta la salida al exterior, y desde el exterior hacia azotea,

- Extracción de seguridad:

Esta extracción, en forma de campana encastrada en techo técnico se ubica en la parte superior del equipo para cubrir la zona de reactor y de gases producidos (separación y condensación), es necesaria por seguridad ante posibles escapes de gases y para renovar el aire de la sala. .

- Requerimientos eléctricos

La acometida para la alimentación de la parte de potencia del reactor cubre con las necesidades trifásicas a 380V y con una intensidad de hasta 63A

- Requerimientos de ambientales de sala:

La sala debe mantener unas condiciones ambientales respetando los rangos indicados por el proveedor, relativos a temperatura y humedad relativa, y se dispone de sensores de T y H para medir estos valores ambientales en el laboratorio.

- Requerimientos auxiliares:

REQUERIMIENTOS AUXILIARES			
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	MAX. DISTANCIA A LA PLANTA (m)
1	Líquido refrigerante para el <u>chiller</u> (ETILENGLICOL)	1-3 L*	
2	Conexión de ethernet para mantenimiento remoto		2 m

La conexión física de comunicaciones del sistema se realiza hacia la red dedicada Ethernet del laboratorio.

- Conexión hacia sistema IIoT:

Todos los datos considerados relevantes del reactor son recogidos por el sistema IIoT de adquisición y centralización de datos.

- Línea de pre secado de materia:

Se adquiere un sistema de secado de materia de biomasa, necesario para realizar el presecado inmediatamente previo a la introducción de materia prima al reactor, debido a la necesidad de trabajar en una reacción con la mínima humedad posible.



Figura 3. Estufa de presecado de biomasa adquirida e instalada. Fuente: ITE

### **Ubicación de reactor en la sala**

La ubicación del reactor para el proceso de pirólisis en la sala se ha realizado de la siguiente manera, atendiendo a los requisitos del fabricante y la disponibilidad de espacios:

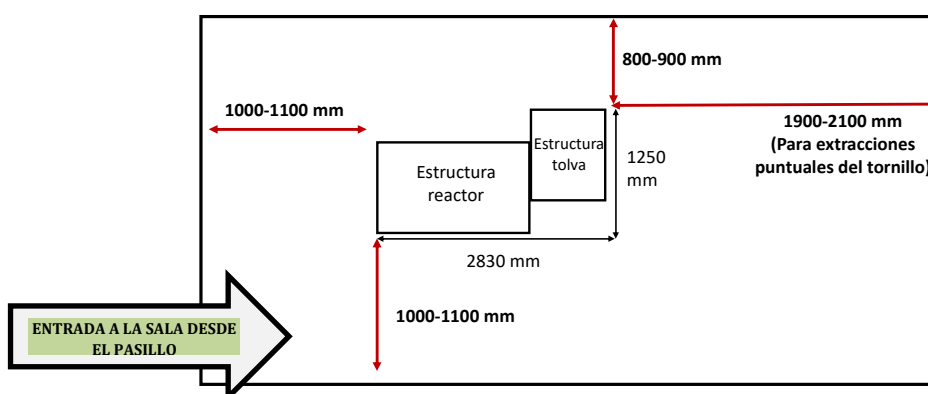


Figura 4. Ubicación de reactor en ITE. Fuente ITE

### **2.1.2 Puesta en marcha y plan de pruebas de componentes**

Una vez se han recibido los dispositivos seleccionados para la instalación del demostrador de producción de carbón activado, se ha realizado la prueba de manera individual de los componentes de medida. La instalación del sistema se realiza acorde con el diseño planteado.

Se ha elaborado un plan de pruebas ajustado a las necesidades de cada proceso que en posteriores etapas se ejecuta e identifica a su finalización el correcto funcionamiento de los dispositivos que intervienen en la monitorización energética del demostrador de producción de carbón activado, y que se ejecutará durante la fase de funcionamiento de los demostradores.

En el proyecto se ha llevado a cabo la instalación y puesta en marcha de varios equipos, entre ellos de una planta de reactor de pirólisis lenta como el más representativo de ellos, por suponer la etapa principal dentro del proceso de producción de carbón activo. Dado que esta planta ha sido realizada totalmente a medida con el fin de responder a las necesidades del proyecto, ha resultado necesario asegurar el correcto funcionamiento y el cumplimiento de especificaciones a distintos niveles.

De esta manera, la puesta en marcha de los equipos y maquinaria asociados al dicho proceso se ha estructurado en los siguientes puntos:

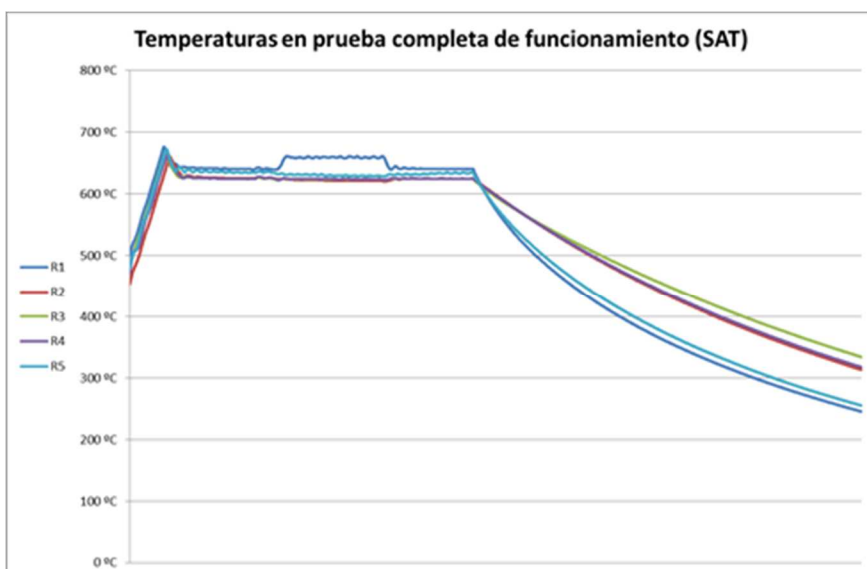
- Pruebas individuales de componentes y equipos asociados al funcionamiento del reactor de pirólisis.
- Pruebas en conjunto de funcionamiento y puesta en marcha del reactor horizontal de pirólisis junto a los componentes necesarios.
- Pruebas individuales de funcionamiento de maquinaria necesaria para el pretratamiento de materiales y equipos auxiliares.
- Pruebas de medida y comunicaciones e integración en el sistema IIoT.

Con ello, las **pruebas individuales de componentes y equipos asociados al funcionamiento del reactor de pirólisis** se han realizado tanto en las instalaciones del proveedor como en las propias instalaciones del demostrador en ITE. Las pruebas realizadas en ambos casos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1. Resumen de pruebas realizadas para conformidad e instalación de reactor. Fuente: ITE

Prueba	Descripción
Prueba de funcionamiento del sistema de admisión de biomasa	Al tratarse de una máquina que exige una versatilidad en el empleo de biomásas de distintas granulometrías y densidades, se ha comprobado que la tolva y los tornillos de alimentación al horno pirolítico horizontal funcionan correctamente. Para ello, se ha probado con dos biomásas de densidad totalmente opuesta: paja de arroz (muy baja densidad) y hueso de aceituna (muy alta densidad), asegurando con ello la funcionalidad de la máquina en todo el espectro de trabajo
Prueba de funcionamiento de motores	Se han probado por separado cada uno de los tres motores con el fin de verificar que funcionan correctamente. Esta prueba es de gran importancia porque dos de los motores permiten una regulación del caudal de entrada de biomasa según el régimen de giro, y el tercer motor favorece la homogeneidad de la biomasa de alimentación.
Prueba de funcionamiento de la bomba de vacío	La bomba de vacío es un componente auxiliar que se emplea para evitar sobrepresiones y maximizar el flujo de materia prima en la dirección deseada, minimizando con ello también el riesgo de retrocesos de flujo o gradientes de temperatura no deseados. Con ello, la validación se ha centrado en su funcionamiento y la configuración de las consignas e histéresis de funcionamiento.
Prueba de calentamiento del reactor y resistencias	El correcto control y funcionamiento de las resistencias resulta de gran importancia para la regulación y control de los procesos de transformación física y térmica, así como para la descomposición de los distintos componentes.
Pruebas de funcionamiento de los lazos de control	La planta del reactor horizontal integra un sistema de lazos de control y de seguridad automatizado para garantizar tanto el funcionamiento programado y autónomo del reactor, como la activación de alarmas y actuaciones de seguridad en caso de comportamiento anómalo de alguno de los componentes, con el fin de garantizar la seguridad del usuario.
Pruebas de comunicación y exportación de datos	Dado que el sistema se ha tenido que comunicar con un sistema digital para medir datos en tiempo real, ha sido necesario asegurar que dispone de la configuración y los elementos necesarios para ello, además de comprobar que se permite la exportación directa de datos desde el propio software de control del equipo.

Además de lo anterior, se llevó a cabo una **prueba completa de validación de la funcionalidad de la totalidad del sistema**, mediante un experimento programado. En la siguiente gráfica se pueden comprobar las curvas de temperatura para cada una de las cinco resistencias principales, obtenidas a partir de las medidas extraídas del propio experimento mediante los sensores de control y medida que incorpora la planta:



*Figura 5. Curvas de temperatura prueba completa reactor. Fuente: ITE*

Durante las pruebas de funcionamiento de los distintos componentes de la planta se revisó el correcto funcionamiento y los métodos de montaje y desmontaje de cada uno de los elementos componentes del sistema, tal y como muestran las siguientes imágenes:



*Figura 6. Desmontaje y comprobación de funcionamiento de los distintos elementos de la planta del reactor durante el SAT en instalaciones del proveedor. Fuente: ITE*

Además de lo anterior, en ITE se han realizado pruebas de funcionamiento similares a las descritas anteriormente. Un ejemplo de ello es la siguiente imagen de calentamiento de resistencias empleando el propio software.





Figura 7. Imagen de datos captados en ensayo reactor. Fuente: ITE

Por tanto, el siguiente listado resume las pruebas que se llevan a cabo:

- Pruebas preliminares:
  - Análisis Termo-Gravimétrico (TGA): se detecta la necesidad de realizar este tipo de análisis con el fin de obtener los perfiles térmicos de la astilla de pino en distintas condiciones. Su definición y justificación se describe en mayor detalle en el E4.1
  - Determinación de especificaciones carbones para aplicaciones en baterías y tratamiento de aguas y gases, necesario para definir las especificaciones objetivo para cada carbón activo según la aplicación objetivo. Su definición y justificación se describe en mayor detalle en el E4.1
  - Pre-tratamiento y caracterización de astilla de pino: Dado que será la astilla de pino la biomasa de referencia empleada para la puesta en marcha y las pruebas en el demostrador, es conveniente caracterizarla convenientemente, permitiendo obtener sus propiedades con el fin de ajustar las condiciones operativas para la obtención del carbón activo deseado. Su definición y justificación se describe en mayor detalle en el E4.1
  - Ensayos preliminares de carbonización-activación: engloba todas aquellas pruebas termoquímicas en que se realizan ensayos a menor escala para conocer las propiedades del residuo seleccionado, en este caso astilla de pino.
- Pruebas de operativa habitual del reactor: Dado que el reactor se trata de un equipo diseñado y desarrollado a medida, resulta necesario habituarse a su operativa a partir de los conocimientos adquiridos durante los procesos de validación del diseño y puesta a punto, resultando en las siguientes pruebas:
  - Preparación de biomasa o material de entrada: dada la versatilidad del reactor, resulta necesario realizar pruebas y un calibrado específico para cada uno de los materiales de

entrada a éste, según el tipo de biomasa. No obstante, en el marco del proyecto CircularCarbon dichas pruebas y preparación de condiciones se realiza con astilla de pino tal y como se ha comentado previamente, por ser un residuo lo suficientemente representativo para llevar a cabo la puesta en marcha del reactor.

