



MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



FINANCIADO POR LA
UNIÓN EUROPEA
Next Generation EU



MEMORIA JUSTIFICATIVA DE LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA FABRICACIÓN, SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN MEJORADA EN EL MARCO DEL PLAN DE RECUPERACIÓN, TRANSFORMACIÓN Y RESILIENCIA, DESTINADO A/PARA EL INSTITUTO DE CARBOQUÍMICA DE LA AGENCIA ESTATAL CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS.

Financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU por el Mecanismo de Recuperación y Resiliencia.
Código proyecto científico: TRE2103011

Código proyecto científico:	TRE2103011
Título del proyecto:	<i>Tecnologías Clave en la Transición Energética.</i>

El Suministro e Instalación de una planta de gasificación mejorada para el Instituto de Carboquímica requiere una serie de especificaciones técnicas que se detallan en el Pliego de Prescripciones Técnicas (PPT). A continuación, se enumeran las especificaciones consideradas más importantes, así como la justificación argumentada de cada una de ellas:

1. El sistema deberá contar con los **reactores de gasificación y combustión**, fabricados de acuerdo al diseño propuesto en el pliego de prescripciones técnicas. Ambos reactores se deben interconectar entre sí de forma que se consiga equilibrar la diferencia de presiones entre reactores y tener un flujo estable de sólidos entre ellos que pueda ser modificable al operar sobre las *loop seals* y sobre los caudales de purga y *make up*.

Justificación: En el gasificador se produce la gasificación con vapor de la materia prima en presencia de un absorbente de CO_2 , como es el CaO que fija este gas en forma de CaCO_3 . La reacción de carbonatación aporta energía a las reacciones endotérmicas de la gasificación. En el segundo reactor (combustor), se realiza la calcinación del CaCO_3 mediante el calor aportado por la reacción de oxidación del char no convertido en el reactor de gasificación. Mediante la recirculación de sólidos entre reactores se transfiere al combustor una mezcla de CaO/CaCO_3 , cenizas y char que no ha alcanzado la conversión completa en el gasificador y cuya combustión aportará energía a la calcinación de la caliza. A su vez, del calcinador pasa al gasificador una mezcla de CaO y cenizas a alta temperatura (850-900 °C). Así pues, la energía necesaria en el gasificador proviene de la reacción de carbonatación del CaO y del calor sensible de los sólidos transferidos desde combustor/regenerador. Las características de diseño particulares expuestas en el Pliego de Prescripciones Técnicas, son necesarias para lograr una correcta recirculación de sólidos y contar con los tiempos de residencia requeridos para los sólidos en los reactores.

2. Todos los equipos que trabajen a temperatura deberán estar debidamente aislados para minimizar las pérdidas de calor y garantizar una temperatura externa igual o menor a 50 °C, para este aislamiento no se acepta el uso de refractario.

Los equipos y tuberías que den servicio a temperaturas de 700-950 °C serán de **acero inoxidable de alta calidad, AISI 310**. Deberá tener marcado CE.

Justificación: La calcinación del CaCO_3 debe realizarse a alta temperatura (850-900 °C) por lo que se requiere que el material a utilizar soporte dichas temperaturas. Además, el gasificador debe permitir estudiar también la gasificación convencional, que se realiza a temperaturas de hasta 850 °C.

Para este aislamiento no se puede utilizar material refractario debido al modo de operación de la planta (frecuentes arranques y cambios de operación) y a los pequeños diámetros de algunos conductos, de forma que así se eviten posibles desprendimientos del mismo y consecuentes obturaciones de las líneas.

3. Las líneas que transportan gas y/o sólidos a temperatura igual o superior a 60 °C deberán ser debidamente calorifugadas y/o traceadas.

Ref.OTE 012/23 FABRICACIÓN, SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN MEJORADA.
INSTITUTO DE CARBOQUÍMICA

VERSIÓN FORMATO: 11.01.22

CSV : GEN-6439-6cfe-dbf-25e4-1255-7226-c783-2d5a

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN : <https://portafirmas.redsara.es/pf/valida>

FIRMANTE(1) : JUAN MANUEL RODRIGUEZ QUINTANA | FECHA : 31/10/2023 09:07 | Informa





MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



FINANCIADO POR LA
UNIÓN EUROPEA
Next Generation EU



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Justificación: El traceado de las tuberías permitirá reducir las pérdidas de calor del sistema y evitar la formación de condensados en las líneas.

4. La planta deberá ser debidamente **certificada** realizando la comprobación de soldaduras, pruebas hidráulicas, limpieza química, etc.

