



**Centro
Politécnico Superior
Universidad Zaragoza**



**Departamento de
Ingeniería Mecánica
Universidad Zaragoza**

PROYECTO FIN DE CARRERA

Curso 2010/2011

TORREFACCIÓN DE BIOMASA: DISEÑO Y PROPUESTA ECONÓMICA DE UN REACTOR EXPERIMENTAL



INGENIERÍA QUÍMICA

Diseño de equipos en la Ingeniería Química

Autor: **Jorge Trasobares Sánchez**

Director: **Jair Meza Blanco**

Ponente: **Begoña Peña Pellicer**

MARZO DE 2011

Agradecimientos:

Es una gran ocasión para dedicar unas palabras a los que por estar tan cerca, en ocasiones, se les deja de contemplar en todo su esplendor, de la misma manera que si se intentara contemplar un grandioso cuadro con la nariz pegada al lienzo.

Especialmente a mis padres, quienes siempre se han esforzado y me han motivado para que tuviera la mejor formación posible. Gracias, es por vosotros, por quienes he llegado a ser la persona que soy, de lo que me encuentro muy orgulloso, espero estar a la altura como vuestro hijo en todo momento. A mi hermano, que esboza un camino que es una inspiración y a quien siempre le deberé también parte de mis éxitos. Asimismo quiero agradecer al resto de mi familia, por la reconfortadora armonía y buenos momentos que se comparten. Un especial agradecimiento se merece mi hermosa compañera, que con su dulzura impregna a la vida de un embriagador aroma que no quiero dejar de sentir. También a su familia, con quienes desde el primer momento me sentí como en casa y con los que comparto felices momentos. A los profesores que desde pequeño han tenido la capacidad de despertarme el interés por lo que sucede a mi alrededor. También al director y a la ponente del proyecto final de carrera, quienes han perfilado mis aptitudes para la investigación, en el vasto campo del conocimiento. A mis compañeros y amigos con los que he compartido momentos de todo tipo y espero seguir compartiendo.

A todos vosotros, gracias.

TORREFACCIÓN: DISEÑO Y PROPUESTA ECONÓMICA DE UN REACTOR EXPERIMENTAL

RESUMEN

El presente proyecto se centra en la torrefacción de la biomasa de origen vegetal, mecanismo de descomposición aerobia por medio del cual se consigue mejorar sus cualidades como combustible. Dada la situación energética actual, la biomasa se presenta como una alternativa al uso de combustibles sólidos, pero muestra una serie de desventajas que hacen que el proceso no sea tan eficiente como se desearía.

En el primer capítulo se establece la motivación, los objetivos y el alcance del proyecto, tras lo cual, en el capítulo dos, se trata el proceso de la torrefacción. La biomasa adecuada para el proceso, está compuesta principalmente por hemicelulosa, celulosa y lignina. La hemicelulosa es el compuesto que se descompone mayoritariamente en el proceso de torrefacción, consistente en tratar a la biomasa en una atmósfera libre de agentes oxidantes a una temperatura de entre 200-300 °C y presión atmosférica. En este proceso se obtienen una serie de compuestos volátiles y un producto sólido, que es lo realmente interesante, ya que entre otras características, este producto tiene un mayor poder calorífico, un carácter más hidrófobo y es más frágil, lo que le convierte en un mejor combustible que la biomasa inicial.

El capítulo tres revisa la tecnología del proceso comentando los equipos necesarios para el desarrollo del proceso. Una vez explicadas las configuraciones más habituales para el reactor, atendiendo al modo de operación o al contacto entre fases, y vistos algunos modelos específicos susceptibles de emplearse, se realiza una comparativa entre ellos eligiendo el más adecuado. El reactor seleccionado es un lecho fluidizado, especialmente interesante por su alta transferencia de calor, que repercute en bajos tiempos de operación, y por la oportunidad que ofrece para intentar perfeccionar la tecnología existente. También se desarrollan distintas posibilidades existentes para mejorar la fluidización, tanto desde el punto de vista del diseño como el de operación.

El capítulo cuatro detalla el prototipo de reactor, dimensionado para torrefactar 1 kg de biomasa por experimento, explicando la forma de las distintas partes de las que consta. Un parámetro fundamental para su diseño es la capacidad de tratar una muestra heterogénea en cuanto a la forma, tamaño y densidad de partícula, por lo cual se ha elegido una cámara de reacción troncocónica. En este apartado también se configura el prototipo de planta experimental calculando los caudales de gas así como los calores que se necesitan aportar en el calentador y retirar en el condensador.

Todo lo anterior servirá para hacer una valoración económica aproximada de la planta experimental, la cual se recoge en el capítulo cinco. Como capítulo final se tienen las conclusiones del proyecto donde se resume el trabajo realizado, los recursos utilizados y los aportes realizados.

Contenido

1 INTRODUCCIÓN	9
1.1 MOTIVACIÓN	9
1.2 OBJETIVOS	10
1.3 ALCANCE	10
2 PROCESO DE TORREFACCIÓN	11
2.1 LA BIOMASA	11
2.2 TORREFACCIÓN	12
2.3 MECANISMOS DE REACCIÓN	13
2.4 PRODUCTOS DE REACCIÓN	16
2.5 PROPIEDADES DE LA BIOMASA TORREFACTADA	20
2.5.1 Análisis elemental	20
2.5.2 Propiedades mecánicas	21
2.5.3 Propiedades generales	22
2.6 CONCLUSIONES	24
3 TECNOLOGÍA	25
3.1 PLANTA DE TORREFACCIÓN	25
3.2 REACTOR	27
3.3 MODELOS ESPECÍFICOS DE REACTOR	29
3.3.1 Tornillos sin fin	29
3.3.2 Horno rotativo	30
3.3.3 Lecho fluidizado	31
3.3.4 Torbed	32
3.3.5 Lecho fijo y móvil	33
3.3.6 Turbo secador de Wyssmont	34
3.4 COMPARATIVA	35
3.5 CONSIDERACIONES DE LA TECNOLOGÍA SELECCIONADA	36
3.5.1 Factores de operación	37
3.5.2 Factores de diseño	38
3.6 CONCLUSIONES	39
4 DISEÑO	40
4.1 REACTOR	40
4.1.1 Descripción general	41

4.1.2 Dimensionamiento	42
4.1.3 Factores de diseño	44
4.2 PLANTA	48
4.3 CONCLUSIONES	52
5. PROPUESTA ECONÓMICA.....	53
5.1 COSTES DE OPERACIÓN	53
5.2 COSTES DE FABRICACIÓN.....	53
5.3 CONCLUSIONES	56
6 CONCLUSIONES	57
FIGURAS.....	59
TABLAS	60
ECUACIONES	60
BIBLIOGRAFÍA.....	61

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

El presente proyecto final de carrera se realiza durante el curso 2010/2011 alentado por la búsqueda de soluciones a la situación energética actual, en la que los combustibles, especialmente los fósiles, están sometidos a subidas en el valor de su precio.

Acompañado por un crecimiento económico, el uso de estos combustibles está desequilibrando los niveles en concentración de CO₂, y esto afecta a otras constantes de la vida en el planeta, cómo la temperatura o la acidez de los océanos.

La biomasa es una fuente de energía considerada renovable, con balance casi neutro en emisiones de CO₂, la gran ventaja de su uso es que ésta, en realidad, se comporta como un vector energético y su explotación sostenible puede colaborar a encontrar el equilibrio de los ecosistemas además de desarrollar nuevas actividades económicas en zonas rurales.

Durante su periodo vivo los vegetales se comportan como un sumidero de CO₂ almacenando además parte de la energía que recibimos del Sol. Anualmente la fotosíntesis acumula de 5 a 8 veces más de energía en la biomasa de lo que consume el ser humano contabilizando todos los recursos [2]. Eso hace que su aprovechamiento energético mediante combustión se considere renovable. Con el conocimiento en el uso de esta fuente energética no se debe olvidar que como ser autótrofo los vegetales son la base del resto de seres vivos del planeta. Además, la cantidad de tierra necesaria para su cultivo y la competencia entre el uso alimenticio y energético de diferentes productos hace que se tenga que abordar el tema con gran medida.

Últimamente se está fomentado el uso de residuos forestales y cultivos energéticos. Sin embargo la biomasa tiene algunas desventajas frente a otras opciones del sector. Tiene bajo poder calorífico, alto contenido en humedad, alta resistencia a la trituration y además pueden ser deterioradas por hongos.

La pirólisis¹ de biomasa es un tratamiento térmico de largo recorrido en el que se cambian las propiedades del compuesto. Si se trabaja en un rango de entre 200 y 300 °C nos encontramos frente a un nuevo proceso llamado torrefacción, mediante el cual mejoramos las propiedades del combustible.

Se han realizado varios estudios en diferentes centros de investigación, por lo que se considera apropiado hacer una recopilación de la información más importante

¹ Pirólisis: Descomposición química de la materia orgánica y todo tipo de materiales excepto metales y vidrios causada por el calentamiento en ausencia de oxígeno.

que sirva de base para desarrollar un prototipo capaz de llevar a cabo la torrefacción y aumentar el conocimiento sobre este proceso con líneas de estudio propias sobre el proceso.

1.2 OBJETIVOS

Los objetivos concretos planteados en el proyecto son los siguientes:

- Desarrollar una base de datos bibliográfica, en la que se basará la primera parte del PFC, dedicada al Estado del Arte de la torrefacción y de las actuales tecnologías de explotación.
- Conocer en profundidad el proceso de torrefacción de biomasa lignocelulósica.
- Realizar un estudio comparativo de las tecnologías disponibles basada en criterios económicos y técnicos, con el fin de seleccionar la más apropiada para la planta experimental que se quiere diseñar.
- Diseñar un prototipo experimental, de pequeña capacidad que pueda construirse en el futuro y sirva para estudiar el proceso y para mejorar la tecnología.
- Evaluar económicamente los costes de fabricación y de operación del prototipo.

1.3 ALCANCE

El proyecto analiza las condiciones del proceso de torrefacción, estudiando las necesidades para torrefactor la biomasa, y las mejoras que se obtienen en las características del producto. Con ello, dependiendo de cada caso, es posible estudiar si es conveniente introducir la torrefacción.

Se comentan los equipos necesarios para llevar a cabo la torrefacción estudiando los diferentes tipos de reactores, evaluando diferentes características como la capacidad de tratamiento, contacto entre fases, tiempo de reacción, tamaño de partícula capaz de tratar, costes de inversión, costes de operación y oportunidad de innovación. Una vez realizada esta comparativa se selecciona un tipo de reactor para el cual se estudian posibles mejoras.

Con estos conocimientos se dimensiona un torrefactor, que debería ser capaz de torrefactor 1 kg de biomasa por experimento y a través del cual se puede avanzar tanto en el conocimiento de la torrefacción como en el de la fluidización.

Se realiza también una evaluación de los costes que tendría el conjunto, con lo que decidir si se puede llegar a implantar el prototipo diseñado.

2 PROCESO DE TORREFACCIÓN

En este capítulo se presenta el proceso de la torrefacción, por medio del cual se consiguen mejorar las propiedades de la biomasa como combustible. Se comienza exponiendo la materia prima y sus componentes mayoritarios, más adelante se define el proceso de torrefacción y se muestran sus aspectos principales, como el balance de materia y energía. También se explica el mecanismo de descomposición térmica que sufre la biomasa durante la torrefacción y se detallan los productos que obtenidos. Se continúa explicando las propiedades del producto sólido resultante, fijándose en el análisis elemental y el poder calorífico del producto, se comentan los cambios producidos en la resistencia mecánica del producto con respecto de la biomasa original y otras propiedades generales. Para terminar, se exponen las conclusiones del capítulo.