- Prueba de fugas: previamente a la realización de un ciclo completo de ensayo en el reactor, se debe comprobar la estanqueidad de éste mediante la prueba de fugas.
- Preconfiguración del reactor: entre las funcionalidades del reactor, existe la posibilidad de precalentar de manera programada (entre otras muchas acciones)
- Realización de ensayo: la fase más importante como tal, en la cual se obtiene el material buscado.
- Caracterización y medida de resultados de ensayo: tras la realización de ensayo, para la comprobación del rendimiento de ensayo y las propiedades de los productos obtenidos.

Además, conviene remarcar la importancia del empleo del SCADA energético en la realización de ensayos. Así, en la fase de puesta en marcha del reactor, se ha puesto en marcha paralelamente dicho SCADA que, en concreto, incluye una funcionalidad específicamente diseñada para registrar el tipo de material de entrada, sus características, y las propiedades de producto obtenido. Dicha funcionalidad de registro permite:

- Almacenar digitalmente toda esta información, de manera sencilla e intuitiva
- Descargar, exportar y consultar dicha información
- Calcular indicadores relevantes del consumo y rendimiento energético y productivo de cada ensayo, así como almacenar información de funcionamiento de dicho ensayo para consulta y análisis de detalle posterior
- En última instancia, nutrir de datos a otras funcionalidades del SCADA representativas del funcionamiento energético y productivo del demostrador

El siguiente esquema resume la lógica de funcionamiento de dicha funcionalidad en relación a la realización de ensayos:

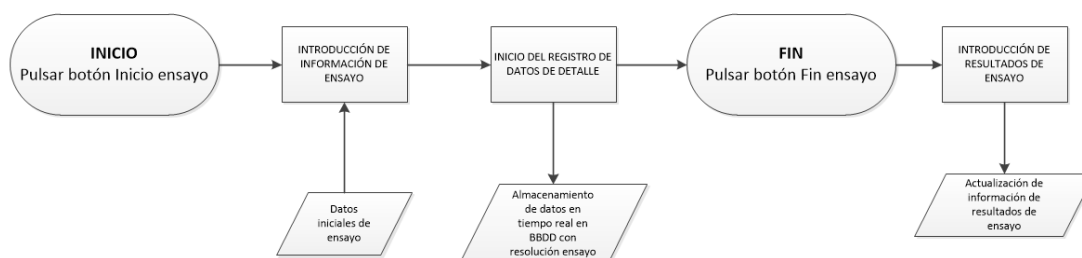


Figura 8. Esquema lógico de funcionalidad de registro de ensayos del SCADA energético. Fuente: ITE



En el apartado de descripción del diseño de SCADA se realizará una descripción en mayor detalle.

En todo caso, como consecuencia de lo anterior conviene hacer dos tipos de pruebas de integración y funcionalidad del SCADA en relación a su funcionamiento con el Proceso 1 de obtención de carbón activo:

- Pruebas de comunicación con el proceso en tiempo real y almacenamiento y representación de datos: Este sistema conecta directamente con el reactor para extraer datos de proceso, por lo que se llevarán a cabo pruebas de funcionamiento de éste.
- Pruebas de funcionalidad de ensayos: una de las funcionalidades principales del Sistema Digital IIoT es asegurar la trazabilidad energética mediante el registro de ensayos y el cálculo de indicadores y almacenamiento de información para su optimización energética. Se llevarán a cabo en consecuencia pruebas de verificación de dicha funcionalidad.

Por otro lado, el resto del equipamiento asociado al proceso se mide mediante analizadores de redes centralizados en el cuadro de medida energético, por lo que las pruebas de su correcto funcionamiento se realizan dentro del contexto de las pruebas de puesta en marcha del SCADA

## 2.2 Instalación de demostrador de aplicación del carbón activado en baterías

La presente tarea recoge los trabajos necesarios para la instalación e implementación de un sistema para el procesado y producción de electrodos de baterías solidas de litio a partir de los carbones activados obtenidos en la T3.1. Este sistema estará basado en un recinto hermético capaz de alcanzar y controlar una atmósfera seca con un contenido en H<sub>2</sub>O y O<sub>2</sub> por debajo de 10 ppm que contendrá equipamiento a escala de laboratorio para producir electrodos de baterías por la técnica de impresión digital. Las fases que contendrá este demostrador: 1) Mezcla de carbón activado junto con aditivos; 2) Preparación de tintas; 3) Deposición de tinta sobre colector de corriente por impresión; 4) Integración de electrodo junto a otros componentes en *celda pouch* (5X5 cm, unicapa); 4) Testeo de celda y evaluación de prestaciones de electrodos.

### 2.2.1 Demostrador de aplicación de carbón activado en baterías

Las celdas de litio de nueva generación conllevan el uso de materiales que se degradan en contacto con la humedad y el oxígeno tales como el litio metálico, electrolitos sólidos y líquidos, etc. Esto hace necesario que las etapas de los procesos de producción con estos materiales tengan que tener lugar en una atmósfera seca a diferencia de los métodos de producción de componentes de baterías actuales. Por otro lado, el uso de electrolitos sólidos demandas nuevas técnicas de integración de componentes alternativas a las actuales para conseguir celdas con las prestaciones adecuadas.

En este contexto, el objetivo de la de la línea fabricación e integración de componentes de celdas de baterías CIRCULARCARBON es establecer una plataforma de investigación y desarrollo en nuevas técnicas de procesado de materiales basadas en técnicas de impresión, para su uso en celdas de nueva generación.

El demostrador que se ha diseñado está compuesto por un sistema de caja de guantes de 3 cabinas que permite llevar a cabo las diferentes etapas de la cadena de valor de ensamblaje de celdas a escala laboratorio en atmósfera seca.

Como elementos innovadores del piloto diseñado cabe destacar dos puntos:

- **Utilización de métodos de impresión para el procesado de componentes de celdas**
- **Integración de estos nuevos procesos en atmósfera seca para completar toda la cadena de valor desde el material hasta la celda en estas condiciones**

El demostrador de la **línea de fabricación e integración de componentes de celdas de baterías en atmósfera inerte** que se ha seleccionado a partir de una serie de posibilidades tecnológicas en base al contexto y necesidades técnicas y estructurales ha llevado a realizar un diseño del demostrador con los diferentes elementos y dimensiones teniendo en cuenta las diferentes etapas que tienen lugar en la cadena de valor de ensamblaje de celdas de baterías. El esquemático de dicho diseño se muestra en la siguiente figura:

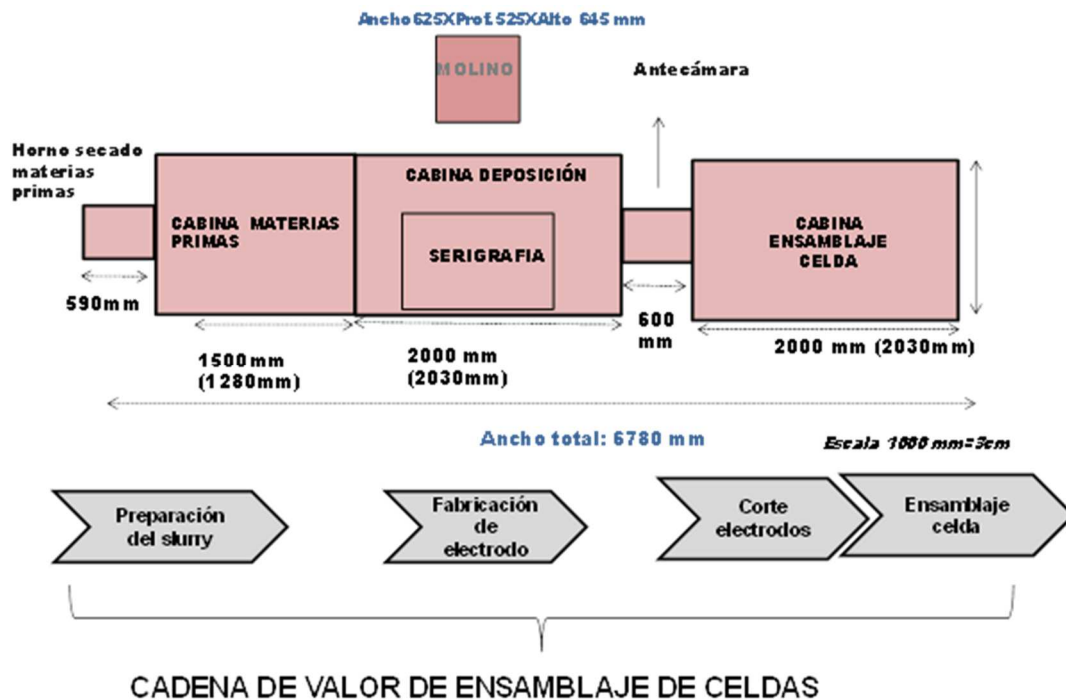


Figura 9. Esquema de la línea fabricación e integración de componentes de celdas de baterías CIRCULARCARBON.  
Fuente ITE

A continuación, se describen las diferentes cabinas que forman parte el demostrador y los procesos que se realizarán en las mismas:

### 1. CABINA MATERIAS PRIMAS

En la primera cabina se llevaría a cabo el secado de los materiales previo a la introducción de la cámara y la preparación del slurry o tintas, en cada caso adaptado las especificaciones del mismo a las necesidades de cada sistema de impresión. Para secar los materiales obtenidos procedentes del exterior de la caja de guantes, esta cámara cuenta con una antecámara que actúa también como una estufa de secado a vacío con el objetivo de eliminar la humedad y el oxígeno de los materiales previo a su introducción en la cámara. Dentro de la cámara, además de contar con equipamiento específico de laboratorio para preparar slurries tales como balanza analítica, etc. el demostrador consta de un molino de alta energía. La función de este equipo es la mezcla de los diferentes componentes que forman parte de los electrodos de una batería (activo, binder, conductor y disolvente) y conseguir el tamaño de partícula adecuado para su procesado por las técnicas de impresión. Por las elevadas dimensiones del molino esta se encuentra fuera de la caja de guantes, pero cuenta con un sistema de recirculación con atmósfera inerte para evitar que el slurry se contamine de humedad/oxígeno y otros. En esta cabina también se almacenarán reactivos necesarios para la fabricación de electrodos. Como requerimientos importantes de esta cabina se encuentran niveles de O<sub>2</sub> y humedad por debajo de 1ppm y la posibilidad de evaporar disolventes orgánicos.

## 2. CABINA DEPOSICIÓN

La tinta preparada en la cabina de materias primas sería procesada en la cabina de deposición por técnicas de impresión. Dentro de esta cámara se encuentra la máquina de serigrafía. En esta fase el slurry es depositado sobre el sustrato correspondiente y tras la deposición tiene lugar la evaporación del disolvente. Por ello todas las cabinas cuentan con un sistema de retención de disolventes orgánicos. En esta cabina se ajustarán en la maquinaria todos los parámetros de impresión para conseguir una correcta deposición.

Por razones de practicidad y con objeto de aprovechar al máximo el espacio útil, las cabinas de materias primas y de deposición estarán conectadas. Como requerimientos importantes de esta cabina se encuentra niveles de O<sub>2</sub> y humedad por debajo de 1ppm y la posibilidad de evaporar disolventes orgánicos.

## 3. CABINA ENSAMBLAJE CELDA

Finalmente, los componentes desarrollados en la cabina de deposición pasarían a la cabina 3 donde se llevaría a cabo el corte de los electrodos y su integración en celda. Las celdas montadas en esta cabina se sacarían de la cabina a través de la antecámara para proceder a su testeo. La cabina de deposición y cabina de ensamblaje están conectadas por una antecámara en T con objeto de pasar objetos entre ambas cámaras, pero también poder introducir en ambas cámaras objetos desde el exterior. En esta antecámara se procede a eliminar el oxígeno y la humedad de los objetos del exterior mediante varios ciclos de purga con Ar y vacío. Además, la antecámara central cuenta con una “miniantecámara” más pequeña para insertar objetos más pequeños y así optimizar los ciclos de purga. Como requerimientos importantes de esta cabina, mencionar que se encuentra niveles de O<sub>2</sub> y humedad por debajo de 1ppm y la posibilidad de evaporar disolventes orgánicos.