Justificación: Las dimensiones de la planta, la composición del gas producido, los caudales de gases y vapor alimentados y producidos, y las altas temperaturas de operación, requieren la certificación de la planta y estar acompañados de como mínimo los elementos de medida y seguridad especificados en el pliego de prescripciones técnicas.

Respecto al **Gasificador:**

1. Se trabajará con una **altura máxima de lecho fluidizado de aprox. 1 metro**, y con una sección transversal de diámetro suficiente que permita operar en condiciones de régimen de lecho fluidizado burbujeante. Se contará con una altura de **freeboard** suficiente (aprox. 2 m) para minimizar la elutriación de biomasa y caliza.

Justificación: Se requiere trabajar en régimen de lecho fluidizado burbujeante. Para mantener este régimen con un tamaño de partícula de 100 a 300 micras de caliza, a temperaturas de 650-750 °C, y producciones de gas sintético de 25 a 60 m³N/h, se ha considerado adecuada una sección de 0.2-0.285 m de diámetro, de manera que la velocidad del gas en el reactor esté en el rango de 0.3 a 1 m/s para mantener el lecho en régimen de fluidización burbujeante.

Se ha calculado el valor de la altura de freeboard adecuado para evitar la elutriación de partículas, según diversas correlaciones publicadas en la literatura y se ha optado por un promedio de los resultados obtenidos de las correlaciones de cálculo de Transport Disengagement Height (TDH) de Smolders y Baeyens (1997), Horio et al, (1980) y Zenz (1983).

2. Para facilitar la **salida de sólido** por la parte baja del reactor, éste tendrá la forma de un **cono excéntrico en su parte inferior, con una inclinación de 60 °**, siendo el diámetro interior superior del cono de aprox. 0.2-0.285 m, y el diámetro inferior del cono aprox. 0.06 m.

Además, el sistema de distribución de aire debe permitir el paso de sólido hacia la parte inferior del reactor, dejando el área suficiente de paso para que haya retorno de sólidos hacia la *loop seal* inferior.

Justificación: Este diseño permitirá la circulación de sólidos por la parte inferior del reactor evitando zonas de acumulación de partículas. Así, el reactor tendrá una transición en la que la sección disminuirá hasta el tamaño de la tubería de descarga de sólido, con una inclinación igual o superior al ángulo de reposo de la caliza.

3. La **loop seal inferior** deberá contar con dos cámaras comunicadas por una apertura inferior que debe ser regulable, teniendo cada cámara una alimentación de nitrógeno (0-15 l/min de N₂ a 1.2-1.6 bar abs. para las cámaras de retorno de sólidos, y 0-3 l/min a 1.2-1.6 bar abs. para la cámara de abastecimiento).

Justificación: Los caudales indicados son los requeridos para trabajar en régimen de lecho fluidizado burbujeante en la cámara de reciclado hacia el combustor y en condiciones de mínima fluidización en la cámara de abastecimiento de sólido desde el gasificador, permitiendo así el flujo de sólido entre reactores. La posibilidad de regular la apertura inferior que comunica las cámaras permitirá modificar los caudales de sólidos transportados entre reactores.

4. La **tubería de retorno de sólidos** hacia el combustor debe tener una inclinación de por lo menos 60°.

Justificación: La inclinación de 60° corresponde al ángulo de reposo de la caliza.

5. El gasificador debe contar con dos entradas regulables de agente gasificante y/o fluidizante (**gas primario y gas secundario**). Para ello, se dispondrá de dos distribuidores compuestos de *spargers* y

Ref.OTE 012/23 FABRICACIÓN, SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN MEJORADA.
INSTITUTO DE CARBOQUÍMICA

VERSIÓN FORMATO: 11.01.22

CSV : GEN-6439-6cfe-dbf-25e4-1255-7226-c783-2d5a

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN : <https://portafirmas.redsara.es/pf/valida>

FIRMANTE(1) : JUAN MANUEL RODRIGUEZ QUINTANA | FECHA : 31/10/2023 09:07 | Informa





boquillas dispuestos a diferentes alturas, cuya pérdida de carga debe ser de por lo menos el 20% de la pérdida de carga del lecho.

Justificación: La disposición de dos entradas mediante spargers a diferentes alturas permitirá alcanzar una mejor distribución del gas en el lecho. De acuerdo a la bibliografía, el diseño de un distribuidor tipo *sparger* debe suponer una pérdida de carga igual al 30% de la pérdida de carga del lecho, para asegurar que el gas entra al lecho con la velocidad y presión adecuadas.