2.1 LA BIOMASA

El término biomasa hace referencia a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en un proceso biológico, incluyendo tanto los de origen vegetal como animal, comprendiendo un conjunto muy heterogéneo de materiales.

Actualmente se acepta el término biomasa, para designar al grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable a corto plazo y formadas por vía biológica, quedando excluidos los combustibles fósiles y sus derivados aunque tuvieran un origen biológico. Dentro de este amplio espectro de materiales, el estudio se centra en la biomasa lignocelulósica, compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, cuyo porcentaje varía en función de la especie vegetal como se aprecia en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Componentes de la biomasa [3].

Componente (%)	Biomasa Herbácea	Biomasa Leñosa
Celulosa	35-50	55-65
Hemicelulosa	20-30	10-20
Lignina	10-20	20-30
Extractivos y otros	20-30	10-20
Cenizas	5-20	0,1-0,5

La celulosa es un polímero lineal constituido por unidades de D-glucosa ($C_6H_{10}O_5$)_n unidos por enlaces tipo éter, su estructura es la misma para todos los vegetales, variando el grado de polimerización y alcanzando masas moleculares superiores a 100.000 g/mol. Las cadenas lineales forman haces fibrosos, que proporcionan una estructura cristalina altamente inerte.

Las hemicelulosas son polímeros ramificados de masa molecular inferior a 30.000 g/mol, que contienen entre 50 y 200 unidades de D-xilosa ($C_5H_{10}O_5$)_n, las más abundantes, o D-manosa ($C_6H_{12}O_6$)_n presentes principalmente en resinas.

La lignina es un polímero tridimensional de unidades fenilpropano ($C_{10}H_{15}O_3$)_n, con gran número de ciclos aromáticos unidos entre ellos por ciclos furano o enlaces éter, es el agente de unión de las fibras de celulosa.

La biomasa lignocelulósica contiene además otros compuestos como: lípidos, hidrocarburos, compuestos fenólicos, hidratos de carbono y proteínas. También contiene sustancias minerales, que formarán las cenizas y que representan del 0,3 al 1% de la masa total, y que pueden ser de interés debido a que pueden actuar como catalizadores del proceso.

El análisis elemental de la composición media de la biomasa, en peso, podría dar como resultado: 50% carbono, 6% hidrógeno y 44% oxígeno, pudiéndose representar mediante la fórmula empírica $C_{1.44}H_{1.44}O_{0.66}$ [4].

En comparación con el carbón, la biomasa tiene un menor poder calorífico, su naturaleza fibrosa le confiere una alta tenacidad y posee un mayor contenido en humedad. Estas propiedades tienen impactos negativos en el uso de este recurso como fuente de energía, tanto en el almacenamiento, transporte, en la adecuación del tamaño del material y la propia combustión.

2.2 TORREFACCIÓN

Se llama torrefacción al proceso de descomposición térmica que sufre la biomasa a temperaturas de 200 a 300 °C a presión atmosférica y en ausencia de agentes oxidantes. Durante este proceso se elimina el agua y productos orgánicos volátiles a la vez que se acortan las largas cadenas de polisacáridos. Este tratamiento también se encuentra en la bibliografía mediante otros nombres como puede ser tostado o pirólisis moderada.

El resultado del proceso es un producto con mejores propiedades como combustible sólido: mayor poder calorífico, más hidrófobo, menos resistente a la molienda y sin desarrollo de actividad bacteriana que puede deteriorar el combustible.

En la Figura 2.1 se representa el balance de materia y energía en la torrefacción, apreciando que tras el tratamiento, la biomasa torrefactada puede contener el 90% de la energía inicial en el 70% de la masa inicial. El 30 % de masa restante la forma la materia volátil que contiene el 10% de energía inicial. A consecuencia de lo observado se aprecia una densificación energética en el producto sólido obtenido [5].

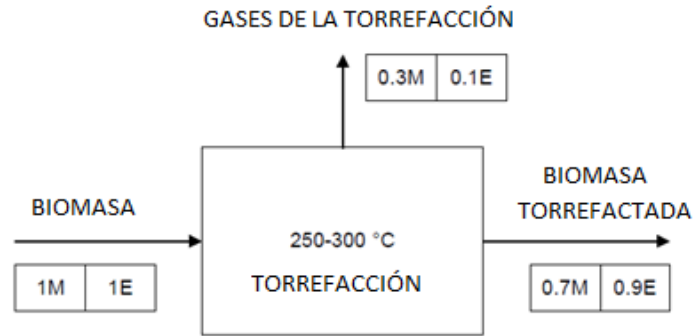


Figura 2.1 Esquema torrefacción [2].

2.3 MECANISMOS DE REACCIÓN

La descomposición térmica de la biomasa se puede describir como la suma de la descomposición de cada uno de los tres componentes mayoritarios, que siguen una cinética de primer orden pero con parámetros diferentes y produciéndose la reacción de cada compuesto preferentemente en diferentes rangos de temperaturas [4].

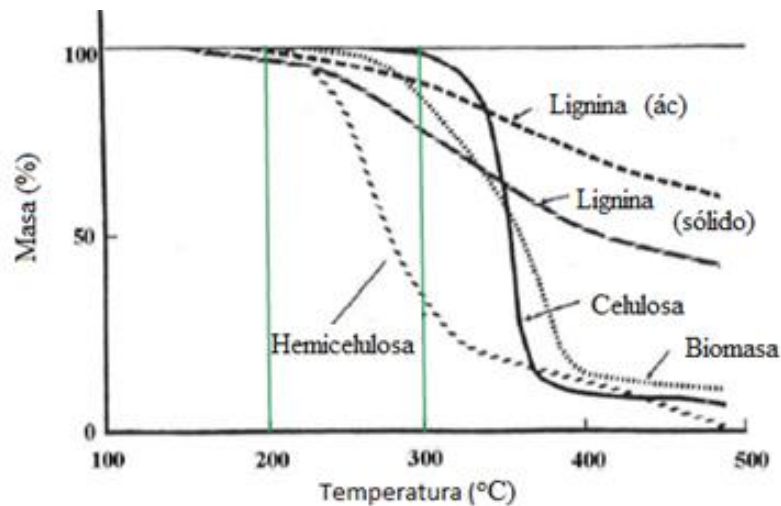


Figura 2. 2 Pirólisis de la biomasa de algodón [2].

En la Figura 2.2 se representa el estudio termo-gravimétrico² del tallo del algodón, el eje de ordenadas corresponde al tanto por ciento en masa y el eje de coordenadas a la temperatura. En la figura, la torrefacción se encuentra delimitada por dos isotermas en 200 y 300 °C y se puede observar cómo la pérdida de masa en este rango de temperaturas se debe principalmente a la descomposición de la hemicelulosa y en menor medida de la lignina.

De los tres principales constituyentes de la biomasa, la celulosa ha recibido la mayor atención, debido a que es el componente mayoritario. Como se puede apreciar en la Figura 2.2 la descomposición de este material queda fuera del rango de la torrefacción, descomponiéndose la mayor parte a temperatura aproximada de 350 °C, donde se encuentra el punto de inflexión de la curva y dándose por concluida su descomposición sobre los 400 °C, donde la pendiente de la curva es muy cercana a cero.

La lignina tiene una descomposición moderada, representada por una menor pendiente, pero que abarca un gran rango de temperaturas. En consecuencia de la descomposición de este material, además de la pérdida de peso, se produce un ligero ablandamiento, se forma “char” y se libera materia volátil.

La hemicelulosa es el componente más reactivo de la biomasa y el que se descompone principalmente durante la torrefacción. El mecanismo de descomposición de la hemicelulosa puede ser descrito en dos etapas, una primera a temperaturas inferiores a los 250 °C donde se dan reacciones de deshidratación y otra a temperaturas superiores en la que se dan preferentemente reacciones de despolimerización [2, 4].

Di Blasi y Lanzetta describieron el modelo de reacción como una combinación de dos etapas con reacciones paralelas. En la Figura 2.3 se puede observar el mecanismo de descomposición, donde “A” representa la hemicelulosa, “B” el sólido intermedio buscado que se forma especialmente a temperaturas por debajo de los 250 °C y “C” representa el producto carbonizado final o “char”. “V₁” y “V₂” son los gases y volátiles que se forman desde “A” y desde “B” respectivamente. Las energías de activación k_{v1} y k_{v2} son mayores que k_1 y k_2 respectivamente, lo que significa que a temperatura altas se favorece la formación de los compuestos gaseosos [2].

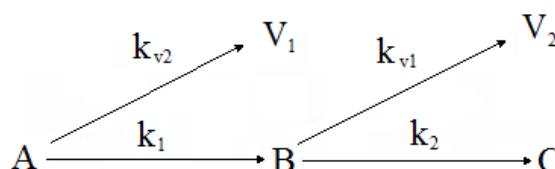


Figura 2.3 Mecanismo de reacción [6].

² Estudio termo-gravimétrico: Medida de la evolución de la masa de una muestra en función de la temperatura con una atmósfera controlada.

El rendimiento al sólido “B” desciende al aumentar la temperatura, ya que se favorecen las demás reacciones hacia “V₁”, “V₂” y “C”, aunque también desciende el tiempo de reacción como se observa en la Figura 2.4. En ella se representa el peso relativo de cada compuesto “A”, “B” y “C” frente a la temperatura, mostrando también el tiempo que se ha tardado en completar la reacción a esa temperatura.

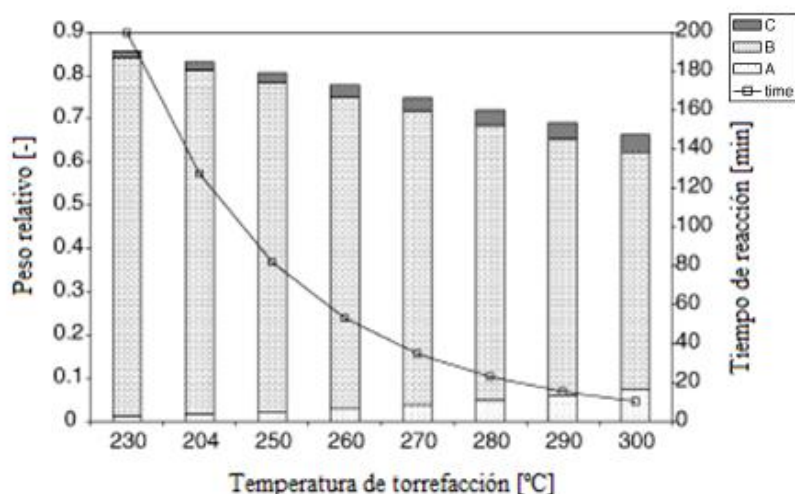


Figura 2.4 Rendimiento a los sólidos “A”, “B”, “C” a diferentes temperaturas y tiempos de reacción [6].

Además de la temperatura y el tiempo de reacción, el tamaño de partícula es un parámetro esencial en la torrefacción de biomasa a nivel industrial. Para asegurarse el mínimo tiempo de residencia es importante cerciorarse que la etapa que controla la cinética del proceso es la reacción química y no la conducción o convección de calor.

Dos números adimensionales cobran importancia para el buen control de la cinética del proceso, el número de Biot, que representa el cociente entre el calor de convección y el calor de conducción, y el número designado como Pirólisis Externa, que representa el cociente entre el calor de convección y la tasa de reacción química.