Para la implementación del demostrador CIRCULARCARBON los elementos necesarios y que se han adquirido en el marco del mismo han sido:

### ➤ Sistema de caja de guantes

La función de este equipamiento es mantener las condiciones de humedad y oxígeno necesarias para manipular y fabricar diferentes componentes de las celdas de litio

### ➤ Máquina de serigrafía

La función de este equipamiento es la deposición de tintas formadas con los diferentes materiales empleados para ello.

### ➤ Equipo de molienda ultrafina

La función de este equipamiento es el procesamiento de las tintas y conseguir especificaciones adecuadas para su deposición por técnicas de impresión

Para la adquisición del diferente equipamiento en primer lugar se determinaron las especificaciones necesarias para cada uno de los mismos.

✓ **SISTEMA DE CAJA DE GUANTES**

En base a los procesos a realizar en este sistema se definieron unas especificaciones a cumplir, relativas fundamentalmente a número y dimensiones de las cajas, equipamiento y cantidad de guantes, antecámaras necesarias, y elementos de unión y purificación.

✓ **MAQUINA DE SERIGRAFIA**

En base a las dimensiones de la caja de guantes y a las especificaciones de los electrodos a fabricar en este sistema se definieron unas especificaciones a cumplir en cuanto a integración de la impresora en el sistema inerte, área de impresión disponible, equipamiento adicional y funcionalidades de la máquina.

✓ **EQUIPO DE MOLIENDA ULTRAFINA**

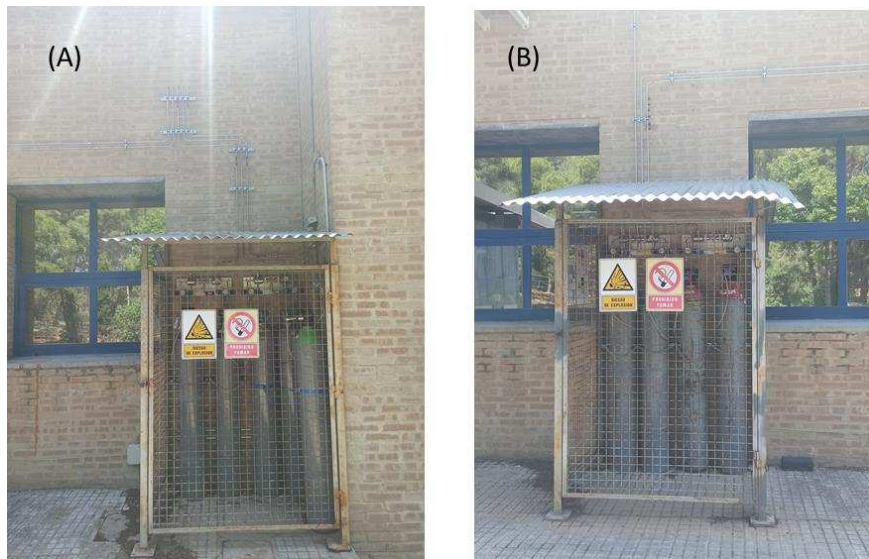
En base a las especificaciones a cumplir por la tintas para su procesado por impresión en este sistema se definieron unas especificaciones a cumplir en cuanto a granulometría, materiales con los que trabajar, características técnicas (control, carga, velocidad) y funciones adicionales, como el sistema hermético necesario para el proceso y los accesorios necesarios para su operación.

Tras la definición de las especificaciones se contactó con diferentes proveedores para la adquisición de equipos y proceder a la instalación de los mismos. Por otro lado se ha adquirido otro equipamiento de menor magnitud necesario en las diferentes etapas del proceso.

Para ubicar y dar operativa a esta línea productiva de testeo se ha hecho necesario desarrollar y poner en marcha una serie de **instalaciones auxiliares** relativas a la línea de gases, extracción, conexionado eléctrico y aire comprimido.



*Figura 10. Imagen de los puntos de consumo de la caja de guantes CIRCULARCARBON*



*Figura 11. Imagen de las casetas de gases con botellas para alimentar la caja de guantes: (A) Argon y (B) mezcla Ar/H<sub>2</sub>*

Además, se han dispuesto los sistemas de extracción necesarios para el correcto funcionamiento del equipamiento.



*Figura 12. Imagen del sistema de extracción de caja de guantes CIRCULARCARBON*



### ***2.2.2 Plan de pruebas de componentes y para puesta en marcha***

De manera similar al demostrador de producción de carbón activado, se realizó el trabajo de instalación, testeo y verificación de funcionamiento de la infraestructura de fabricación e integración de componentes de celdas de baterías en atmósfera inerte.

En este sentido las pruebas planteadas son las siguientes:

- Instalación de la caja de guantes



*Figura 13. Fotografías de la caja de guantes con el equipamiento situado en el interior antes de la colocación del panel frontal.*



*Figura 14. Fotografía de la caja de guantes instalada.*

Para la comprobación del correcto funcionamiento de la bomba de vacío se realizan ciclos de vaciado de las pre-cámaras que nos permiten introducir materiales desde el exterior al interior de la caja de guantes..

- Instalación máquina molienda ultrafina



*Figura 15. Imagen del molino de alta energía*



- Instalación máquina serigrafía



*Figura 16. Imagen de la máquina de serigrafía integrada en la caja de guantes*

Finalmente en la figura siguiente se muestran una imagen del demostrador de la línea fabricación e integración de componentes de celdas de baterías CircularCarbon instalada en ITE.



*Figura 17. Imagen de la línea fabricación e integración de componentes de celdas de baterías CIRCULARCARBON instalada en ITE*

Por último, conviene destacar que, al igual que el Proceso 1 de Producción de Carbón Activo, el Proceso 2 de Aplicación de carbón activo en baterías requiere de pruebas de comunicaciones y puesta a punto de su integración en el Sistema Digital similares:

- Pruebas de comunicación con el proceso en tiempo real y almacenamiento y representación de datos.
- Pruebas de funcionalidad de ensayos

## 2.3 Análisis energético, automatización y sensórica y modelos virtuales

### 2.3.1 Análisis de integración renovable

Para la realización del estudio de la posible integración de fuentes renovables de energía en los procesos intervinientes de revalorización se han considerado los siguientes criterios de análisis:

- A raíz del preanálisis energético y de condiciones de instalación realizado, se conviene que el consumo del demostrador es puramente eléctrico, descartando otras fuentes de suministro como el gas. Al resolver esta incertidumbre en el tipo de suministro, las soluciones aplicadas se han centrado en la generación en un análisis renovable de los balances eléctricos y el estudio de la aplicación de solar térmica para dar un aporte calorífico al sistema de calentamiento del reactor.
- Se ha verificado y habilitado la capacidad de que el laboratorio pueda conectarse eléctricamente con las instalaciones de renovables del instituto.
- Por esta razón, se ha simulado la inserción de datos y el balance horario energético de las dos tecnologías renovables más empleadas, como son la solar fotovoltaica y la eólica, con datos reales del instituto o datos derivados de ellas. Con esta base puede llegarse a valorar conectar, de manera directa o no, físicamente este tipo de instalaciones, ya habiendo determinado su viabilidad y efectividad.
- El sistema de análisis energético incluye un método propio, desarrollado a medida para este proyecto, de un análisis en continuo del balance energético renovable que es posible conseguir.
- Además, se han aplicado análisis modelando y simulando el proceso productivo y soluciones térmicas solares para apoyo al sistema de calentamiento del reactor. La energía solar térmica es ampliamente empleada para usos domésticos de baja temperatura, sin embargo, 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, detallado en el punto 2.2.3, se descarta por el bajo impacto que se conseguiría, tal y como se justifica en dicho punto.

Para analizar la integración de fuentes renovables, se consideran dos fuentes: la solar fotovoltaica y la eólica. La estimación del aporte de ambas se ha hecho en base a las instalaciones reales del Instituto Tecnológico de la Energía (ITE), esto es, una planta fotovoltaica de 50 kWn y una mini eólica de 3 kWn. Concretamente, se toma la producción horaria del año 2020 de la planta fotovoltaica y una producción de la eólica calculada a partir de unas horas equivalentes (kWh/kWn) estimadas. Es importante destacar que la capacidad que tiene el ITE para conectarse a otras fuentes de energía es una condición interesante a la hora de estudiar el grado de descarbonización del proceso.

Como concepto, lo que se pretende mostrar en el proyecto es que la integración de las energías renovables es escalable y se evaluaría a partir de las características de las instalaciones en las que sería implantado el proceso. No obstante, las curvas de generación se insertan en la aplicación mediante archivos .CSV, permitiendo estudiar diferentes escenarios a gusto del usuario (por ejemplo, escenario en el que amplio un 20% la instalación solar fotovoltaica). Se considera crucial contar con datos realistas tanto de producción como de consumo. Es decir, para la generación renovable se debe

considerar o bien lo que existe en la instalación en la que se lleva a cabo el proceso productivo (opción ideal) o bien ajustar la producción a una instalación que pudiera ser potencialmente instalada.



Figura 18. Método de introducción curvas de aporte renovable. Fuente: ITE

En cuanto al consumo, se toma el del analizador correspondiente al consumo general (total) donde transcurre el proceso. Cabe destacar que el consumo es puramente eléctrico, es decir, que finalmente se confirmó que no se necesitarían otro tipo de materias primas para producir energía (como el gas). Es por ello que la integración de fuentes de energía externas se ha focalizado en fuentes que dan como salida electricidad. A la hora de considerar el consumo, es importante que los datos sean medidos del propio proceso, no estimados.

Otra de las cuestiones que se valora para la integración de energías renovables en los procesos descritos, con el fin de hacerlos más sostenibles, es que, para llevar a cabo el propósito de integración real, había que considerar fuentes de energía renovable accesibles a las instalaciones en las que se prevé su integración. En un principio, se consideraron las tecnologías solar fotovoltaica, eólica y solar térmica. Sin embargo, esta última fue descartada tras analizar su impacto en el programa de simulación TRNSYS y ver que su rentabilidad era prácticamente nula (además de técnicamente muy compleja de integrar).

Cabe destacar que considerar la generación y el consumo totales anuales, mensuales o diarios de las dos fuentes renovables no sería realista, ya que las horas en las que se consume la energía y la que se produce son cruciales para el cálculo del aprovechamiento. Por este motivo, en el SCADA desarrollado se tiene en cuenta el balance consumo vs. producción horario, calculándose el excedente correspondiente para cada una de esas horas

En el SCADA mencionado se puede observar de manera sencilla el impacto del aporte renovable sobre el total de energía consumida, es decir, el grado de cobertura de la demanda. También se indica, considerando solo la aportación renovable, qué peso tiene cada fuente sobre la aportación total. Además, el cálculo del excedente también es automático, siguiendo la siguiente lógica:

$$\text{Balance energético (kWh)} = \text{Energía generada} - \text{Energía consumida}$$

Entonces:

- Si Balance energético  $\leq 0$ :
  - o Autoconsumo = Energía generada

- Excedente = 0.
- Si Balance energético > 0:
  - Autoconsumo = *Energía consumida*
  - Excedente = Balance energético.

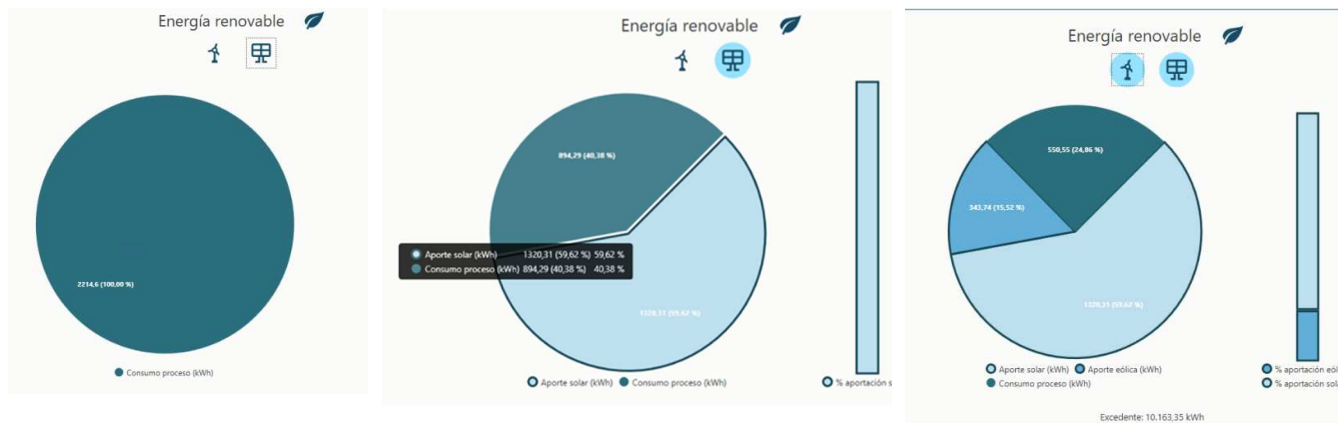


Figura 19. Sinópticos de muestra impacto renovable en SCADA. Fuente: ITE

Además de facilitar el análisis energético, el SCADA también permite conocer de manera inmediata el ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> que supone la integración de fuentes de energía renovable. Esta funcionalidad de cálculo está integrada en numerosas partes del SCADA, facilitando el cálculo de la huella ecológica.