6. El gasificador deberá tener una **entrada de biomasa** (aprox. 10-30 kg/h) mediante un tornillo sinfín en la mitad inferior del lecho, por debajo de la entrada del aire secundario.

Justificación: Al introducir el caudal de biomasa en la parte inferior del lecho, la biomasa tendrá un mayor tiempo de residencia y mejor contacto con el gas que si se introdujera en puntos superiores del lecho. Esto permitirá alcanzar un mayor rendimiento a gas.

Respecto a las **líneas de agente fluidizante y/o vapor primario y secundario:**

1. El caudal de vapor deberá entrar al gasificador a 400-450 °C, a una presión de 1.2-1.5 bar abs.

Justificación: Introducir el vapor a esta temperatura permitirá reducir el aporte de energía al gasificador aprovechando parte del calor de los gases generados en el combustor.

2. La entrada de **agente fluidizante** al gasificador (aire, oxígeno y/o nitrógeno) como gas primario deberá introducirse a una temperatura de **600 °C**, 1.2-1.5 bar abs.

Justificación: El aire, oxígeno y/o nitrógeno se utilizarán como agentes fluidizantes en períodos de calentamiento. La entrada de gas caliente permitirá aportar calor al lecho para alcanzar la temperatura necesaria para quemar biomasa, y llegar así a la temperatura requerida en la gasificación.

Respecto al **sistema de alimentación de sólidos al gasificador:**

1. Se deberá alimentar el caudal de biomasa mediante un sistema compuesto por dos tolvas y dos tornillos sinfín (uno de regulación y otro de alimentación al reactor). Se propone utilizar un sistema de doble tolva para garantizar la autonomía del sistema durante al menos una semana de operación. El tornillo en contacto con el reactor deberá ser debidamente refrigerado.

Justificación: El caudal de biomasa se controla de forma más precisa utilizando el sistema de doble tornillo. Por otra parte, se requiere el sistema de doble tolva para recargar la biomasa, permitiendo aislar una tolva de otra, y evitando la intrusión de aire en el sistema. El tornillo en contacto con el reactor debe estar refrigerado para impedir que la biomasa pueda pirolizar antes de entrar al reactor.

Respecto al **Combustor:**

1. La placa distribuidora será de forma cónica con salida central para caudal de purga (0-10 kg/h). La placa contará con las boquillas y orificios necesarios para realizar una correcta distribución del aire. El ángulo del cono debe ser de al menos 60°. La placa debe estar diseñada de forma que dé una pérdida de carga de aproximadamente el 30% de la pérdida de carga del lecho. El sistema de extracción en continuo debe permitir la manipulación, medida y control del caudal de cenizas extraído del reactor.

Justificación: Para evitar la acumulación de cenizas en el sistema y mantener un valor determinado de conversión de la caliza, se requiere trabajar con un caudal de purga determinado, que se modificará según las condiciones experimentales. El valor del caudal de purga vendrá determinado por las necesidades energéticas del sistema y la calidad del gas que se quiera obtener. Por tanto, es imprescindible contar con el sistema adecuado para poder modificar y medir estos caudales según se requiera. La purga se realizará en el combustor y no en el gasificador, para evitar la pérdida de char que no haya terminado de reaccionar en el gasificador. De acuerdo a la bibliografía, el número de orificios





MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



FINANCIADO POR LA
UNIÓN EUROPEA
Next Generation EU



del distribuidor debe suponer una pérdida de carga igual al 30% de la pérdida de carga del lecho, para asegurar que el gas entra al lecho con velocidad suficiente para lograr una buena distribución.

2. Se propone una **sección inferior del gasificador de forma cónica**, de altura no inferior a aprox. 0.60 m, que se reduzca hasta acoplarse con la parte superior del reactor en la que el sólido será transportado neumáticamente hasta la salida del combustor. En el inicio de esta parte del reactor se incluirá la entrada de agente fluidizante secundario (hasta 40 kg/h de aire o nitrógeno).

Justificación: Para los caudales de gas de combustión que se espera obtener (40 a 75 m³N/h) y los caudales de sólidos a circular (100-400 kg/h) se espera que la geometría propuesta permita operar con tiempos de residencia apropiados para lograr la completa calcinación de la caliza, a la vez que se realiza una transición hacia el régimen de transporte neumático en la parte superior del reactor.

Respecto a la **línea de agente fluidizante primario:**

1. El gas primario debe introducirse al combustor a 600 °C.

Justificación: Precalear el gas a 600°C permitirá reducir el caudal de biomasa alimentado al combustor.