Ecuación 1

$$Bi = \frac{\alpha \times r_p}{\lambda}$$

Ecuación 2

$$P_y = \frac{\alpha}{K_1 \times \rho \times c_p \times r_p}$$

α : Coeficiente de transferencia de calor [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]

r_p : Radio de la partícula, considerándola esférica [m]

λ : Conductividad térmica [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]

k_1 : Constante cinética

ρ : Densidad [kg m^{-3}]

c_p : Capacidad calorífica [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]

El control cinético óptimo se consigue con un número de Biot mucho menor que la unidad (cuando el calor de conducción es mucho más rápido que el calor de convección) y con un número de pirólisis externa mucho mayor que la unidad (lo que implica que el calor de convección es mucho más rápido que la tasa de reacción química) [6].

2.4 PRODUCTOS DE REACCIÓN

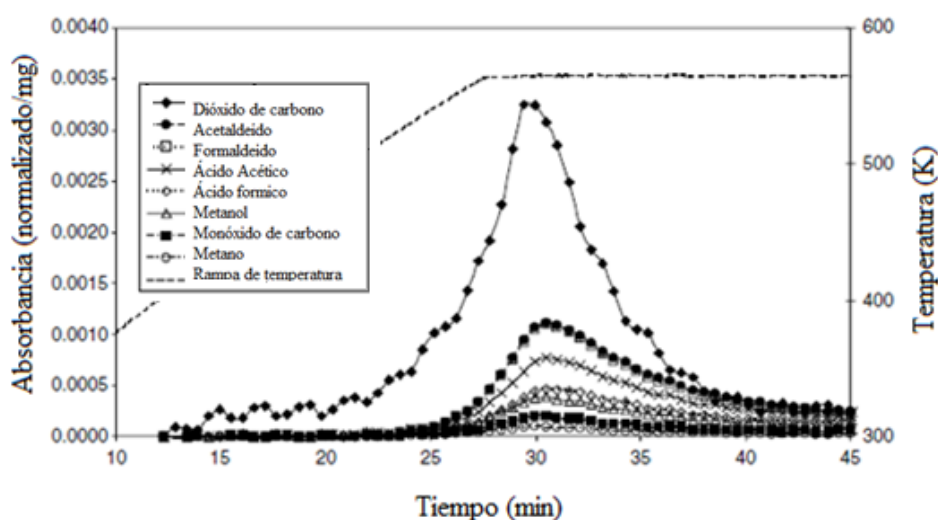


Figura 2.5 Productos gaseosos obtenidos tras la torrefacción [7]

Como se ha comentado con anterioridad, tras el proceso de torrefacción se obtiene una serie de productos gaseosos y un residuo sólido. De los productos gaseosos que se forman durante la torrefacción, el agua es el principal, produciéndose mediante dos mecanismos diferentes: en primer lugar durante el secado por evaporación, y en segundo lugar por la deshidratación y despolimerización de los polímeros. Además del agua, se encuentran una serie de productos condensables como: formaldehído, acetona, ácido acético, ácido fórmico, acetona, metanol y trazas de fenol, furfural y amoniaco. Aparte de se encuentran gases no condensables como el CO_2 y CO . Estos productos

gaseosos se pueden apreciar en la Figura 2.5, donde el área bajo la curva para cada producto es proporcional a la cantidad producida durante la torrefacción.

En la Tabla 2.2 se aprecia cómo al aumentar la temperatura de torrefacción se pierde más masa con los volátiles, se pasa de tener un 85,9 % de material orgánico para una torrefacción a 250 °C y 30 minutos a un 65,5 % de material orgánico para una torrefacción a 300 °C y 10 minutos. Esta pérdida en material orgánico es debida al aumento en la generación de ácido acético y otros orgánicos especialmente, aunque también se aprecia un aumento en la cantidad de CO₂ y CO producido.

Tabla 2.2 Compuestos formados en la torrefacción de la caña de alpiste [8].

	250 °C, 30 minutos	300 °C, 10 minutos
	Masa (%)	Masa (%)
Biomasa torrefactada		
Material orgánico	85,9	65,5
Cenizas	1,3	1,3
Total	87,2	66,8
Volátiles		
Vapor	5,7	6,6
Ac. Acético	2,1	7,2
Otros orgánicos	1,8	14,2
CO ₂	2,9	4
CO	0,3	1,2
H ₂	Trazas	Trazas
CH ₄	0	Trazas
Total	12,8	33,2

Lo que se busca en la torrefacción es el residuo sólido que se obtiene, en la Tabla 2.3 se dan los resultados del análisis termo-gravimétrico obtenidos para diferentes biomásas y grados de torrefacción³. Mientras que el contenido en humedad y material orgánico desciende al aumentar la temperatura, la concentración en las cenizas y en carbón fijo aumenta. Comparando el material sin tratamiento con respecto al material tratado con el mayor grado de torrefacción, se encuentra que: la paja de trigo sufre los mayores cambios en contenido de material orgánico, se observa una pérdida de un 32%, mayor proporción que para el sauce, el cual pierde un 11% o la caña de alpiste que pierde un 14%. En cuanto al carbón fijo también es la paja de trigo la que mayores cambios sufre, aumentando un 120%, mientras el sauce aumenta el 91% y la caña de alpiste un 76%. Respecto a la humedad, el sauce pierde un 100%, aunque cabría

³ Grado de torrefacción: Hace referencia al tiempo de residencia y a la temperatura de torrefacción. Se tiene un grado de torrefacción más alto con tiempos y temperaturas mayores.

destacar que en un principio su humedad sea cercana a la mitad que la cantidad de las otras especies, que pierden alrededor de un 85% para la paja de trigo y un 75% la caña de alpiste que es la que más humedad conserva de las estudiadas.

Tabla 2. 3 Resultados del TGA, material orgánico, cenizas y carbón fijo en base seca [4].

	Sin tratamiento	Temperatura de torrefacción (K)			
	-	503	523	543	563
Caña de alpiste					
Humedad (%)	4,7	-	1,9	1,3	1,2
Material orgánico (%)	82,5	-	80,3	76,6	70,5
Cenizas (%)	5,5	-	6,4	7,3	8,3
Carbón fijo (%)	12,1	-	13,3	16,1	21,3
Paja de trigo					
Humedad (%)	4,1	-	0,9	0,3	0,8
Material orgánico (%)	76,4	-	77,0	65,2	51,8
Cenizas (%)	6,3	-	7,4	8,4	10,2
Carbón fijo (%)	17,3	-	15,6	26,5	38,0
Sauce					
Humedad (%)	2,8	0,5	0,1	0,2	0,0
Material orgánico (%)	87,6	82,1	82,1	79,3	77,2
Cenizas (%)	1,7	1,8	1,9	2,1	2,3
Carbón fijo (%)	10,7	16,1	18,4	18,6	20,5

En la Figura 2.6 se muestra el DTG⁴ para la caña de alpiste con una atmósfera inerte, dándose la descomposición térmica de las diferentes muestras (sin tratar y torrefactada a diferentes temperaturas). Se observa un pico que precede al principal, para la muestra sin tratar y en menor medida para la torrefactada con menor temperatura. Este primer pico representa la pérdida de masa debida a la formación de volátiles por descomposición de hemicelulosa y lignina. El segundo es consecuencia de la descomposición de la celulosa especialmente. Para temperaturas de torrefacción por encima de 543 K no existe el primer pico, observándose un aumento en el área del segundo, por lo cual se concluye que por medio de la torrefacción ya se han eliminado los compuestos que se descompondrían a esas temperaturas [7].

En el experimento que muestra la Figura 2.7, la atmósfera es aire, por lo que esta vez se lleva a cabo la combustión de la biomasa. Como se puede apreciar en la figura, el proceso se lleva a cabo en dos etapas, la primera alrededor de los 600 K y la segunda sobre los 720 K. Conforme aumenta la temperatura de torrefacción a la que ha sido sometida cada muestra, disminuye el porcentaje de pérdida de masa en la primera etapa,

⁴ Tras un experimento termo-gravimétrico se pueden representar la pérdida de masa vs. la temperatura y se tiene las gráficas TGA (análisis termo-gravimétrico) o la variación de la masa por unidad de tiempo vs. la temperatura, obteniendo las gráficas DTG (análisis termo-gravimétrico diferencial).

representada por el primer pico, aumentado la pérdida de masa en la segunda etapa, segundo pico, y viceversa. Las conclusiones que obtienen los investigadores es que el primer pico representa la combustión debida a la materia volátil, siendo el segundo pico la consecuencia de la combustión de la materia no volátil [6].

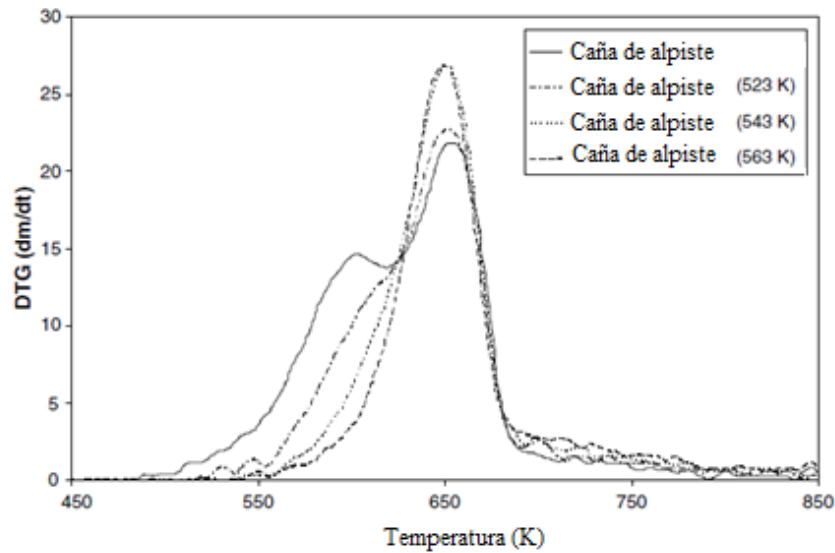


Figura 2.6 Tratamiento térmico de la caña de alpiste no tratada y torrefactada [7].

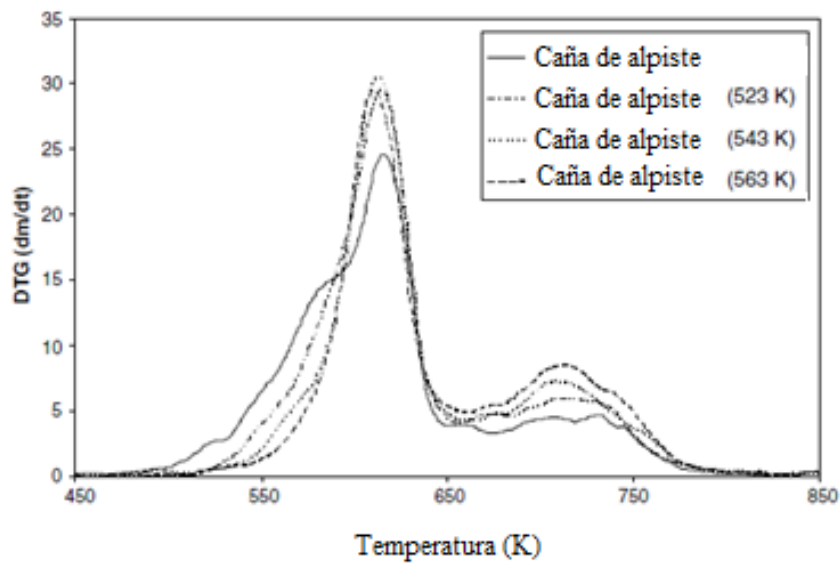


Figura 2.7 Oxidación de la caña de alpiste no tratada y torrefactada [7].