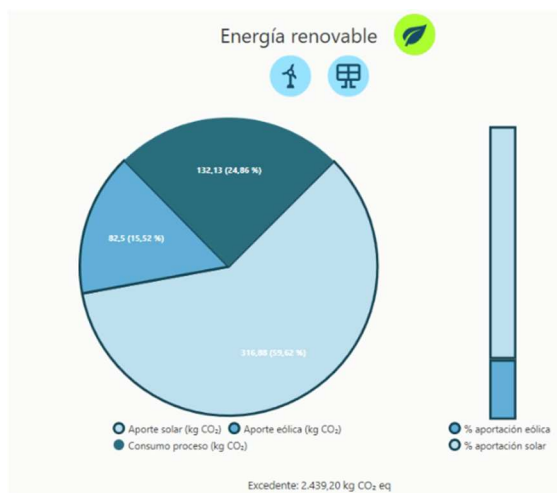


Figura 20. Sinóptico cálculo de huella ecológica en SCADA. Fuente: ITE

En las gráficas anteriores se puede observar cómo el excedente reportado es mucho mayor que todo el consumo del proceso. En este caso, se debe a que las instalaciones renovables descritas están dimensionadas para aportar energía a todo el ITE, no solo al laboratorio de CircularCarbon. Sin embargo, en instalaciones dimensionadas exclusivamente para los procesos descritos, es una forma

rápida y eficaz de evaluar cuán ajustado es el diseño para la realidad. En resumen, para llevar a cabo este desarrollo, se consideró lo siguiente:

- La integración de la energía solar fotovoltaica aportada al proceso es la del Instituto Tecnológico de la Energía (ITE), pero es perfectamente modificable a los condicionantes necesarios.
- No se considera la energía eólica que se genera en el instituto debido a detectar ciertas carencias de datos en la colección de datos para el período disponible. En este caso, y por ello, se estimó la producción a partir de la potencia de la instalación y las horas típicas disponibles para una zona en la que se ubica el ITE. No obstante, con el paso del tiempo y la nueva disponibilidad de datos, el SCADA tiene la posibilidad de actualizar los registros en base a datos reales.
- Se tiene en cuenta las horas a las que se produce y consume, obteniéndose de hecho el excedente generado.
- Se esperaría que, con ambas fuentes de energía renovable actuando, se cubriera al menos el 20% de la energía, pero depende en gran medida del momento en el que se consume. Finalmente se confirma que el porcentaje de autoconsumo posible es mucho mayor.

De todo lo anterior se derivan las siguientes conclusiones:

- El excedente de la energía fotovoltaica sirve como indicador de eficiencia medioambiental, energética y económica del proceso.
- El SCADA facilita un análisis de la huella de carbono a partir del análisis energético.
- Al consumirse una parte considerable de la energía en los períodos nocturnos por el precalentamiento del reactor, la energía eólica cobra una mayor importancia, al ser esta producida también de noche y permitir alimentar al proceso durante este período.
- Para disminuir el excedente y obtener un proceso más sostenible, sería interesante considerar la integración de baterías en el proceso.
- La integración de energía solar térmica para el proceso de revalorización de biomasa no es rentable y resulta dudosamente factible.

Se puede, por ello, concluir que el análisis de integración renovable realizado se ha llevado a cabo teniendo en cuenta la disponibilidad de una conexión ya existente en las instalaciones de ITE, así como el tipo de fuentes energéticas renovables viables y disponibles actualmente, razón por la cual, tras un análisis apoyado en técnicas de modelado y simulación, se descarta contemplar la instalación de energía solar térmica para apoyo de este proceso, una de las incógnitas a las que el proyecto da solución. Se ha desarrollado e implementado un análisis renovable continuo mediante balances horarios basados en datos reales de generación renovable y consumo del demostrador, garantizando con ello una representatividad en los datos obtenidos. Para ello, las fuentes de datos han sido los datos de generación FV de ITE, datos de generación del analizador general del demostrador, y datos de minieólica similares a los del molino en ITE, considerados bajo el criterio de dimensionar a las instalaciones actuales para cubrir la máxima necesidad posible de energía renovable (como suele ser común en los procesos productivos principales de las plantas productivas, que representan uno de los consumos base constantes de mayor peso en la factura energética) pero permitiendo modificar los datos de entrada para adecuarlos a posibles escalados o estudios particulares de diferente potencia



renovable. Para ello, el sistema SCADA ha sido diseñado para permitir actualizar estos datos y recalculer los balances energéticos de manera sencilla y todas las veces que sea necesario, permitiendo con ello abrir nuevas vías de análisis de flexibilidad energética según patrones de consumo de proceso y distintas potencias renovables.

### 2.3.2 Diseño de modelo de simulación de integración solar térmica en el proceso de pirólisis

Se ha realizado un diseño del modelo de simulación del demostrador de producción de carbón activado, con el fin de analizar el balance energético de este proceso y las posibilidades e impacto de integración de fuentes de generación renovable. Dicho modelo se ha sido llevado a cabo teniendo en cuenta las características del equipamiento y el proceso productivo.

A este respecto, a continuación, se describe el modelo planteado:

En el modelo de TRNSYS se diferencian dos escenarios: un reactor para la revalorización de biomasa con y sin apoyo energético mediante un sistema de generación de energía solar térmica. Los componentes comunes a ambos sistemas son exactamente iguales, para así saber con seguridad que la diferencia de consumo energético entre ambos escenarios radica en la integración del sistema de solar térmica.

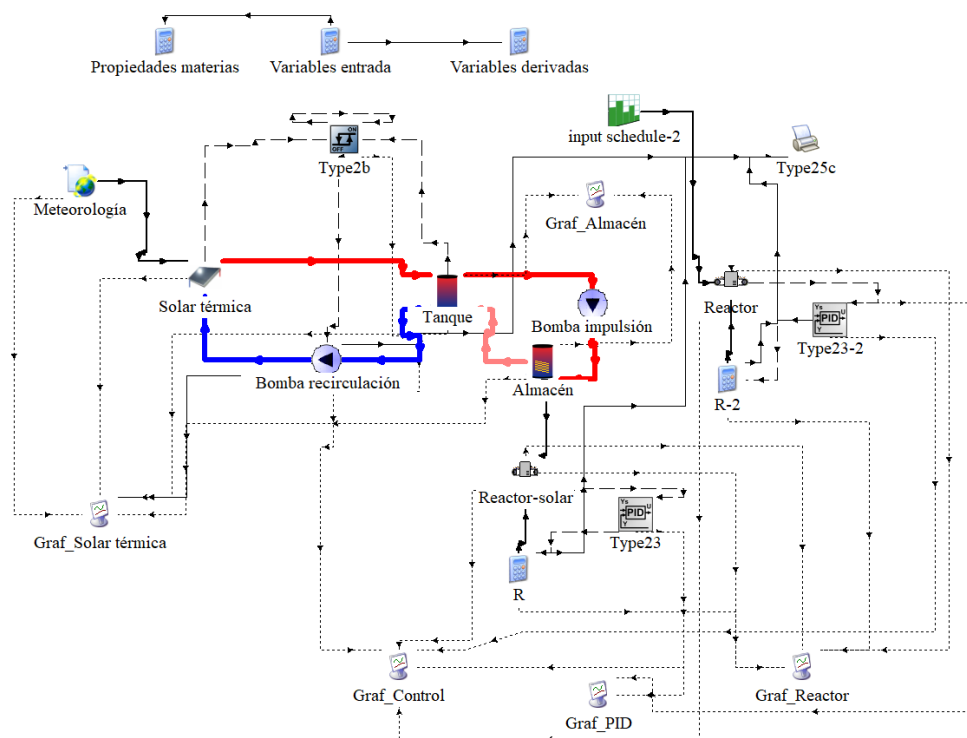
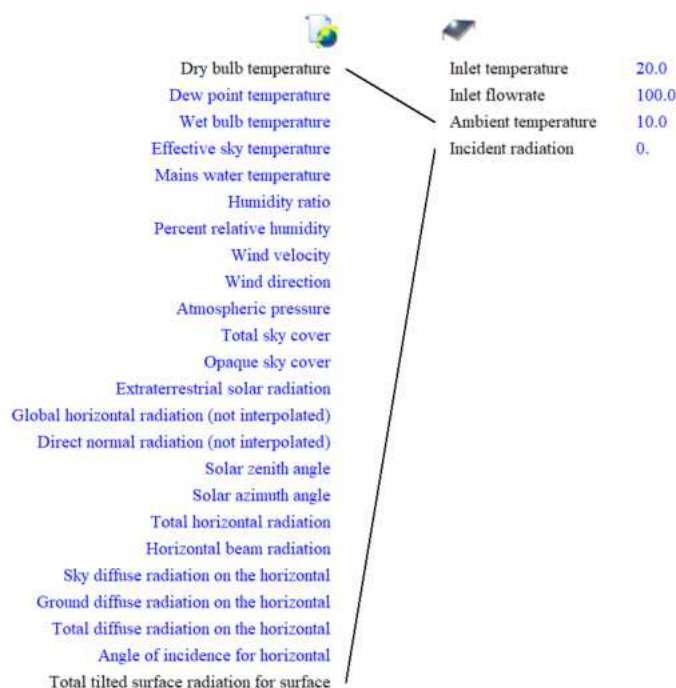


Figura 21. Modelo de simulación análisis de integración térmica. Fuente: ITE

Se pretende que la meteorología escogida corresponda con un clima que se componga de un gran número de horas de sol. Por ello, se escoge la ubicación por defecto de Madrid; y en este sentido, a efectos prácticos, con la metodología empleada puede valorarse el impacto renovable en otras

ubicaciones introduciendo la colección de datos de las mismas. Las condiciones climatológicas que afectan a la instalación solar térmica en el modelo desarrollado son las siguientes:



El agua caliente se recircula al depósito mediante una bomba hidráulica. El control de esta bomba la activa en función de las temperaturas interior del depósito y del agua en el colector, de manera que:

- Si la temperatura del depósito alcanza los 95 °C, se paraliza la recirculación.
- Si la temperatura del depósito es menor a 95 °C y la alcanzada por el fluido en los colectores es mayor que la del depósito, se recircula el agua.
- Si la temperatura del depósito es menor a 95 °C y la alcanzada por el fluido en los colectores es menor que la del depósito, se paraliza la recirculación.

El depósito alimenta además a un intercambiador que conecta con el almacén. En TRNSYS el almacén se ha concebido como un depósito cuyo fluido interno es una mezcla entre aire y biomasa, como se ha explicado en apartados anteriores. La salida del intercambiador es la que alimenta de nuevo al depósito.

Cabe indicarse que el diseño del circuito hidráulico de la solar térmica se ha realizado como para una instalación de ACS doméstica al uso, al menos de partida. Posteriormente, se realizaron simulaciones aumentando el caudal recirculado, el área de colección y la longitud de los tubos del intercambiador del almacén, entre otras variables.