Respecto al **sistema de alimentación de sólidos al combustor:**

- Se utilizará un sistema de tolva con dos tornillos, uno de regulación (para cada material) y otro de alimentación, y de un mezclador que permita alimentar la biomasa y la caliza juntos al combustor mediante la entrada de un solo tornillo sinfín. El tornillo que esté en contacto con el reactor deberá estar debidamente refrigerado. Las tolvas deben tener las dimensiones necesarias para poder garantizar la autonomía del sistema durante una semana de operación.

Justificación: Para reducir el número de entradas en la pared del reactor, se plantea alimentar juntos la caliza y la biomasa. Por otra parte, utilizar el sistema de doble tornillo permitirá controlar de una manera más precisa el caudal de sólido alimentado. La refrigeración del tornillo que esté en contacto con el reactor evitará que tanto la caliza como la biomasa puedan reaccionar antes de su entrada al combustor.

Respecto a la **salida de sólidos y gases del combustor:**

1. El sólido recogido en el primer ciclón será conducido mediante una tubería *stand pipe* a una válvula tipo *loop seal* con dos salidas: una hacia la parte inferior del combustor y otra hacia la parte superior del lecho del gasificador. Para ello deberá contar con tres cámaras comunicadas por una apertura inferior que debe ser regulable, teniendo cada cámara una alimentación de nitrógeno (0-10 l/min de N₂ a 1.3-1.8 bar abs. para las cámaras de retorno de sólidos, y 0-2 l/min a 1.3-1.8 bar abs. para la cámara de abastecimiento). La *stand pipe* deberá estar en posición vertical.

Justificación: La tubería *stand pipe* tiene la función de hacer de sello entre reactores, por lo cual se espera que opere de una manera más eficiente en vertical, al reducirse el volumen hueco con esta disposición. Su altura deberá ser suficiente para compensar la diferencia de presión entre el ciclón y los puntos de retorno del sólido al gasificador y combustor.

Los caudales indicados para la *loop seal* permitirán operar en régimen de lecho fluidizado burbujeante en las cámaras de reciclo hacia el combustor y/o gasificador, y en condiciones de mínima fluidización en la cámara de abastecimiento del sólido que baja por la *stand pipe*, permitiendo así el flujo de sólido entre reactores. La posibilidad de regular la apertura inferior que comunica las cámaras ayudará a modificar los caudales de sólidos transportados entre reactores.

2. Se dispondrá en paralelo de un sistema de **regulación de la presión** aguas arriba, y de un ventilador **VTI** o equivalente que ayude a evacuar el gas.

Justificación: Para lograr un correcto funcionamiento y circulación de sólidos entre reactores es imprescindible lograr equilibrar las presiones de los puntos de unión de los reactores. Debido a posibles

Ref.OTE 012/23 FABRICACIÓN, SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN MEJORADA.
INSTITUTO DE CARBOQUÍMICA

VERSIÓN FORMATO: 11.01.22

CSV : GEN-6439-6cfe-dbf-25e4-1255-7226-c783-2d5a

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN : <https://portafirmas.redsara.es/pf/valida>

FIRMANTE(1) : JUAN MANUEL RODRIGUEZ QUINTANA | FECHA : 31/10/2023 09:07 | Informa





MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



FINANCIADO POR LA
UNIÓN EUROPEA
Next Generation EU



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

variaciones en las pérdidas de carga de los elementos dispuestos aguas debajo de los reactores, se ha planteado el uso de una válvula de regulación de presión al final de la línea, que permitirá trabajar con una presión de referencia, que podrá ser modificada según se considere necesario. Con este sistema se trabajará en toda la línea en condiciones de ligera sobrepresión respecto a la presión atmosférica de forma que el gas tenga el impulso suficiente para alcanzar la salida a la atmósfera.

La otra opción es alimentar los gases a los reactores a presión atmosférica y utilizar al final de la línea un ventilador VTI que permita a los gases de combustión vencer las pérdidas de carga aguas abajo del reactor y ser evacuados.

Respecto a la **etapa de limpieza del gas de gasificación**:

1. Para poder operar los reactores se requiere **bajar la temperatura del gas a 500 °C**, mediante un sistema de inyección de agua en línea, formado por un atomizador, un depósito presurizado de agua de 1 m³ (P = 5 bar) y de un alimentador de flujo másico de agua.