2.5 PROPIEDADES DE LA BIOMASA TORREFACTADA

2.5.1 Análisis elemental

El análisis elemental del producto obtenido mediante torrefacción revela aumentos en la cantidad de carbono mientras descende el contenido en hidrógeno y oxígeno, manteniéndose constante la cantidad de nitrógeno. Esto es debido a que las reacciones que se producen durante la torrefacción liberan más cantidad de oxígeno e hidrógeno, haciendo que se concentre la cantidad de carbono en el residuo sólido. Estos cambios se aprecian en la Tabla 2.4, en la que se muestra el tanto por ciento de cada elemento, junto a la humedad y el poder calorífico para diferentes temperaturas de torrefacción, dados estos resultados para la caña de alpiste, la paja de trigo y el sauce. El poder calorífico que contiene el combustible aumenta conforme mayor es la temperatura de torrefacción, a la vez que aumenta la concentración de carbono.

Tabla 2.4 Comparación del análisis elemental para diferentes biomasa y grados de torrefacción [6].

	Sin tratamiento	Temperatura de torrefacción (K)			
	-	503	523	543	563
RCG					
C (%)	48,6	49,3	50,3	52,2	54,3
H (%)	6,8	6,5	6,3	6,0	6,1
N (%)	0,3	0,1	0,0	0,1	0,1
O (%)	37,3		37,0	37,3	36,3
Humedad (%)	4,7	2,5	1,9	1,3	1,2
CV (kJ/kg)	19.500		20.000	20.800	21.800
Paja de trigo					
C (%)	47,3	48,7	49,6	51,9	56,4
H (%)	6,8	6,3	6,1	5,9	5,6
N (%)	0,8	0,7	0,9	0,8	1,0
O (%)	37,7		35,6	33,2	27,6
Humedad (%)	4,1	1,5	0,9	0,3	0,8
CV (kJ/kg)	18.900	19.400	19.800	20.700	22.600
Sauce					
C (%)	49,9	50,7	51,7	53,4	54,7
H (%)	6,5	6,2	6,1	6,1	6,0
N (%)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
O (%)	39,9	39,5	38,7	37,2	36,4
Humedad (%)	2,8	0,5	0,1	0,1	0,0
CV (kJ/kg)	20.000	20.200	20.600	21.400	21.900

En el diagrama de Van Krevelen, utilizado para caracterizar combustibles tales como biomasa o diferentes carbones, el eje de ordenadas corresponde al ratio H/C (cociente entre el contenido de hidrógeno y el contenido de carbono) y en el eje de abscisas al ratio O/C (relación entre el contenido de oxígeno y el contenido de carbono). En este gráfico conforme nos desplazamos hacia la izquierda y arriba aumenta la energía del combustible.

En la Figura 2.8 se muestran algunos puntos de referencia como la antracita o lignito, carbones frecuentemente usados y conocidos, que sirven para hacer una comparativa. Por otro lado, se han representado también diferentes biomásas sin tratar y tras el tratamiento de torrefacción. Cabe destacar el caso de la paja de trigo, que es la biomasa tratada que mayor desplazamiento muestra en el diagrama Van Krevelen, y como se puede comprobar en la Tabla 2.4, es el material que mayor aumento experimenta en el poder calorífico tras la torrefacción [7].

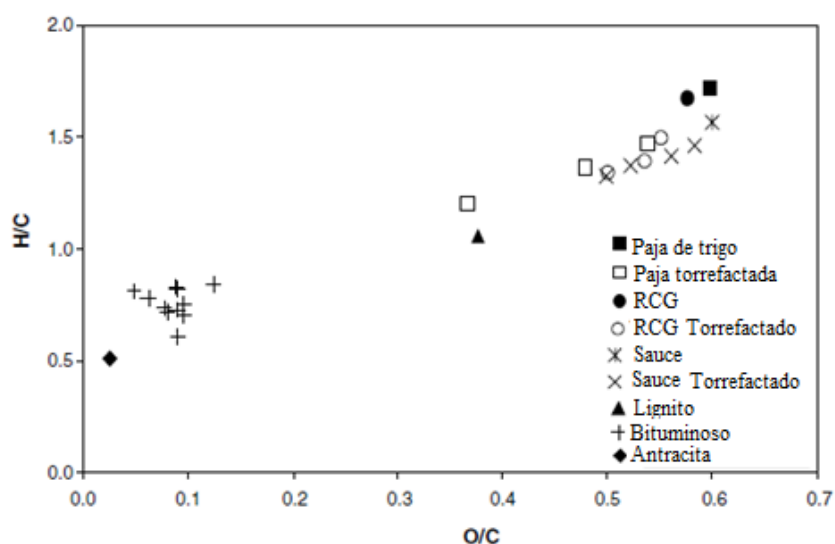


Figura 2.8 Krevelen para carbón, biomasa y biomasa torrefactada [7].

2.5.2 Propiedades mecánicas

La energía necesaria para la molienda depende del material y del tamaño de partícula que se desee, creciendo exponencialmente la energía consumida en la molienda conforme se reduce el tamaño de partícula.

Gracias a la descomposición térmica que se produce durante la torrefacción, las largas cadenas de hemicelulosa se ven fraccionadas obteniéndose un material más frágil, por ello el producto obtenido tendrá una menor resistencia a la molienda y se consumirá menos energía en la adecuación de su tamaño.

En la Figura 2.9 se pueden apreciar las tendencias anteriormente comentadas y fijándose particularmente en los puntos para sauce sin tratar (*willow*) con humedad de

entre 10 y 13 % y torrefactado durante 24 minutos a 290 °C (W 290 24), para el tamaño de partícula de 0,2 mm, se tiene una reducción energética del 90% pasando de necesitar unos 65 kWe/MWth a 5 kWe/MWth.

En la misma figura, pero en la parte de la derecha, se representa la capacidad de molienda frente al tamaño de partícula. Se aprecia cómo la capacidad de molienda aumenta con tamaños de partícula mayores teniendo mayor pendiente en la biomasa torrefactada. Esto significa que, disponiendo de la misma maquinaria se puede aumentar la producción si se alimenta biomasa torrefactada. Se puede resaltar que el mayor aumento en las capacidades de molienda se da para la biomasa torrefactada a mayor temperatura [9].

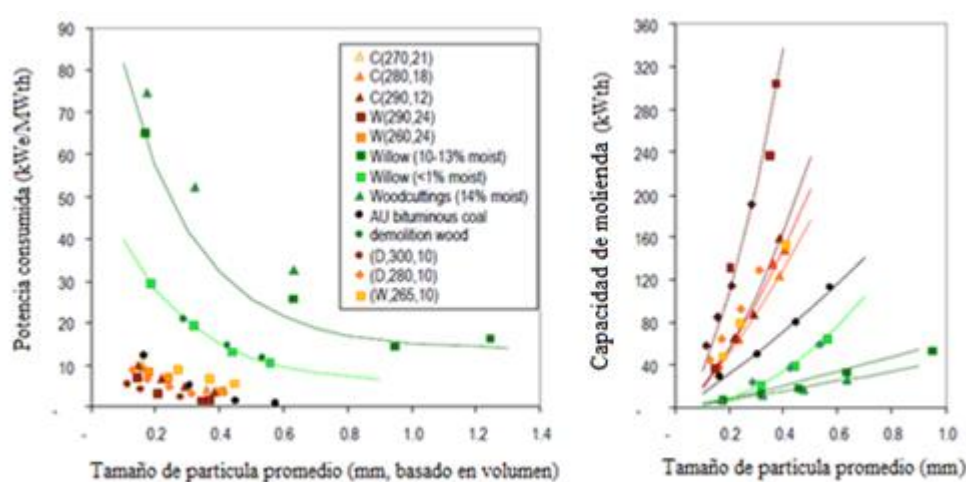


Figura 2.9 Potencia consumida y capacidad de molienda frente a tamaño de partícula. En la leyenda se indica: tipo de biomasa, temperatura y tiempo de torrefacción [9].

2.5.3 Propiedades generales

Dado que el principal objetivo de la torrefacción es mejorar las propiedades de la biomasa como combustible, es importante resaltar las mejoras que se pueden conseguir con este proceso. En la Tabla 2.5 se muestran algunas propiedades importantes, para biomasa sin tratar, pelets⁵ de madera y pelets de biomasa torrefactada (TOP)⁶.

Se aprecia un cambio en el contenido de humedad, reduciéndose un 71% para los pelets y un 95% para los pelets torrefactados. Como consecuencia de ello el valor más alto del poder calorífico es el de los pelets torrefactados, debido a que el contenido en humedad no aporta valor energético al producto. El valor del contenido energético de

⁵ Pelets: Producto basado en biomasa seca compacta que se obtiene en la peletización.

⁶ TOP: Tecnología que combina torrefacción y peletización [2].

los TOP es el doble que el de la biomasa sin tratar, mientras que para el peletizado convencional el aumento se queda en un 52% respecto a la biomasa sin tratar.

Tabla 2.5. Propiedades del combustible [5].

	Astillas de madera	Pelets de madera	TOP Pelets
Contenido en humedad (%)	35	10	3
Poder calorífico (MJ/kg)	10,5	16	21
Densidad	550	600	800
Densidad energética (GJ/m³)	5,8	9	16,7
Naturaleza higroscópica	Húmedo	Húmedo	Hidrófobo
Comportamiento en almacenaje	Se enmohece Pérdida de materia seca	Se enmohece Se deteriora	Estable

La densidad se incrementa tras los procesos de peletizado convencional y peletizado con previa torrefacción, en un 9% y un 45% respectivamente. Esta mejora, toma importancia cuando el producto tiene que ser transportado, es ahí en la logística del proceso dónde reside parte de la oportunidad de rentabilizar la inversión que necesita hacerse en el proceso de torrefacción. En cuanto a la densidad energética aún son más notables los incrementos que se producen, obteniéndose un aumento del 188% para los TOP pelets.

Por otro lado, mientras que las astillas y las briquetas de madera absorben humedad del ambiente y se pueden deteriorar, las briquetas torrefactadas son higroscópicas y estables. Por ello se ahorra en pérdidas durante el almacenamiento y transporte. De acuerdo con lo anterior es evidente que el proceso de torrefacción mejora las propiedades físicas de la biomasa para su uso como combustible [5].

2.6 CONCLUSIONES

En este capítulo se ha presentado la biomasa y su descomposición térmica. Se ha prestando especial atención en como varían los productos obtenidos en función de la temperatura o el tiempo de residencia, lo que puede servir para fijar condiciones en función del producto que deseamos obtener. También se ha resaltado la importancia del tamaño de partícula en el control cinético de la torrefacción. Por último, se han comentado los productos obtenidos tras la torrefacción y las propiedades de residuo sólido que se obtienen con este proceso.

Se quiere resaltar en este punto las mejoras que se consiguen en sus propiedades como combustible, ya que es el objetivo del proceso.

Se detiene la descomposición del material, gracias a su nuevo carácter higroscópico tras la torrefacción, eliminando también la formación de olores.

Se reduce la longitud de los polímeros iniciales que forman la biomasa y el resultado es un compuesto más frágil con lo que se reduce la energía necesaria para la molienda del combustible, mejorando la rentabilidad del producto.

Aumenta su densidad energética, proporcionando una reducción de costes en almacenamiento y transporte. Como se ha visto en el capítulo, se liberan compuestos volátiles de baja energía.

Aunque este proceso necesita de una serie de reacciones endotérmicas necesitando un aporte de energía, además de la inversión de la instalación, estos costes pueden ser compensados con las ventajas proporcionadas. Se obtienen beneficios en el momento de transportar la biomasa o al aumentar las posibilidades de esta materia prima que puede servir de alimentación para centrales térmicas o en algunos casos en la industria del Aluminio como reductor.

3 TECNOLOGÍA

A continuación se presentan los equipos principales de una planta de torrefacción prestando especial atención al reactor y a los tipos de configuraciones posibles más clásicas. Se muestran también varios modelos específicos y se realiza una comparativa con el fin de elegir la tecnología más adecuada.