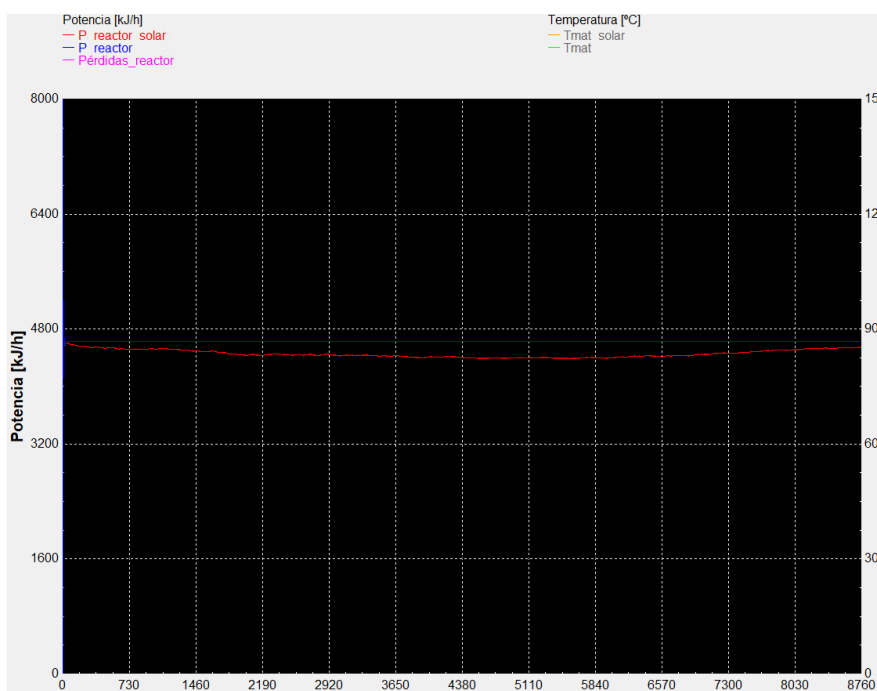
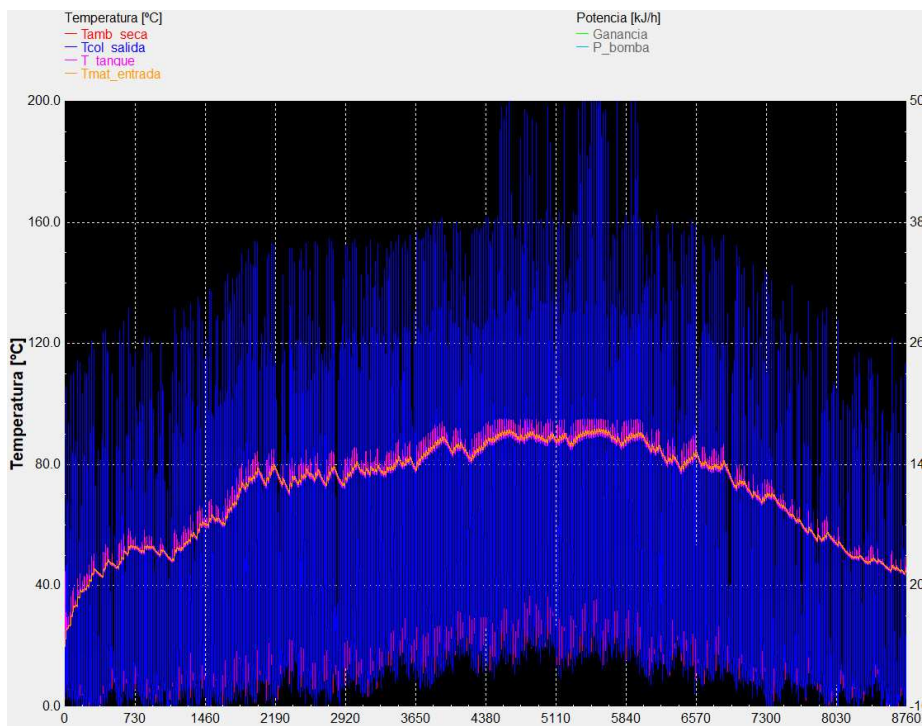


Figura 22. Ejemplos de resultados de simulación. Fuente: ITE

Los resultados arrojaron las siguientes conclusiones:

- Un aumento del caudal recirculado no supone un incremento de la temperatura en el tanque (cuando este se encuentra más frío que el fluido a la salida del colector), solo tendría sentido para aumentar el volumen de ACS para consumo, pero no es el caso.
- Un aumento del área de colección permite calentar mayor volumen de agua, pero en ningún caso incrementar la temperatura de esta.
- Mientras la temperatura del almacén se sitúe por debajo de la de salida del intercambiador, pero muy cercana a esta, un aumento en la longitud de los tubos no repercutirá en un aumento de dicha temperatura.

De ello se concluye que mientras exista proporcionalidad en el diseño del conjunto colectores-bomba-depósito, un aumento de tamaño en los tres factores solo permitiría disponer de una mayor cantidad de ACS, irrelevante en este proyecto.

La temperatura media alcanzada en el almacén es la que se considera como la de entrada de la biomasa al reactor (que bien podría representar la estufa de secado, para este estudio ese detalle es indiferente). Nótese que se ha considerado que no existe pérdida de calor entre la salida del almacén y la entrada al reactor o la estufa de presecado, lo cual situaría a este modelo en un escenario favorable.

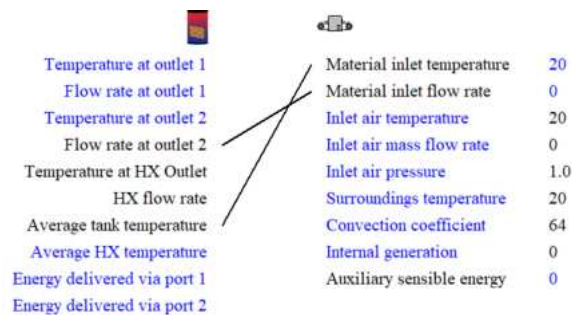
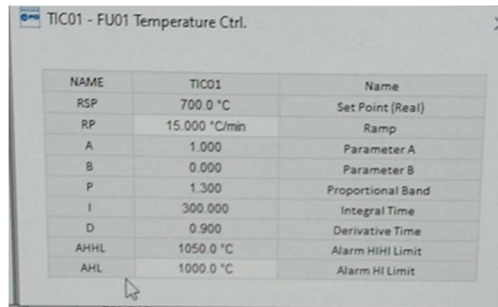


Figura 23. Ejemplo de enlaces entre elementos en TRNSYS. Fuente: ITE

En la realidad, la biomasa que entra y sale del reactor lo hace de manera discontinua y en cantidades muy variables, y al tratarse de un proceso tan novedoso es difícil establecer horarios y cantidades especialmente para la entrada de biomasa. Por ello, se ha supuesto un flujo constante de entrada y salida de biomasa del almacén de 1 kg/h, que es el flujo másico típico de entrada de biomasa al reactor en las pruebas que se han realizado hasta la fecha.

El reactor es controlado por un PID, tanto en el funcionamiento práctico del demostrador como en el modelo de TRNSYS. El PID necesita como valores de entrada la ganancia (K), el tiempo de integración (Ti) y el tiempo derivativo (Td). De acuerdo con el fabricante, son los siguientes:



NAME	TIC01	Name
RSP	700.0 °C	Set Point (Real)
RP	15.000 °C/min	Ramp
A	1.000	Parameter A
B	0.000	Parameter B
P	1.300	Proportional Band
I	300.000	Integral Time
D	0.900	Derivative Time
AHHL	1050.0 °C	Alarm HIHI Limit
AHL	1000.0 °C	Alarm HI Limit

Figura 24. Parámetros PID para la resistencia TIC01. Fuente: ITE

Nota:  $P$ ,  $I$  y  $D$  son los parámetros  $K$ ,  $T_i$  (s) y  $T_d$  (s) descritos anteriormente, respectivamente.

Sin embargo, al integrar estos valores en los parámetros del desarrollo de simulación del escenario en TRNSYS, la respuesta no se corresponde con la realidad, tendiendo a la no convergencia a la estabilización. Por ello, y considerando que no es objeto de este estudio analizar el funcionamiento del controlador PID, se opta por ajustar los valores para obtener un PID que genere una respuesta rápida y estable al sistema (lo que ocurre en realidad).

El aporte energético del reactor se modela mediante un *assembly*, que dispone de una potencia nominal de  $2,75 \cdot 3 + 2,7 \cdot 2 = 13,65$  kW (suma de las resistencias de la cámara de reacción), y que a su vez se multiplica por la variable de control del PID ( $y_{Htr}$ ) para aportar solo el porcentaje de la potencia nominal que corresponda.

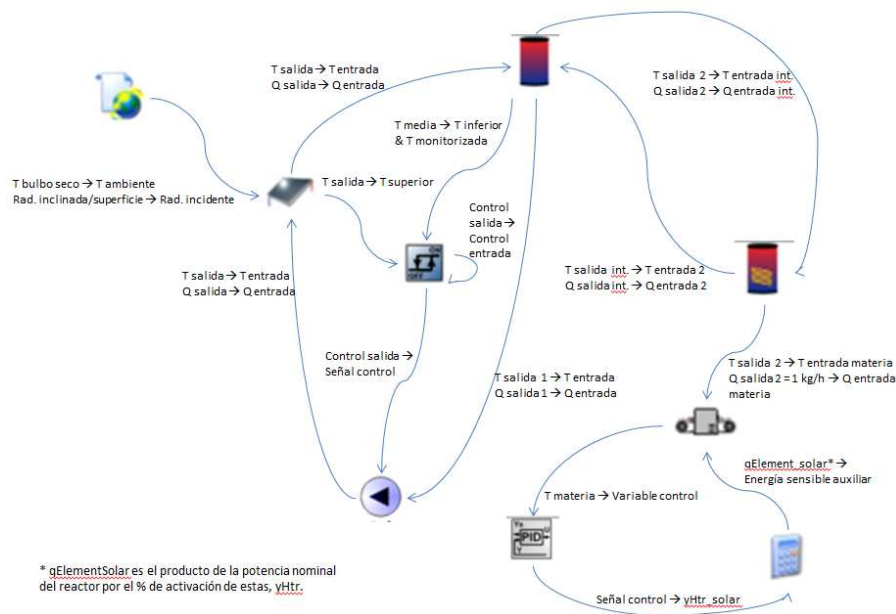


Figura 25. Esquema de entradas / Salidas consideradas de simulación. Fuente: ITE

### 2.3.3 Sistema IIoT energético

La descripción del sistema IIoT energético se compone de:

- A) La infraestructura de digitalización energética diseñada, desarrollada y testeada
- B) Las funcionalidades de análisis energético que el sistema debe cumplir
- C) Los cuadros de mando e interfaces desarrolladas en base a la usabilidad y funcionalidades requeridas
- D) El plan de pruebas planteado para el testeo del sistema

Se detallan a continuación cada uno de los cuatro puntos:

**A) La infraestructura integral de digitalización energética** que se ha diseñado, desarrollado y testeado en el proyecto CIRCULARCARBON, abarcando **desde el nivel de planta al de información**, ha sido la siguiente:

- Despliegue de **elementos de medida energética y de condiciones ambientales, enlazando esta información con la capacidad y recoger los parámetros operativos y de estado de los principales procesos** intervinientes.

Esta arquitectura dispone de una estructura de equipo de medida y/o comunicación con proceso + capa de comunicaciones +capa de enlace a sistema IIoT.

En cuanto a las medias energéticas, a continuación, se resumen el sistema en la siguiente tabla (con datos de puntos monitorizados, tipología, proceso y equipos) haciendo alusión a los medidores de energía empleados que analizan gran parte del consumo eléctrico que sucede en los procesos. A continuación se muestra el sistema a físico de medida desarrollado e implantado:



*Figura 26. Cuadro de medida del sistema físico de análisis energético y ejemplo de tomas eléctricas incableado de medida y alimentación eléctrica. Fuente: ITE*

También, se han instalado una serie de sensores con diferentes características para medir otros parámetros generales ambientales cada uno de los laboratorios.