Justificación: Los materiales que se utilizan para limpiar los compuestos clorados y de azufre no deben superar los 500 °C. Puesto que el gas sintético producido en el gasificador abandona éste a temperaturas entre 650-750 °C, es necesario enfriarlo. Para evitar incluir un intercambiador más, se ha propuesto el enfriamiento de la corriente mediante la inyección de agua en línea.

2. Para operar en el tercer reactor (limpieza de alquitranes) **el gas deberá precalentarse a 850 °C**. Para ello se introducirá una corriente de oxígeno en tubería (0-50 l/min).

Justificación: Los catalizadores utilizados para eliminar los alquitranes de la corriente gaseosa trabajan a aprox. 850 °C. Mediante la combustión de una pequeña parte del gas se aportará la energía necesaria para aumentar su temperatura de 500 a 850 °C.

3. Los reactores de limpieza del gas serán de **aprox. 0.1-0.12 m de diámetro interno** (DN 100-125) aproximadamente, permitiendo **introducir sólido por su parte superior y vaciarlo por la parte inferior. La altura del lecho será la necesaria para que la velocidad espacial** del gas sea de 15000 h⁻¹ para el reactor de limpieza de compuestos clorados, de 20000 h⁻¹ para los compuestos de azufre y de 20000 h⁻¹ para la limpieza de los alquitranes.

Justificación: Se desea minimizar la dispersión axial del gas, acercándose todo lo posible al régimen de flujo pistón en el reactor, con el compromiso de no aumentar en exceso la pérdida de carga del lecho de sólido. Con el diámetro propuesto, operando a las velocidades espaciales indicadas para cada reactor, se obtiene valores de dispersión pequeños y pérdidas de carga razonables.

4. Tras pasar por el intercambiador de calor se dispondrá de una **válvula de regulación de la presión agua arriba**.

Justificación: La válvula de regulación de presión de la línea el gasificador se utilizará para poder trabajar a una presión estable en la cabeza en el gasificador, compensando posibles variaciones de presión en los elementos dispuestos aguas abajo del gasificador (ciclones, filtros, reactores de limpieza).

Respecto al **sistema de válvulas y conexiones**:

1. Debe tenerse en cuenta la particular exigencia en las prestaciones requeridas en las válvulas que se instalarán en las líneas que operan a alta temperatura (salida de los gases de combustión, salida del gas sintético, etapas de limpieza, recirculación de sólidos).

Justificación: Se requiere instalar válvulas en líneas que deben operar a alta temperatura en diversos puntos de la instalación.

Respecto a la **simulación de procesos**:

Ref.OTE 012/23 FABRICACIÓN, SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN MEJORADA.
INSTITUTO DE CARBOQUÍMICA

VERSIÓN FORMATO: 11.01.22

CSV : GEN-6439-6cfe-dbf-25e4-1255-7226-c783-2d5a

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN : <https://portafirmas.redsara.es/pf/valida>

FIRMANTE(1) : JUAN MANUEL RODRIGUEZ QUINTANA | FECHA : 31/10/2023 09:07 | Informa





MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



FINANCIADO POR LA
UNIÓN EUROPEA
Next Generation EU



- I. Debe realizarse la simulación del proceso utilizando una herramienta de simulación de procesos químicos de la cual disponga licencia el CSIC (Aspen Plus (AP) de AspenTech®).

Justificación: La simulación permitirá predecir el comportamiento del proceso, analizar diferentes casos cambiando los valores de las principales variables de operación, así como optimizar las condiciones de operación de la planta y plantear posibles modificaciones. Para poder utilizar la simulación es necesario que en el CSIC cuente con su licencia del programa utilizado. De esta forma se podrá consultar en paralelo al uso de la planta, permitiendo hacer un seguimiento del funcionamiento de la instalación durante toda su vida útil. Este software es necesario para poder modificar las condiciones del proceso y analizar las correlaciones entre el proceso real y el simulado, siendo el mismo que ya se utiliza para otros trabajos y con el que se busca homogeneidad en los resultados.

Firmado,

D. Juan Manuel Rodríguez Quintana
Oficial Mayor

Ref.OTE 012/23 FABRICACIÓN, SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN MEJORADA.
INSTITUTO DE CARBOQUÍMICA

VERSIÓN FORMATO: 11.01.22

CSV : GEN-6439-6cfe-dfbf-25e4-1255-7226-c783-2d5a

DIRECCIÓN DE VALIDACIÓN : <https://portafirmas.redsara.es/pf/valida>

FIRMANTE(1) : JUAN MANUEL RODRIGUEZ QUINTANA | FECHA : 31/10/2023 09:07 | Informa