Tras la elección de un tipo de reactor se presentan posibles mejoras para ese modelo, lo cual se tendrá en cuenta para el diseño del reactor.

3.1 PLANTA DE TORREFACCIÓN

Una planta de procesamiento de biomasa consta de una serie de equipos en donde se realizan las operaciones necesarias para obtener el producto buscado. En la Figura 3.1 se muestra el esquema de una planta de torrefacción, apreciando las distintas unidades de procesamiento representadas por cajas y las conexiones existentes entre ellas. A continuación se comentan las funciones de estos equipos:

- Secadero: Existen diferentes alternativas para establecer el contacto entre las fases, como los secaderos de túnel, rotativos o de bandejas entre otros. Lo que se busca es obtener una biomasa con un menor contenido en humedad.
- Horno: Es la unidad en la que entra un combustible, opcionalmente también los vapores de la torrefacción y un comburente, por ejemplo aire del ambiente, produciéndose la combustión y el consecuente aporte energético.
- Torrefactor: Es el reactor donde se da la descomposición térmica de la biomasa, explicada ya en el capítulo anterior, produciéndose la biomasa torrefactada y un conjunto de gases y compuestos volátiles.
- Intercambiador de calor: Es la unidad encargada de suministrar el flujo de energía necesaria en el secadero y en el torrefactor a partir del producido en el horno.
- Molino: Equipo encargado de adecuar el tamaño de partícula deseado.
- Unidad de recuperación de la caída de presión (en la Figura 3.1, denotado por DP): Si se quiere reutilizar el flujo de salida del torrefactor conduciéndolo al intercambiador de calor es necesario insertar una unidad de recuperación de la caída de presión, evitándose la aparición de un bypass.

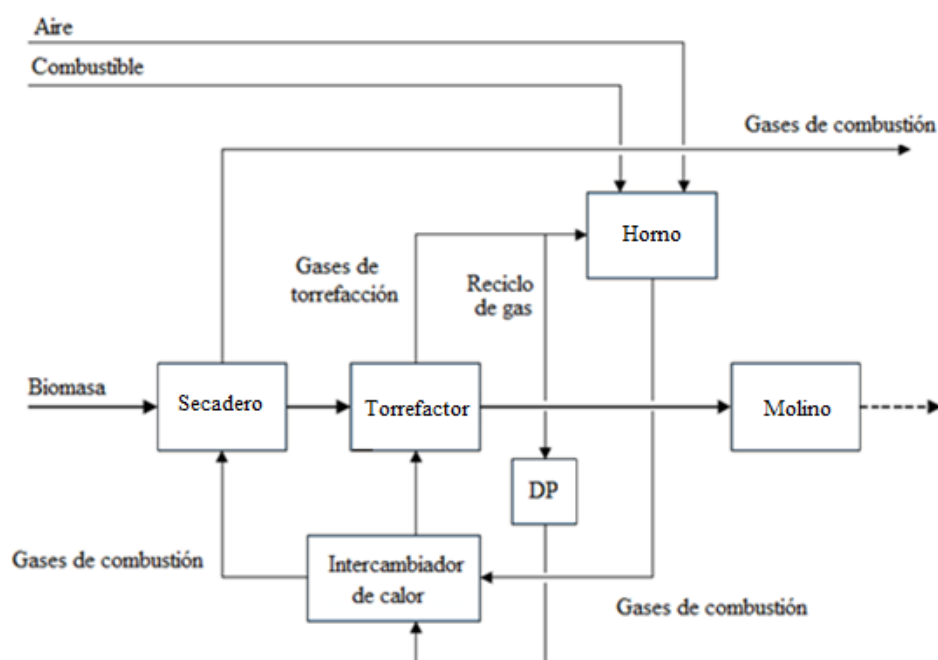


Figura 3.1 Esquema de planta de torrefacción industrial [5].

Al sistema, aparte de la biomasa para su tratamiento, entra el combustible y comburente, necesario para alimentar el horno en donde se obtiene la energía térmica suficiente para el secado y la torrefacción. También entra el comburente, con el que quemar el combustible.

Como flujos de salida se tienen: la biomasa torrefactada y unos gases de combustión, subproducto que se obtiene por la generación de la energía térmica necesaria. En esta distribución se considera que los volátiles que se emiten en el torrefactor se queman en el horno.

La planta representada en la Figura 3.1 es una distribución *off-set*, es decir, que trabaja de forma autónoma. El proceso de torrefacción puede estar integrado en otro más general (*on-set*), en donde, por ejemplo, se aprovechara un calor residual y no hiciera falta un horno propio para la torrefacción [2].

Puede existir un punto en el que el proceso de torrefacción se sustente con la combustión de los compuestos volátiles producidos en la torrefacción, teniendo en cuenta no sólo la energía necesaria para la torrefacción de la biomasa, sino también, el secado y las pérdidas de calor, se trata del punto auto-térmico, en el cual no sería necesario aporte de combustible.

El estado auto-térmico determina dos escenarios posibles para el proceso de torrefacción, uno cuando se trabaja por debajo del punto auto-térmico y los compuestos volátiles de la torrefacción no tienen la energía suficiente para mantener el proceso por lo que se necesita un combustible adicional, y otro cuando se trabaja por encima del punto auto-térmico, en este caso los volátiles contienen más energía que la necesaria en el proceso de torrefacción y si no se aprovecha se puede desperdiciar esta energía.

A partir de aquí el capítulo se centra en las diferentes tecnologías que se utilizan para la construcción del reactor ya que el resto de equipos son ampliamente conocidos y el reactor es una parte trascendental de la planta el cual modulará variables importantes como capacidad de producción, costes, etc.

3.2 REACTOR

La torrefacción se puede considerar una reacción heterogénea sólido-gas no catalizada y endotérmica. En el reactor entrará la biomasa a tratar, así como el gas libre de agentes oxidantes y la energía térmica, obteniéndose la biomasa torrefactada y los compuestos volátiles.

La elección de un tipo de reactor u otro puede depender entre otras variables del tipo de reacción, conocimiento de la tecnología, cantidad de masa a tratar, contacto entre reactantes, estabilidad y flexibilidad de la operación, coste de los equipos, seguridad y vida media del equipo.

Dada la gran variedad de sistemas posibles y los muchos factores a considerar no es de esperar una única instalación óptima. Para diseñar una instalación resulta conveniente conocer las características de las formas clásicas que suele adoptar el reactor. A continuación se muestran las diferentes clasificaciones según el modo de operación y el contacto entre fases.

Atendiendo al modo de operación se pueden considerar varios tipos:

- Reactores continuos: Tanto la alimentación de reactantes como la retirada de productos es continua. Este modo de operar disminuye los costes de operación, tiene un alto nivel de reproducibilidad y un amplio intervalo de capacidad de proceso. Sin embargo, estas ventajas también provocan alguna desventaja como puede ser la baja versatilidad debido a su alta especialización.
- Reactores discontinuos: Con este modo de operar se introducen los reactantes, se deja reaccionar y después se sacan los productos. Este tipo de reactores tiene una alta versatilidad, es sencillo su control, se obtiene una calidad uniforme y se pueden integrar varias etapas en él. Por otro lado, tiene elevados costes de operación y menor reproducibilidad.

- Reactores semi-continuos: Un reactante puede alimentarse de forma continua y otro reactante (o por ejemplo un catalizador) se alimenta y retira de forma intermitente. Es un modelo intermedio, mejorando los puntos más débiles pero no consiguiendo tener la calidad de los puntos más fuertes de cada modelo.

Puesto que la reacción que se da en la torrefacción implica dos fases, el sólido que se descompone y el gas que aporta la energía térmica necesaria, es importante hablar de la velocidad mínima de fluidización, que es la velocidad mínima que debe tener el gas para fluidizar un lecho de partículas. Esta es una variable que depende principalmente: de la densidad, tamaño de partícula y factor de forma del sólido, y también, de la densidad y viscosidad del gas. En función de la configuración de los flujos y la relación entre la velocidad del gas y la velocidad mínima de fluidización se tienen diferentes lechos. Desde el punto de vista del contacto entre fases los reactores se pueden clasificar en:

- Lecho fijo: La corriente de gas atraviesa un lecho inmóvil de partículas. La velocidad con la que fluye el gas es menor que la velocidad mínima de fluidización.
- Lecho fluidizado: Las partículas de sólido se mantienen soportadas por la corriente de gas, tiene carácter de mezcla perfecta, consiguiéndose una buena uniformidad térmica. La velocidad que tiene el gas tiene por lo menos el mismo valor que la velocidad de mínima fluidización del lecho, aunque para una buena fluidización la velocidad superficial del gas tiene que ser 1,5 o 2 veces la velocidad mínima de fluidización.
- Lecho móvil: El gas y el sólido se mezclan mediante corrientes paralelas, cruzadas o en contracorriente. Existe movimiento de las dos fases, pero no existen condiciones de mezcla perfecta como en el lecho fluidizado. La velocidad del gas es menor que la mínima velocidad de fluidización.
- Lecho arrastrado: También llamado transporte neumático, el sólido es transportado en el seno de la corriente de gas, la velocidad del gas es mayor a la mínima velocidad de fluidización del lecho.

3.3 MODELOS ESPECÍFICOS DE REACTOR

Seguidamente se describirán diferentes modelos específicos que tienen las configuraciones comentadas anteriormente y por tanto sus características. Algunos torrefactores que se proponen en este apartado son unidades de procesamiento comúnmente empleadas como secaderos, para gasificación o combustión. Se comentan las ventajas y desventajas de cada uno, así como la capacidad de producción, la calidad del contacto entre los dos reactantes, el tiempo de residencia, el tamaño de partícula que puede procesar, costes de inversión y de operación, posibles problemas en la operación y el conocimiento de la tecnología.

Aunque la única forma segura de diseñar el reactor se basa en las pruebas de una planta piloto, la comparación con el rendimiento conocido de operaciones similares puede servir como orientación para hacer una selección previa.

3.3.1 Tornillos sin fin

En el reactor de la Figura 3.2 el sólido entra por la parte superior izquierda y se va desplazando a lo largo de la unidad gracias al movimiento del tornillo sin fin, hasta que sale por la parte inferior derecha. El calor necesario para la torrefacción se suministra de forma directa, introduciendo y evacuando gas a la cámara o también de forma indirecta, a través de la camisa exterior o del eje central del tornillo.

Este tipo de reactor suele operar en continuo, tanto para el sólido como para el gas, pudiendo trabajar con altas capacidades de producción y partículas de gran tamaño. Necesita un tiempo de residencia alto debido a la poca turbulencia que se produce en su interior, lo cual no fomenta el buen contacto entre las fases. Se trata de una unidad de procesamiento cuya tecnología es muy conocida, comúnmente utilizada para secar sólidos [10].

Suelen ser equipos de grandes dimensiones, lo que implica una elevada inversión, pero se consigue descender los costes unitarios gracias a su alta capacidad de procesado. Las partes móviles suponen un mantenimiento más laborioso. En el Anexo 1 se puede encontrar un ejemplo de planta de torrefacción que emplea este reactor.

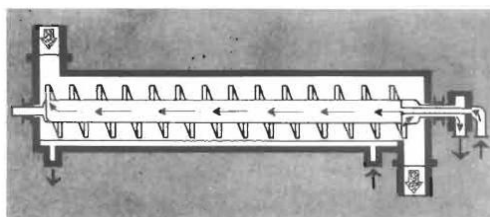


Figura 3.2 Tornillo sin fin.