Tabla 2. Listado y tipología de puntos de medida de condiciones ambientales instalados. Fuente: ITE

PROCESO	CANTIDAD	TIPOLOGÍA
Producción de carbón activo	1	Temperatura y humedad
Producción de electrodos	2	Temperatura y humedad O2
Almacén	2	Temperatura y humedad O2

- Además, se comunica y adquieren los parámetros fundamentales de los procesos del reactor y caja de guantes. Así, se adquieren variables de proceso de los equipos principales Capa de **elementos de comunicación** de campo hacia la plataforma IIoT. Se resuelve con una infraestructura Ethernet dedicada, elementos de conexión y cableado apropiado.
- **Capa de IIoT** y de enlace a capa de información y analítica junto con la capa de enlace.

Así el sistema IIoT base se basa en una tecnología personalizable **IIoT de Bosch** la cual se ha configurado y desarrollado un Middleware a medida para hacer funciones de pasarela y concentrador inteligente de captación y almacenamiento intermedio de información de los procesos y sistemas de captación de datos energéticos y de contexto.

Esta capa, que otorga al sistema de gran capacidad de comunicación, interoperabilidad, operatividad en cuanto a funciones de monitorización base y robustez, se integra con la capa de inteligencia energética, que se ha desarrollado a medida de las actividades y procesos que intervienen en el piloto demostrativo de CIRCULARCARBON.

En referencia a la **implementación y despliegue de las partes físicas del sistema**, una vez se han ido recibiendo los elementos que lo componen se ha pasado al desarrollo del sistema de captación y comunicaciones, despliegue y testeo. Así, una vez se han recibido los dispositivos se ha realizado las pruebas de manera individual de los componentes de sensado, de comunicaciones e IIoT. La instalación del sistema se ha realizado acorde con el diseño preliminar planteado en el PT2.

- **Capa de información y analítica** desarrollada en el proyecto que incluye BBDD y elementos de visualización y análisis. El sistema contará con una zona de control, desde aquí se visualizarán todos los datos involucrados en cada uno de los procesos a través de un sistema SCADA diseñado y desarrollado de manera específica para estos pilotos demostrativos en los que se analizará la relación entre la energía utilizada y el proceso productivo ejecutado.

El sistema digital instalado que permite el acceso y visualización del SCADA se refleja en la siguiente imagen:





Figura 27. Sistema digital análisis energético instalado en ITE y monitores de visualización. Fuente: ITE.

B) A este nivel de aplicación, se han enfocado las **funcionalidades de análisis energético** que deberá implementar el sistema. El sistema se diseña siguiendo la **metodología** creada

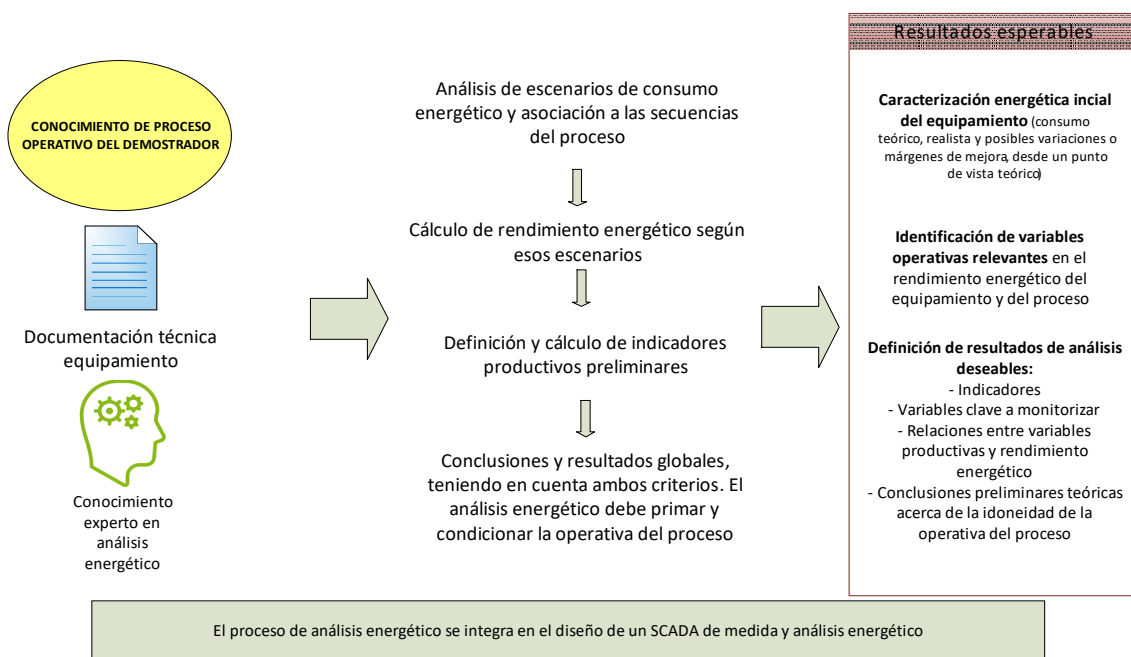


Figura 28. Metodología general de diseño de análisis energético. Fuente: ITE.

La metodología anterior sirve de base para el diseño del SCADA de seguimiento y análisis energético del demostrador CircularCarbon. No obstante, en el marco de análisis energético previo a la instalación, se estudiaron aspectos de impacto energético específicos como la mejora del rendimiento energético por cantidad de producto obtenido empleando la tecnología en continua propuesta en el demostrador, en lugar de una tecnología de funcionamiento discreto, obteniendo conclusiones preliminares representativas sobre el mayor escalado que plantea el proyecto. La siguiente tabla es un ejemplo de ello, en la cual se aprecia que previa selección final del equipo de pirólisis finalmente empleado en el

demostrador, la mejora del rendimiento por unidad de producto ya anticipaba una mejora de más del doble con el simple cambio de tecnología.

Opción contemplada	Tasa de alimentación considerada (kg/h)	Potencia eléctrica nominal (kW)	Potencia considerada funcionamiento promedio tratamiento (kW)	Tiempo de uso considerado precalentamiento(h)	Tiempo de uso considerado tratamiento (h)	Consumo energético por ensayo (pirólisis+activación) (kWh)	Producción aproximada de CA asociada (kg) por ensayo	Consumo (kWh/kg CA producido)
Mufla laboratorio	Alim. Discontinua (de 10 gr de gramos a 200 gr por ensayo)	7	Muy variable, de 0,2 a 5-6 kW	5		7,5	0,018	<b>416,7</b>
Reactor tornillo	0,2	3,6	1,8	6	7	29,88	0,144	<b>207,5</b>
Reactor tornillo	1	23,75	11,875	6	7	197,125	0,72	<b>273,8</b>

*Figura 29. Comparativa preliminar de estudio de rendimiento energético de producción de carbón activo según tecnología empleada. Fuente: ITE.*

No obstante, esta tabla ha de tratarse como datos preliminares, ya que el propio sistema digital permite el cálculo pormenorizado de éste y otros indicadores de funcionamiento energético de detalle. Además, los datos considerados y las hipótesis de funcionamiento se realizaron desde un punto de vista conservador.

Más allá de eso, es importante remarcar que el demostrador CircularCarbon integra el enfoque de cálculo energético de manera continua en su funcionamiento normal, resultando en un análisis energético continuo y dinámico, que debe arrojar por sí mismo resultados representativos al tiempo que da soporte al proceso productivo principal del demostrador. De esta manera, las tareas de puesta en marcha y análisis energético desarrolladas en este paquete de trabajo se han centrado en:

- Partiendo del preanálisis realizado en el paquete de trabajo anterior, identificar y caracterizar las distintas etapas de proceso de las cuales es necesario caracterizar el consumo energético
- Desarrollar un diseño de SCADA que aborde el análisis energético de manera integral para todo el demostrador, con mayor detalle en las etapas de consumo clave, y que se vaya retroalimentando con el funcionamiento continuo del demostrador
- Considerar la operativa de los ensayos de carbón activo como uno de los pilares del análisis energético y punto principal de entrada de información no digitalizada, es decir, introducida por los operarios del proceso

En este sentido, el diseño del SCADA se centra en plantear el desarrollo de tres funcionalidades principales:

- **Monitorización:** el SCADA se ha diseñado atendiendo a la posibilidad de filtrar, seleccionar, exportar y graficar todos los datos que recoge durante el período que sea, gracias a la base de datos del propio sistema. Dichos datos pueden ser de proceso, ambientales o de consumo energético. Además, todo el sistema se diseña para integrar datos de monitorización en continuo que se muestren por pantalla.

- **Análisis y cálculo de huella energética:** como se adelanta previamente, se diseña un sistema de registro de ensayos como caso particular de análisis, que permite al sistema integrar y tratar información sobre los tipos de residuo, biomasa o materiales de entrada, sus características, y sus consumos energéticos característicos a nivel pormenorizado y de detalle.
- **Análisis energético del demostrador en su funcionamiento habitual,** incluyendo consumo energético por etapa del demostrador, consumo energético general, correlación entre variables, consideración de emisiones de carbono o análisis de impacto de energías renovables, entre otros. Esta funcionalidad está diseñada con el fin de dar soporte al análisis energético del demostrador a lo largo de toda su vida útil, ofreciendo información de mayor valor cuantos más datos disponga el demostrador.

Es importante entender que el análisis energético que se desarrolla en el demostrador es dinámico y continuo en su funcionamiento, y está adaptado a los resultados actuales y futuros que se dan en éste, contemplando con ello la posibilidad de emplear nuevos materiales en el proceso, y teniendo en cuenta que la base de datos de éste va creciendo.

**C)** Partiendo de las consideraciones anteriores, la **aplicación** creada se compone de una **serie de cuadros de mando** (CMs) sobre los que el usuario puede visualizar el proceso de producción de carbón activo a través de un reactor de pirolisis lenta. La aplicación no solo contempla el aspecto gráfico, sino que a través de un sistema de monitorización del proceso general (las pirolisis y las gasificaciones llevadas a cabo en el reactor) y extendido a todos los subprocesos relacionados con este, muestra datos e indicadores de interés tales como las temperaturas y las potencias alcanzadas por el reactor o el coste económico por cada kilogramo de producto generado.

Para llevar a cabo el análisis del balance energético se ha tenido en cuenta lo siguiente:

En primer lugar, los consumos de cada uno de los equipos del laboratorio en el que transcurre el proceso de revalorización de biomasa, tanto de aquellos que sirven para pretratarla (molienda, secado...) como del propio reactor.

En segundo lugar, es necesario relacionar ese consumo con otras variables. Para ello, se llevan a cabo dos actuaciones:

1. Establecer comunicación con el reactor, equipo del cual se obtienen una serie de variables de interés: temperaturas, frecuencia de motores, presión interna, flujo de gas, etc.
2. Identificar aquellas variables que se estima que tienen relación con el consumo energético y dar la opción de introducir el dato manualmente, en la programación de ensayos (datos de entrada y salida).

Por último, una vez se disponen de todos los datos, se diseñan los indicadores que forman parte del proceso. Las relaciones consideradas importantes son medioambientales, económicas y energéticas. Estos indicadores se muestran tanto a lo largo de los CMs diseñados como en los datos de salida de los ensayos.



**Indicadores específicos**

kWh/kg biomasa	kWh/kg char tratado	kWh/kg char producido	kWh/kg de carbón activo	kWh/kg de bioaceite	Coste específico (€/kg char producido)
21,29	0,00	4,26	0,00	21,29	0,96

**Consumo energético (kWh)**

TIC01 - prec.	TIC03 - prec.	TIC05 - prec.	TIC07 - prec.	TIC09 - prec.	TIC11 - prec.	TIC12 - prec.	TIC13 - prec.
2,60	2,27	2,16	2,18	2,54	1,14	0,17	0,06
TIC01 - trat.	TIC03 - trat.	TIC05 - trat.	TIC07 - trat.	TIC09 - trat.	TIC11 - trat.	TIC12 - trat.	TIC13 - trat.
1,69	0,72	0,75	0,66	1,46	0,91	0,37	0,06
Resist. - prec.	Resist. - trat.	Resist. - total	Resist. - total (%)	Motores	Motores (%)	Resto del sistema	Resto del sistema (%)
13,13	6,63	19,76	92,81	0,17	0,82	1,36	6,38

**Balance**

Gas consumido (m <sup>3</sup> )	Gas emitido (m <sup>3</sup> )	Gas generado (m <sup>3</sup> )
40.451,33	188.484,51	4,75
Coste ensayo (€)		
0,19		
Energía consumida (kWh)		
21,29		

Figura 30. Tabla de seguimiento de Indicadores calculados. Fuente: ITE

En la aplicación se da un gran peso al impacto medioambiental del proceso. Tanto es así que una gran cantidad de gráficas que muestran datos de consumo energético pueden convertirse en datos de emisiones (kg CO<sub>2</sub>) con un solo clic, que como se aprecia en la siguiente imagen, se ha programado en interfaz como un botón con una imagen de una hoja:



Figura 31. Ejemplo de objeto en SCADA de correlación energía - emisiones. Fuente: ITE

Adicionalmente, se considera como parte importante del análisis energético la influencia de la integración de las energías renovables al proceso, tal y como ha sido descrita en detalle en el punto 2.3.1. Se consideran dos fuentes, la solar fotovoltaica y la eólica. En cuanto al consumo, se toma el del analizador correspondiente al consumo general donde transcurre el proceso. Cabe destacar que considerar la generación y el consumo totales anuales, mensuales o diarios de las dos fuentes renovables no sería realista, ya que las horas en las que se consume la energía y la que se produce son cruciales para el cálculo del aprovechamiento. Por este motivo, se tiene en cuenta el balance consumo vs. producción horario, calculándose el excedente correspondiente.