3.3.2 Horno rotativo

El horno rotativo que se ve en la Figura 3.3, es otra opción para torrefactor biomasa. En este caso el calor se transfiere de forma directa, pudiéndose dar un contacto entre las fases en forma de corrientes paralelas o contracorriente. En su interior se incorporan unas palas que al rotar la cámara de reacción mejoran el contacto entre las fases, por lo que se consigue descender algo el tiempo de reacción. En este caso la transferencia de calor suele ser directa.

Es un modelo de características similares al anterior y también es una tecnología con larga trayectoria, utilizada por ejemplo en la incineración de residuos, aunque estos equipos pueden procesar una amplia gama de materiales con diferentes tamaños de partícula.

La inversión necesaria es alta, ya que son grandes equipos, como se aprecia en la imagen, pero también se reducen los costes de operación dada la gran capacidad de producción que tienen. Al igual que en el caso anterior las partes móviles necesitan un mayor mantenimiento [10].



Figura 3.3 Horno rotativo.

3.3.3 Lecho fluidizado

En la Figura 3.4 se muestra el esquema de un lecho fluidizado. Se observa que la entrada de gas se realiza por debajo, encontrándose con la placa del difusor, a través de la cual se inyecta el gas a la cámara de reacción. El gas debe contener la energía térmica suficiente para que se dé la torrefacción y la velocidad necesaria para fluidizar el lecho de partículas. Las partículas son alimentadas y extraídas directamente del lecho y en la salida de gases se incorpora un ciclón para retener los finos que pueden ser arrastrados por esta corriente y recircularlos.

Se trata también de una tecnología conocida aunque se sigue investigando para mejorar las condiciones de operación, especialmente para trabajar con grandes caudales de operación. Se utiliza para el secado de materiales, clasificación de sólidos en función de su tamaño de partícula (elutriación⁷), reacciones químicas, gasificación o pirólisis.

Los tiempos de residencia con este reactor se reducen considerablemente debido al buen contacto que se produce entre sus fases, pero el tamaño de partícula es crítico para la buena fluidización del lecho por lo que no puede tratar unos tamaños de partícula tan grandes como los casos anteriores. Al eliminar partes móviles se reduce la probabilidad de tener problemas derivados de los mismos. Los costes de inversión son menores, pero son equipos que suelen tener menores capacidades de producción por lo que puede tener unos costes de operación algo mayores [11].

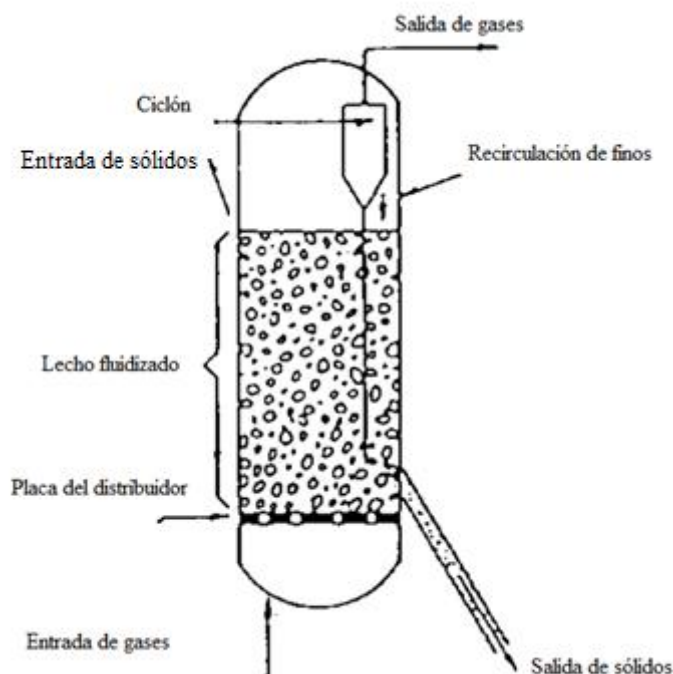


Figura 3.4 Lecho fluidizado.

⁷ Elutriación: Separación de partículas debido a las diferentes velocidades superficiales a las que son arrastradas por una corriente de fluido.

3.3.4 Torbed

El modelo Torbed fue inventado por Torftech, UK, en 1980. Se trata de un lecho fluidizado pero con una geometría especial. En la parte de abajo se encuentra el quemador, que aporta la energía térmica a la corriente de gas que asciende hasta el difusor anular, produciendo un lecho toroidal en la cámara de reacción. Se puede operar en continuo alimentando las partículas por la parte superior, a través del tubo central de alimentación. Tras la reacción, las partículas pierden densidad, produciéndose un mayor arrastre de las mismas y llegando a superar el anillo exterior, para caer en la cámara de recolección [12].

Gracias a su diseño se forma una cama de partículas que van reaccionando mientras giran gracias al flujo inducido por los álabes que se encuentran en la base. La cama se encuentra en un espacio reducido debido al aumento de sección que se produce en dirección vertical que produce una reducción de velocidad del flujo con lo que las partículas no se ven arrastradas.

Entre otras aplicaciones, se utiliza para reactivaciones de catalizador, pirólisis, pasteurización, calcinación, combustión y desorción. Las dimensiones de una unidad en particular pueden estar entre los cuatro metros de altura y los tres metros de diámetro, pudiendo operar 15 t/h.

Proporciona una buena mezcla y transferencia de calor, por lo que se reducen los tiempos de operación. Aunque el tamaño de partícula sigue siendo crítico, se permite un mayor rango debido al cambio de sección en la dirección vertical que tiene la cámara de reacción, lo cual permite acomodar la velocidad de mínima fluidización.

Tiene una baja pérdida de presión, gracias a que el lecho tiene menos altura. No tiene partes móviles y tiene relativamente baja inversión y bajos costes de mantenimiento. Su escalado es más sencillo que un lecho fluidizado convencional [15].

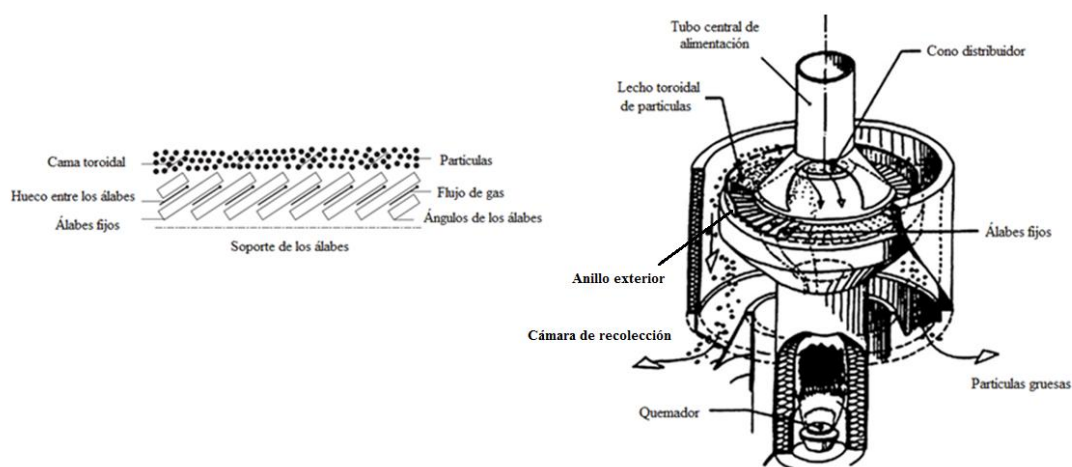


Figura 3.5 Torbed [12].

3.3.5 Lecho fijo y móvil.

En la Figura 3.7 se muestra el esquema de un reactor que podría operar de forma discontinua, como lecho fijo o de forma continua como lecho móvil, dependiendo de si el flujo del sólido es continuo o intermitente. Para ambos casos el gas se introduce por la parte inferior a través del distribuidor.

Se trabaja como lecho fijo cuando se necesita más tiempo para que transcurra la reacción, debido por ejemplo a que se opera con un tamaño de partícula más grande. La capacidad para el lecho fijo no es muy elevada dada su operación discontinua, pudiendo operar caudales mayores el lecho móvil. El contacto entre fases, aunque depende en gran medida del tamaño del lecho y del difusor, es mejor para el lecho móvil. Por esta razón desde el punto de vista industrial se preferirá trabajar con un lecho móvil, aunque desde el punto de vista de la investigación no hay que infravalorar el lecho fijo, el cual permite un mayor control de la temperatura y otras variables.

No necesitan una gran inversión y los costes de operación no son muy elevados. Siendo mayores los costes de operación para el lecho fijo. Este tipo de tecnología se emplea para el secado de sólidos o descontaminación de gases por medio de la adsorción, entre otras aplicaciones. Aunque la tecnología es conocida, este tipo de reactor es muy versátil dando oportunidad a diseñar diferentes configuraciones [13].

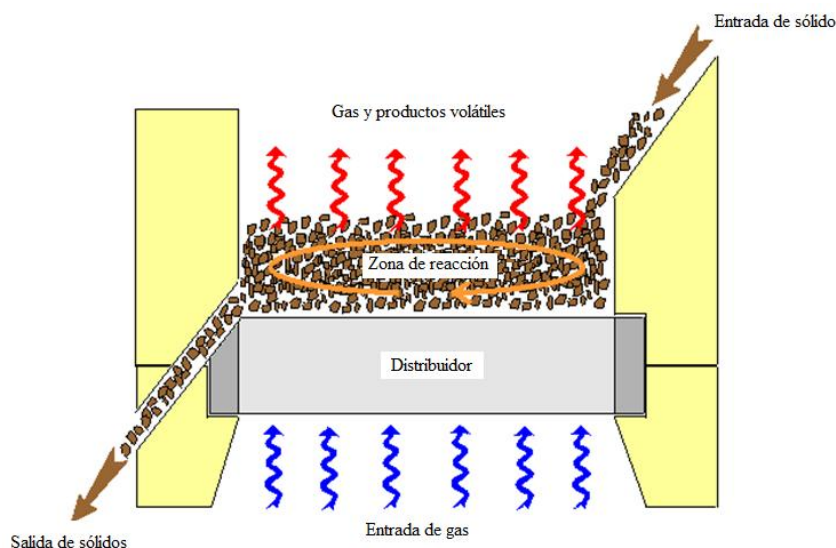


Figura 3.6 Lecho móvil [14].

3.3.6 Turbo secador de Wyssmont.

Una invención basada en el transporte mecánico de un lecho fijo es este turbo-secadero Wyssmont, que se puede apreciar en la Figura 3.8. Se compone de una pila de bandejas circulares, las cuales son capaces de girar. El material se alimenta por la parte superior, y tras una vuelta va cayendo a la bandeja inferior hasta su salida por la parte inferior del turbo-secadero. A través de un ventilador se inyecta la corriente de gas a la cámara que puede tener varias entradas laterales como muestra la figura y sale por la parte superior. Esta distribución establece un buen contacto entre las fases reduciendo el tiempo de residencia.

Proporciona un buen control de las condiciones de operación tanto del tiempo de residencia, gracias a las cintas transportadoras, como del flujo de calor, en donde se permite tener una temperatura uniforme y por zonas.

Resulta adecuado para sólidos granulares que no formen polvo o si no hay espacio disponible pero sí altura. Puede ser precisamente escalado y fácilmente ajustable a las condiciones de operación. Al tener partes móviles se requiere mayor mantenimiento. Si se desea tener una alta capacidad para reducir los costes de operación la inversión será alta, ya que es una tecnología patentada y laboriosa de fabricar [1].