**D)** Para el **correcto testeo del sistema completo** se ha elaborado un plan de pruebas ajustado a las necesidades de cada proceso que en el PT4 se ha ejecutado e identificado a su finalización el correcto funcionamiento de los dispositivos que intervienen en la monitorización energética.

Así, para las pruebas de testeo y puesta en marcha de componentes integrantes del sistema de monitorización (como son los de enlace a los datos y estados de operación de instalaciones físicas, red de sensores, red de comunicaciones, IIoT y SCADA, así como de sus bases de datos) se han planteado a través de los siguientes tipos de tareas:

- Pruebas visuales de verificación de correcta de instalación de equipos físicos, conexión y ajuste de elementos: sensores, redes de comunicaciones, sistema IIoT, interfaces de SCADA.
- Pruebas de funcionamiento de comunicaciones con cada uno de los sistemas integrados y monitorizados.
- Pruebas de funcionamiento de comunicaciones con todo el conjunto de sistemas. Llegada de datos a BBDD de IIoT y desde esta pasarela inteligente a BBDD de SCADA.
- Pruebas de funcionamiento conjunto e integración con el sistema IIoT y SCADA
- Pruebas de verificación de tratamiento y visualización de datos y operaciones de IIoT
- Pruebas de verificación de tratamiento y visualización de datos y operaciones de SCADA

#### **2.3.4 Usos y beneficios potenciales del sistema digital de análisis energético**

Los **beneficios** de haber desarrollado este sistema digital para este tipo de procesos innovadores y experimentales son los siguientes:

- Asegurar que el demostrador integra el análisis energético a distintos niveles (ligados a las tres funcionalidades previamente descritas) en su operativa habitual, permitiendo obtener carbón activo y electrodos para almacenamiento bajo criterios de máxima eficiencia energética.
- Fomentar el desarrollo de procesos alternativos que fomenten la circularidad de la economía, ya que gracias al sistema digital puede cuantificarse la rentabilidad y el impacto de estos.
- Establecer una línea base energética a partir de la cual realizar mejoras en el proceso en pro del aumento de la eficiencia energética.
- Proporcionar valor añadido a los procesos de revalorización de biomasa, por el trabajo que conlleva crear el sistema digital y las funcionalidades que aporta al proceso.
- Ayudar a la transferencia tecnológica entre empresas, puesto que muestra de una manera bastante objetiva las características y los beneficios de la implantación de un proceso de revalorización de biomasa.

En cuanto al uso y utilidad, este SCADA y el sistema digital ha sido concebido para representar el potencial de integrar tecnologías de medida y análisis energético en procesos industriales, de manera que, además de dar soporte a la operativa habitual del demostrador, pretende mostrar el alcance del análisis y la aplicación de técnicas de inteligencia energética en operativa de procesos, garantizando la digitalización energética de la planta, y sentando las bases para aplicación de técnicas posteriores de

análisis energético-productivo de detalle, como escenarios de flexibilidad industrial, o modelado de componentes energético o desarrollo de un gemelo digital energético-productivo del proceso.

### 3 Tareas instalación y desarrollo en el piloto en ITC

El Proceso 3 de aplicación ambiental consiste en el montaje y diseño de reactores válidos para sus aplicaciones ambientales tales como el tratamiento de aguas residuales industriales (derivadas de los procesos de producción de baldosas cerámicas y de refinerías del sector petroquímico) y tratamiento de gases en la emisión de los procesos de cocción de baldosas. Por tanto, este Proceso 3 consta de dos partes de utilización del carbón CIRCULARCARBON: una para el tratamiento de aguas residuales industriales y otra para el tratamiento de gases de procedencia industrial.

Para cada una de estas aplicaciones se ha desarrollado y diseñado reactores adecuados para su uso a partir de las especificaciones establecidas en el entregable 2.1; que en los siguientes apartados se describen.

#### 3.1 Instalación de demostrador de aplicación de carbón activado en tratamiento de agua

El demostrador ha sido instalado en la planta piloto de las instalaciones del ITC, contando con los recursos adecuados para su ajuste a escala piloto, además de su adecuación para implementar sistemas alternativos para el tratamiento de aguas residuales.

El demostrador para el tratamiento de aguas consta a su vez de dos reactores, uno para el tratamiento de aguas residuales procedentes de la industria cerámica y otro para el tratamiento de las aguas residuales industriales procedentes del sector petroquímico; es decir, se han diseñado los reactores para la eliminación de contaminantes claves presentes en cada una de dichas industrias tales como:

- A) Reactor para la eliminación del BORO (B) presente en las aguas residuales procedentes de la industria cerámica.
- B) Reactor para la eliminación de hidrocarburos ligeros (ACEITES Y GRASAS-AG).

Ambos reactores se han ubicado en el laboratorio del área de sostenibilidad de las instalaciones del ITC, tal y como estaba previsto; dicho laboratorio cuenta con las instalaciones adecuadas para el montaje y su puesta a punto. Para ello se adaptará un espacio destinado a la ubicación de los dos reactores de tratamiento de aguas con carbón activo, uno para cada tipo de agua y contaminante identificado para su evaluación, en el diseño se ha tenido en cuenta también la capacidad de toma de muestras que nos asegurase el obtener muestras representativas y por tanto disponer de unos datos de análisis constantes, representativos y fiables.

Para el montaje de ambos reactores se han comprado los fungibles adecuados que nos permitiese poder configurar ambos reactores para el tratamiento de aguas de forma optimizada y eficaz. Además, de éstos han sido necesarios la compra de otros materiales de laboratorio tales como frascos, recipientes, ácidos, agitadores, etc para la preparación de las aguas, su tratamiento previo (acondicionamiento) y almacenaje para su posterior envío para realizar sus análisis.

El diseño de los reactores se ha configurado en paralelo y similares, tal y como se observa en la figura 1. En el diseño se ha contemplado dos depósitos de aguas, uno para almacén de entrada y otro para recoger el agua tratada en cada uno de los reactores.

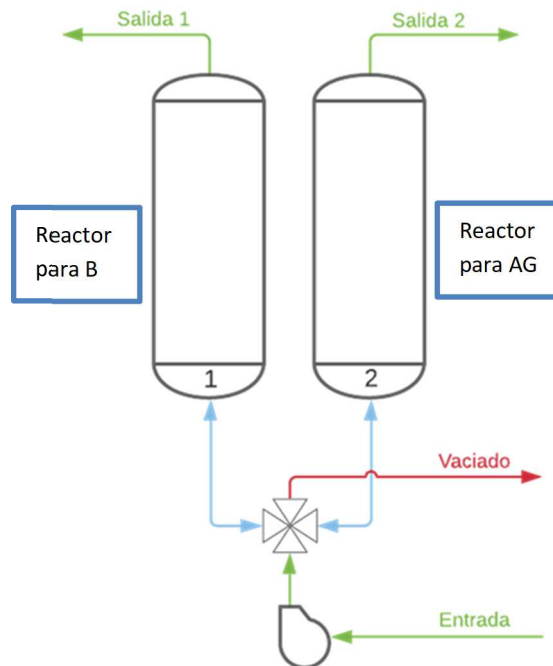


Figura 32. Diseño esquemático de los reactores de adsorción

El diseño del reactor se caracteriza por su versatilidad para adaptarse a las condiciones de operación requeridas para cada caso de estudio de las diferentes aguas residuales industriales (B y AG). En la Figura 1 se muestra el diagrama de proceso del sistema de adsorción. Está compuesto por dos torres de adsorción, que albergarán en su interior el adsorbente para la eliminación de boro y los hidrocarburos ligeros (AG). La impulsión del flujo se realizará mediante una bomba peristáltica de bajo caudal, en el caso del boro, y una bomba de membranas de caudal superior, en el caso de los aceites y grasas (debido a la densidad del agua a tratar). El control del flujo se realizará mediante un rotámetro.

Para el diseño del reactor un factor delimitante ha sido conocer el volumen de carbón activo de CIRCULARCARBON viable de usar y testear. Esta cantidad se estableció en 500 gr para los dos reactores de tratamiento de aguas, es decir unos 250 gr aproximados para cada uno, y en función de este dato y los extraído de las especificaciones del carbón activo se han diseñado los reactores.

Los reactores están colocados sobre un soporte de metacrilato y sujetos a una barra de metal que garantizan su estabilidad. El cilindro del reactor de adsorción es un tubo transparente fabricado en polimetacrilato de diámetro interior útil de 3.2cm, se ha seleccionado un diámetro que permitiese obtener las velocidades superficiales de adsorción óptimas (entre 0.2 y 15 m/h, dependiendo del adsorbato eliminado, identificado en el E.2.1 de las especificaciones del carbón). Cada reactor tiene un ensamblaje de tubos de goma de PVC transparentes y fijados al soporte.

Además, cada reactor está configurado con un sistema de válvulas que permite distribuir el flujo de agua por cada uno de los reactores y seleccionar por el que se hace pasar el agua, usando la misma bomba de impulsión.

Cada reactor cuenta con un tanque de homogenización, en el cual la muestra de agua se homogeniza previamente a su paso por el reactor se hace pasar el agua entre los dos reactores y el tanque de homogeneización previo.

El montaje y diseño del reactor se ha hecho a partir de las especificaciones y criterios definidos en el E.2.1.

*Tabla 3. Resumen de las especificaciones definidas en el E.2.1*

Parámetros	Condiciones que cumplir
Altura del lecho	$L/D \geq 20$
Diámetro tubo (cm)	3,2
Tiempos de contacto recomendados	10-15 min
Velocidades entre (cm/seg)	0,14-0,42
Volumen (cm <sup>3</sup> ):	$\pi * r^2 * L$
Area	$\pi * r^2$

*Tabla 4. Características de la configuración de los reactores de adsorción*

Parámetro	Boro	Aceites y grasas
Altura torre (cm)	60	20
Diámetro torre (cm <sup>2</sup> )	8.04	8.04
Volumen (cm <sup>3</sup> )	482	482
Tipo de bomba	Peristáltica	Membranas
Rango de velocidad (ml/min)	0-10	10-400

Se muestra una fotografía de la configuración del sistema de adsorción ubicado en las instalaciones del ITC.



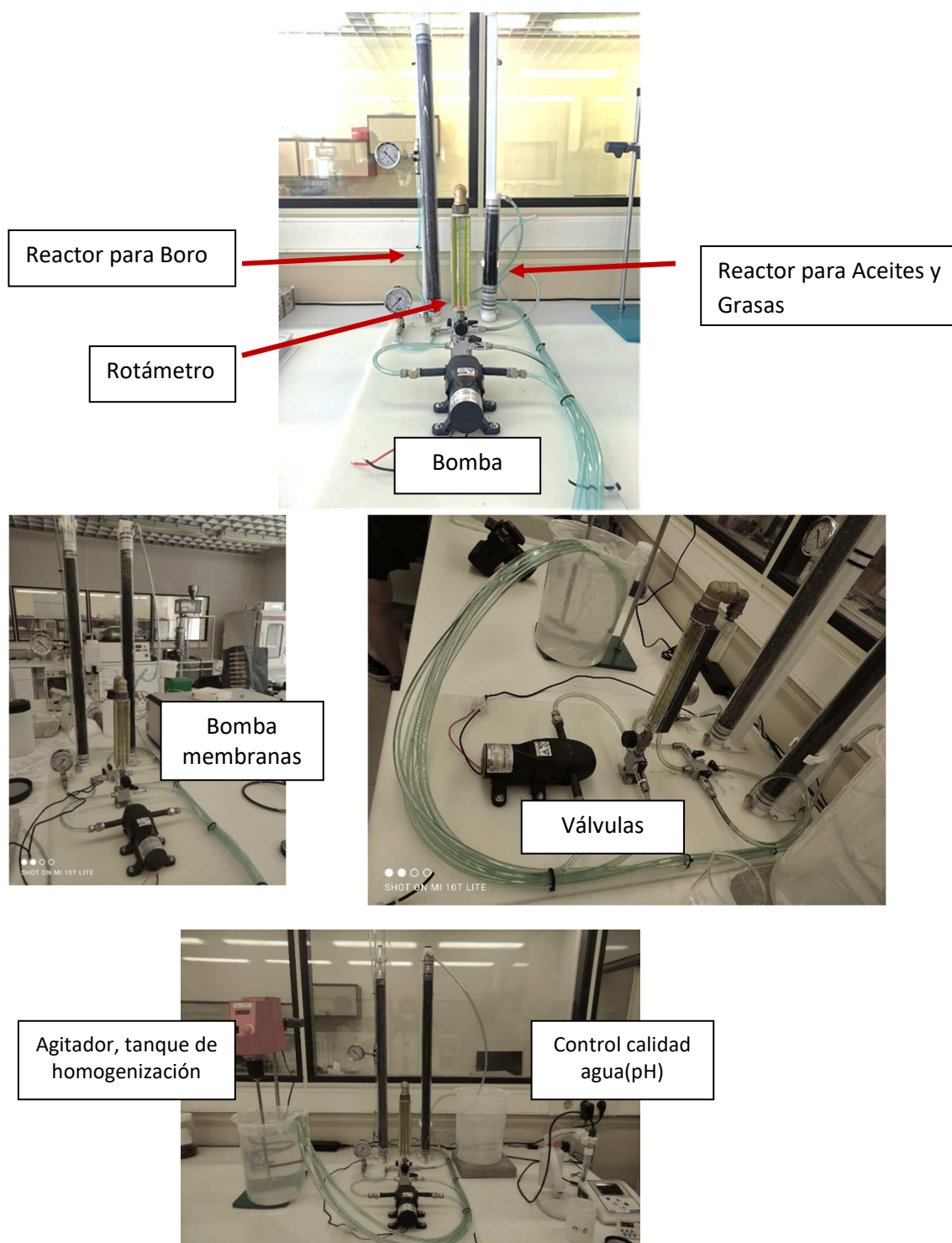


Figura 33. Imagen de la instalación del sistema de adsorción

Tras el diseño de los dos reactores para tratamiento de aguas, se tomó una muestra de aguas residuales de las empresas colaboradoras BP Oil (a la salida del tratamiento primario) y KERABEN (en diferentes puntos de producción), con el objetivo de poder evaluar los requerimientos de pretratamiento y acondicionado de las aguas para su ensayo en los reactores.

Las muestras de aguas han sido facilitadas por las empresas colaboradoras con ITC en CircularCarbon.

Tras el análisis de las aguas residuales objeto de estudio se estableció una metodología para la puesta a punto de dichas aguas, que asegurasen poder obtener la realización de los tests de ensayo para evaluar el rendimiento del carbón activo de forma adecuada. Esta metodología constaba de una etapa de decantación seguida de una etapa de filtración con tamiz. De esta manera, se ha conseguido acondicionar las aguas residuales para su uso a nivel de laboratorio.

El volumen de agua requerido para poder validar los ensayos y tests a realizar en los reactores para que sean representativos se abordan en el entregable E.4., donde se define el volumen de agua residual a tratar idóneo para poder realizar todas las pruebas oportunas con el reactor dimensionado a pequeña escala, es decir, en función del carbón activo del que se pueda disponer (estimado en 500 gramos para ambos reactores).

La validación de este sistema y de su rendimiento de operación se han realizado previamente a los test de ensayo. Estos resultados se muestran en el E.4.1, así como también se incluye la obtención de las curvas de adsorción de estos carbones durante el montaje.

Como resultado del diseño de los reactores para el tratamiento de aguas residuales industriales, se ha obtenido un sistema de adsorción compacto, versátil, de fácil manejo y de control de las condiciones de operación que nos permita testear diferentes carbones activados, y comparar el rendimiento de éstos para aplicaciones en tratamiento de aguas residuales industriales, con el fin de evaluar su rendimiento, bajo diferentes condiciones de operación y con diferentes contaminantes de entrada. De esta manera, es posible obtener las capacidades técnicas de los carbones activados ensayados.

### **3.2 Instalación de demostrador de aplicación de carbón activado en tratamiento de gases**

Debido a las circunstancias acaecidas a lo largo del proyecto, consensuadas y justificadas adecuadamente con el organismo pagador, ha sido necesario la adaptación de parte del concepto inicial del proyecto. Dichas adaptaciones han incluido la parte investigadora, de diseño y de utilización del demostrador de aplicación de carbones activados en el proceso de tratamiento ambiental de gases industriales.

La capacidad de producción de carbón activado del demostrador piloto impide la utilización de las infraestructuras de ensayo de alta capacidad instaladas en hornos de cocción de baldosas industriales previstas al inicio del proyecto.

En este sentido, ha sido necesario adaptar la configuración del demostrador de gases a las cantidades disponibles de carbón activado de origen circular desarrollado durante el proyecto. Así, el nuevo demostrador de la aplicación del carbón activado para la depuración de COVs en fase gas diseñado se

caracteriza por ser **portable**. Esta característica le confiere una elevada capacidad de ser utilizado en diferentes localizaciones con un número mínimo de ajuste en función del foco a estudiar como, por ejemplo: hornos piloto y hornos industriales de cocción de baldosas y demás productos.

Tal y como queda reflejado en el *Entregable E2.1. Casos de uso, especificaciones y diseño del demostrador*, para implementar el demostrador se han utilizado botellas de lavado de gases, utilizadas habitualmente en laboratorio y que se denomina *borboteador con difusor*, con las características volumétricas necesarias para almacenar el carbón activado y permitir la acción del mismo sobre la corriente de gases a tratar. Se ha seleccionado botellas de capacidad volumétrica de 500 ml de cuerpo. Por su parte se ha seleccionado un vástago de cierre adecuado al reactivo alojado en su interior que es capaz de asegurar una correcta circulación de gases por el volumen total utilizado por el material alojado dentro de la botella y que maximiza el contacto entre la interfase formada entre el sólido y el gas. En función de las características de la corriente se puede realizar un montaje de botellas en serie que permita adaptar las necesidades de depuración a la composición del gas a tratar y a sus características de humedad, temperatura y presión.

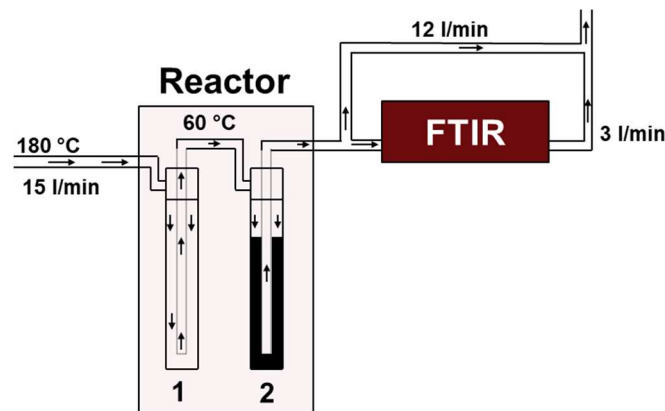
Se ha tenido en cuenta la operación del demostrador de gases de forma que se puedan alcanzar los objetivos de estudio de los carbones activados desarrollados y la determinación del rendimiento de depuración alcanzado con el mismo. Para ello, se han dispuesto tomas de muestra que permiten conocer la composición de los gases tratados en aquellas posiciones de interés del demostrador (composición previa a la etapa de adsorción, después de dicha etapa y en zonas intermedias).

Además del reactor en sí y sus funcionalidades con respecto al reactivo en forma de carbón activado, otro de los puntos clave en el montaje implementado es el transporte adecuado de los gases desde la fuente generadora hasta el propio reactor. Para ello, ha sido necesario el acondicionamiento de la corriente industrial de tal forma que la muestra extraída de la fuente pueda ser estudiada en el demostrador manteniendo las características iniciales de la misma y, por tanto, sea plenamente representativa y veraz en cuanto a composición y factores físicos asociados.

El sistema de toma de muestra ideado en el montaje de gases incluye varias etapas importantes que se describen brevemente a continuación: sistema de toma de muestra con filtración de las partículas presentes en la corriente, acondicionamiento del gas en cuanto a temperatura que impida la pérdida de aquellos compuestos que puedan ser condensados desde la forma gaseosa a la forma líquida, al disminuir su temperatura y el sistema de análisis, que permite conocer la composición de los contaminantes más importantes presente en la corriente de gases antes y después del sistema de tratamiento portable utilizado. La elevada funcionalidad del sistema de medida permite calcular la eficiencia de retención de los contaminantes de interés de forma directa. En el *Entregable E2.1. Casos de uso, especificaciones y diseño del demostrador*, se explica en detalle el diseño del demostrador, sus diferentes partes y la finalidad de las mismas.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se ha representado de forma esquemática el demostrador de aplicación ambiental de carbón activado para el tratamiento de gases. En este caso, el equipo de análisis de gases acoplado al reactor es un sistema de medida basado en tecnología FTIR. Dicho sistema se ha explicado convenientemente a lo largo del proyecto. Cabe recordar que el sistema

FTIR permite la caracterización del comportamiento de los carbones activados para un amplio espectro de contaminantes gaseosos de carácter inorgánico y orgánico.



*Figura 34. Esquema del demostrador de aplicación ambiental de carbón activado para el tratamiento de gases*

En resumen, el demostrador diseñado en el proyecto CircularCarbon para el estudio de aplicación de carbón activado en el tratamiento de gases es un sistema modular, flexible y portable capaz de tomar gases de fuentes de emisión industrial y mantener sus características inalteradas y, por tanto, la representatividad de la muestra. En el sistema demostrador de gases es posible analizar la composición de la corriente de gases en continuo mediante FTIR tanto antes como después del módulo de carbón activado. De forma sencilla se puede conocer la eficacia de los carbones derivados del proceso de producción de CircularCarbon. Asimismo, destacar la flexibilidad del montaje ideado donde es posible estudiar un amplio abanico de fuentes emisoras de carácter industrial y la aplicación de diferentes tipos de carbones para el tratamiento de dichos gases.

#### 4 Conclusiones

En el entregable se han descrito los principales trabajos de instalación y puesta a punto del equipamiento del demostrador. Para ello, se han desarrollado unas especificaciones y funciones a cumplir por parte del equipamiento y, según el caso, ha llevado a una selección de proveedores con el fin de obtener el equipamiento que más se adecúa a las necesidades del proyecto. Tras ello, se ha realizado una instalación y puesta a punto de dicho equipamiento, necesitando un mayor tiempo aquellos equipos diseñados e instalados a medida para el proyecto, planteando, además, las bases para el posterior desarrollo del plan de pruebas a lo largo del PT4. Las tareas de instalación se han descrito por separado para cada uno de los tres procesos de los que se compone el demostrador.

Complementariamente a lo anterior, se ha diseñado el proceso de análisis energético de las fases productivas del proyecto, esto es, los procesos 1 (Fabricación de carbón activo) y 2 (Empleo de carbón activo en baterías) desde un punto de vista integral y teniendo en cuenta el funcionamiento continuo del Demostrador, partiendo de un preanálisis energético y de las conclusiones alcanzadas en el PT2.