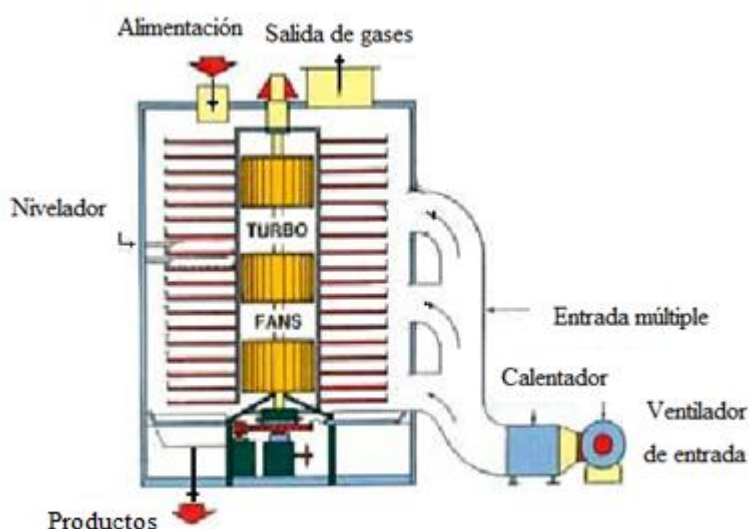


Figura 3.7 Turbo-secador Wyssmont [1].

3.4 COMPARATIVA

Para seleccionar una de entre las tecnologías presentadas para realizar un estudio más detallado y realizar un diseño para una posible planta de laboratorio se ha realizado la Tabla 3.1 En ella se disponen las características que se consideran más importantes comentadas en el apartado anterior, clasificándolas de 0 a 1 para cada reactor, siendo 1 lo más conveniente (mayor capacidad, mejor contacto entre fases, menor tiempo de reacción, posibilidad de tratar tamaños de partícula mayores, menores costes de inversión, menores costes de operación, menores riesgos o posibles fallos y mayor oportunidad de mejorar la tecnología).

Se ha ponderado estas características primando el contacto entre fases, riesgos y oportunidad de innovación dada su importancia.

Tabla 3.1 Comparativa entre las diferentes tecnologías.

	Peso relativo	Tornillo sin fin	Horno rotativo	Lecho fluidizado	Torbed	Lecho fijo y móvil	Wyssmont
Capacidad	1	1	1	0,5	0,6	0,6	0,6
Contacto entre fases	2	0,4	0,5	1	1	0,6	0,8
Tiempo de reacción	1	0,6	0,7	1	1	0,7	0,7
Tamaño de partícula	1	1	1	0,5	0,5	0,6	0,5
Costes de inversión	1	0,6	0,6	1	1	1	0,8
Costes de operación	1	1	1	0,8	0,8	0,9	0,8
Riesgos	2	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	0,8
Oportunidad de innovación	2	0,2	0,2	1	1	0,5	0
SUMA	11	6,8	7,1	9,6	9,7	7,8	6,6
RESULTADO	1	0,62	0,65	0,87	0,88	0,71	0,6

Una vez calificadas las características, se suma para cada tecnología y se divide para 11, que es la máxima puntuación, obteniendo un valor entre cero y uno. El resultado más cercano a la unidad es la mejor elección.

El resultado de esta tabla de decisión indica que la mejor elección es un reactor tipo Torbed o lecho fluidizado por lo que a continuación se comentarán algunos detalles relacionados con esta tecnología.

3.5 CONSIDERACIONES DE LA TECNOLOGÍA SELECCIONADA

El lecho fluidizado gas-sólido tiene una alta transferencia de masa y calor, lo que hace de esta alternativa una buena solución para diferentes procesos industriales. Aunque su principal inconveniente son los problemas que aparecen a la hora de escalar el proceso, como la elutriación de finos, el elevado burbujeo o la formación de canales preferenciales. Por ello se está prestando especial atención en la intensificación de los procesos de fluidización, proporcionando tanto mejoras en el diseño, incluyendo la configuración de la cama y fuerzas externas, como en los factores de operación, por ejemplo propiedades del sólido y del gas [11].

Aunque no existen unas correlaciones directas se sabe que el nivel de homogeneidad del lecho depende de las fuerzas partícula-partícula (IPF) y las fuerzas gas-partícula (HDF) como se puede ver en la siguiente figura.

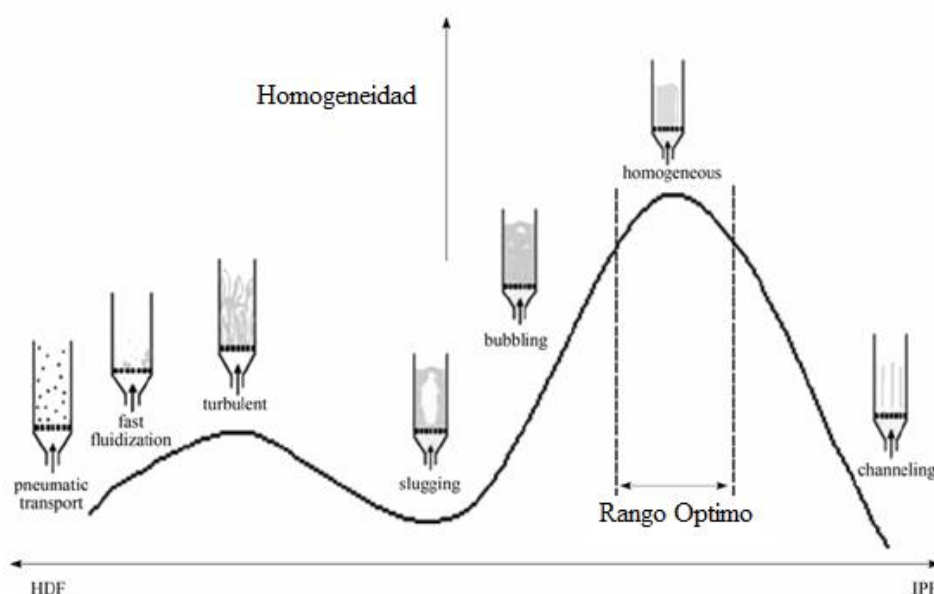


Figura 3.8 Homogeneidad frente a las fuerzas HDF e IPF [11].

Los cambios que se introducen en la operación para controlar las condiciones del lecho varían las fuerzas IPF y HDF desplazando las condiciones hacia la derecha o izquierda en el gráfico. Normalmente se suele actuar sobre la temperatura, la presión, el nivel de finos o el agente fluidizante.

3.5.1 Factores de operación

Si nos fijamos en la clasificación de Geldart, en el cual se dividen las partículas en cuatro grupos según la relación entre la densidad aparente y el tamaño de partícula, las partículas tipo B son las que mejor fluidizan y si nos alejamos de esta sección empeora la fluidización. A veces las características del sólido no se pueden modificar todo lo que se necesitaría para una buena fluidización. En la búsqueda del rango óptimo se pueden utilizar varias alternativas que varían las fuerzas IPF y HDF como [10]:

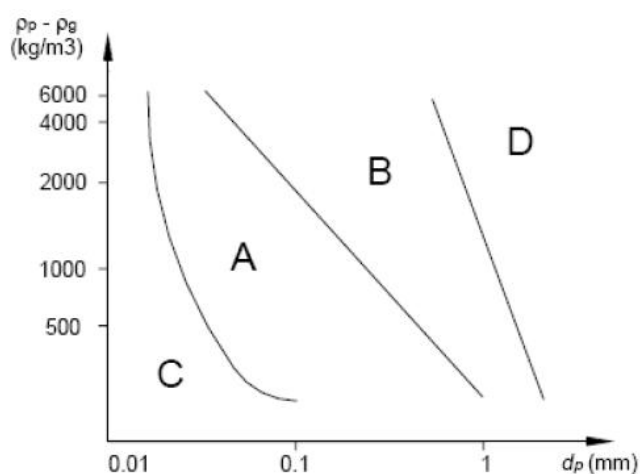


Figura 3.9 Clasificación de Geldart [10]

- Adición de agentes que mejoran la fluidización y la homogeneidad del lecho, aumentando las fuerzas entre las partículas (IPF), reduciendo la elutriación y disminuyendo el burbujeo.
- Uso de gases con alta densidad o viscosidad como el argón y el neón que aumentan la zona de trabajo sin burbujeo, incrementando las fuerzas HDF. Si se desea el efecto contrario aumentando las fuerzas IPF se puede reducir la densidad o viscosidad del gas o elegir gases que se adsorban fácilmente en el sólido, con lo que se aumenta las fuerzas IPF.
- Trabajar a presión, lo cual influye de dos maneras: se aumentan las fuerzas IPF debido a que se favorece la adsorción y se aumenta la densidad del gas, por lo que se incrementan las fuerzas HDF.
- Elevar la temperatura disminuye las fuerzas IPF porque disminuye la adsorción del gas, pero también influye en la densidad y viscosidad del gas, lo cual hace su control más complicado.

3.5.2 Factores de diseño

También se pueden modificar las condiciones del lecho mediante el diseño de la cama, el sistema de distribución del gas o por los métodos intrusivos.

- La forma de cama más habitual es la cilíndrica por ser compacta pero son posibles otras configuraciones, una que llama especialmente la atención por su utilidad para el proceso que se está estudiando es la configuración cónica, que debido al cambio de sección, varía la velocidad a lo largo de su eje axial con lo que permite acomodar la velocidad mínima de fluidización para un lecho de partículas de tamaño heterogéneo. Además se reduce la elutriación de finos debido a que en la parte superior al tener mayor sección se hace descender la velocidad del flujo de manera significativa.
- El diseño del sistema de distribución es crítico, normalmente consta de unos pequeños poros uniformemente distribuidos de forma que se asegure la homogeneidad del lecho, aunque el efecto del distribuidor se va perdiendo conforme nos alejamos del mismo, sobre todo a altas velocidades. Con respecto a la intensificación de los procesos actuando en el diseño, se puede probar entre otras posibles alternativas la inyección de gas inclinada en donde el distribuidor está constituido por boquillas horizontales e inclinadas que perfeccionan la mezcla radial del lecho.

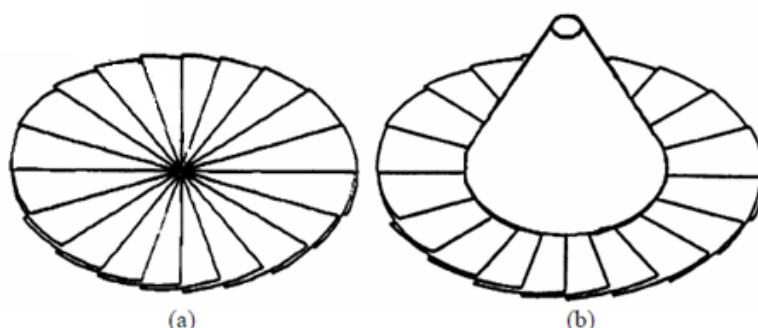


Figura 3.10 Distribuidor en espiral y distribución de los álbes del Torbed [13]

La mejora en la forma Torbed, como se ve en la Figura 3.12, proporciona las ventajas de la configuración cónica y elimina la zona muerta que se forma con la configuración (a). Entre las mayores desventajas del diseño Torbed se encuentra la no distribución uniforme de partículas, que se concentran junto a la pared exterior. Dos parámetros importantes son: la inclinación de los álbes que varía la intensidad de agitación generada y la ratio entre anchura anular y radio de la cama que influye en la fuerza centrífuga a lo largo del radio.

- Flujo pulsante: Se permite y restringe intermitentemente el paso del gas por las diferentes boquillas. Mediante este método se reduce el tamaño de las burbujas que se forman. Cuando la frecuencia de encendido y apagado de la boquilla es mayor que la de la formación de burbujas, se puede llegar a disminuir en gran medida la formación de burbujas. Con este método, se disminuye la creación de canales preferenciales, burbujeo y elutriación cuando las partículas son pequeñas, y se mejora la transferencia de materia y el control de la conversión. Actualmente a nivel industrial se debe mejorar la atenuación del efecto, el cual solo es apreciable a bajos valores de H/D .
- Otra forma de mejorar la fluidización es por medio de la aplicación de fuerzas externas, como el campo centrífugo, vibración acústica y mecánica o la aplicación de campos electromagnéticos. En el Anexo 3 se puede apreciar como se mejora la fluidización de un lecho de partículas mediante la aplicación de una vibración acústica [11].

3.6 CONCLUSIONES

En este capítulo se han revisado los equipos necesarios para llevar a cabo la torrefacción, en especial la tecnología aplicable al reactor y algunos ejemplos específicos, de los que se ha seleccionado el tipo de reactor a diseñar.

El reactor de lecho fluidizado ha sido seleccionado gracias especialmente al buen contacto entre fases que permite tener un bajo tiempo de operación, la baja inversión que necesita en comparación con las demás configuraciones y la capacidad de mejorar la tecnología.

Se han presentado las variables de la que depende la fluidización, así como los factores sobre los que se puede actuar para conseguir una buena fluidización. Pudiendo actuar sobre: la adición de agentes, la importancia de la densidad y viscosidad del gas u otras condiciones como la temperatura y presión, en cuanto a los factores de operación. También son importantes los factores de diseño, como: la configuración de la cámara de reacción, de la placa difusora, el flujo pulsante o aplicación de campos de fuerza externos. Todo esto determinará el diseño del torrefactor.

4 DISEÑO

Este capítulo presenta el torrefactor diseñado, detallando las partes de las que se compone, así como el motivo de sus dimensiones y su forma. Se dimensionará para poder torrefactor un kilogramo de biomasa, de tal manera que se potencie su versatilidad, pudiendo procesar materia prima heterogénea en cuanto a sus características de forma, densidad o humedad, parámetros importantes que afectan a su fluidización.

También se especifica la disposición de la posible planta que acompaña al torrefactor y complementa el proceso, proporcionando tanto la energía calorífica para torrefactor como la energía cinética al gas, necesaria para fluidizar el lecho. La planta diseñada permite medir variables como la temperatura de operación o el caudal de gases de alimentación, y actuar sobre ellas por medio del calentador, del compresor y de las válvulas.

4.1 REACTOR

El diseño se basa en la tecnología Torbed, pero modificando la sección del cuerpo a través de la pared exterior. En la sección 4.1.1 se realizará una descripción general del reactor, en la sección 4.1.2 se presentan las piezas que constituyen el reactor y en la sección 4.1.3 se explican los factores que han dado forma al torrefactor

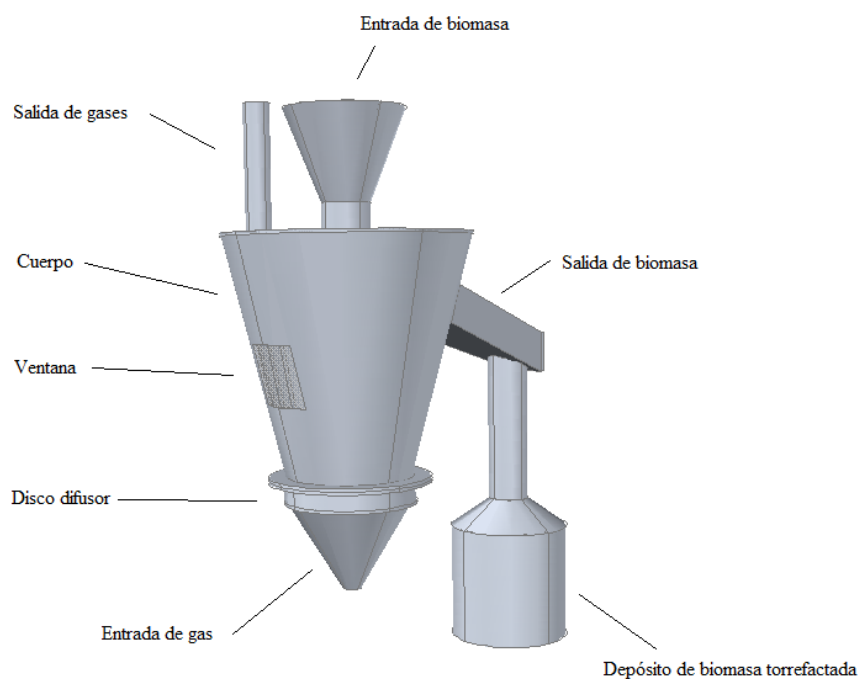


Figura 4.1 Vista del torrefactor.

4.1.1 Descripción general

Por la parte inferior se introduce el gas a la temperatura de torrefacción, 280 °C aproximadamente, con el caudal necesario para establecer un lecho fluidizado al interior del cuerpo o cámara de reacción. Por la parte superior del cuerpo se alimenta la biomasa, a través de un tubo que desemboca en el difusor.

Ubicado en la parte superior de la entrada de gas, se encuentra el disco difusor, que induce un flujo al gas, el cual mientras continúa ascendiendo por la cámara de reacción gira alrededor del tubo de alimentación de biomasa. En este flujo se sustentan las partículas de biomasa mientras se torrefactan.

El aumento de sección que se produce en el cuerpo conforme aumenta la altura provoca una reducción de la velocidad superficial del flujo en el interior de la cámara de reacción, por tanto, las partículas del lecho se van acomodando, quedándose en la parte superior del lecho las que mejor fluidizan y en la parte inferior las que peor fluidizan, las cuales necesitan una mayor velocidad superficial para fluidizar, bien sea porque su relación L/D es mayor o porque tengan mayor densidad, por ejemplo porque están más húmedas. Este efecto que proporciona la forma de la cámara de reacción es parte esencial del diseño, ya que se ha elegido este tipo de tecnología para estudiar las ventajas que proporciona. Se pretende mejorar el control de la velocidad mínima de fluidización y problemas como la elutriación, tal y como se ha comentado en el apartado 3.5.2.

La salida del producto sólido se realiza por un lateral del cuerpo. Debido a la pérdida de densidad que se produce en el proceso de torrefacción, las partículas de biomasa torrefactada se ven más fácilmente arrastradas por la corriente de gas.

Los gases salen del torrefactor desde la tapa superior, dirigiéndose a un ciclón que elimina posibles finos y después a un intercambiador de calor que permitirá la recuperación de los compuestos volátiles generados en la torrefacción para su estudio.

A continuación se presentan las partes que conforman el torrefactor, sus funciones junto a sus dimensiones más características, pudiéndose ver con más detalle las cotas de cada pieza del torrefactor en el Anexo 6.

4.1.2 Dimensionamiento

- Entrada de gas:

Es la tapa inferior del torrefactor y sirve para guiar el flujo desde la tubería hasta el difusor, de tal manera que no se produzcan irregularidades bruscas en el flujo. En la parte inferior se encuentra la conexión con la tubería, después hay una pieza cónica por medio de la cual se aumenta la sección y en la parte superior se encuentra la parte donde irá conectado el disco difusor. Se puede observar también un disco que rodea a la pieza por la parte superior, este disco tiene la función de conectar esta pieza con el cuerpo, de tal forma que se posibilite su conexión y desconexión. Esto es especialmente útil para permitir el cambio del disco difusor, el cual es responsable de la trayectoria del flujo de gas en el interior de la cámara de reacción. El diámetro superior es de 200 mm, por la parte interior. La altura total es de 185 mm.



Figura 4.2 Entrada de gas.

- Disco difusor:

En la parte central del disco se encuentra un cilindro con terminaciones en cono tanto por la parte inferior, para guiar el gas, como por la parte superior, que conduce a la biomasa al lecho de partículas. Esta pieza debe incluir una malla que evite la caída de partículas hacia la entrada de gas. Gracias a la disposición fija e inclinada de los álabes se obtiene el flujo deseado en la cámara de reacción. El disco tiene un diámetro exterior de 200 mm, un diámetro interior de 80 mm y una altura de 30 mm. El cilindro que se encuentra en la parte central se ha diseñado con una altura total de 145 mm.

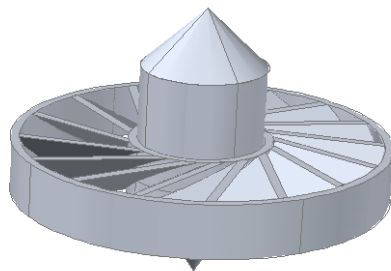


Figura 4.3 Disco difusor.

- **Cuerpo:**

En la parte inferior se encuentra el disco que proporciona la conexión con la entrada de gas, el cuerpo se forma por una pieza troncocónica de una altura de 400 mm y un diámetro superior de 400 mm. Se observa el hueco por donde se conecta la salida de productos y una ventana o mirilla dispuesta para observar la forma del lecho fluidizado. En la tapa superior se encuentran dos círculos, que corresponden a la entrada de alimentación, con un diámetro de 80 mm y a la salida de gases, del tamaño de la tubería.

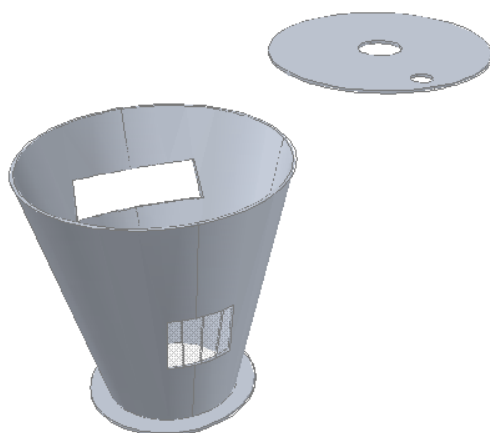


Figura 4.4 Cuerpo.

- **Entrada de biomasa:**

Consta de una tolva de 150 mm de altura y 190 mm de diámetro, y un tubo que conecta con el difusor con una longitud de 470 mm. En el interior del tubo se encuentra un tornillo sin fin encargado de introducir la biomasa al cuerpo. En la parte inferior se puede apreciar unos huecos mediante los cuales se permite la entrada de partículas a la cámara, aunque también podría fabricarse, sin estos huecos y haciendo que el tubo quedase unos centímetros por encima del difusor.

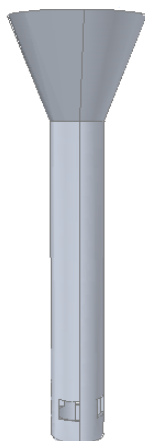


Figura 4.5 Entrada de biomasa.

- Salida de biomasa torrefactada:

Conectado al cuerpo se encuentra la salida de productos sólidos con una sección de salida de 200 mm x 60 mm, encargándose de almacenar los productos obtenidos en un depósito.

Es recomendable dotar a esta pieza con una abertura que se pueda abrir o cerrar, de tal manera que facilite la salida de las partículas una vez torrefactadas, dada la diferencia de presión entre el interior del torrefactor y el ambiente, posiblemente combinada esta acción con una válvula estranguladora en la salida de gases. Esta escotilla puede ir ubicada en el propio depósito y debe incorporar un filtro para evitar que salgan las partículas de biomasa.

Sería recomendable que la salida desde el cuerpo pudiera regularse en altura, de esta forma se podría trabajar de forma continua, regulando a la altura para que salgan las partículas cuando la torrefacción y el consecuente cambio de densidad se ha llevado a cabo.



Figura 4.6 Salida de productos.

4.1.3 Factores de diseño

En el lecho fluidizado, las fuerzas que actúan sobre las partículas se encuentran en equilibrio. Estas fuerzas son: el peso y la fuerza de arrastre. Considerando que en el proceso de torrefacción se pierde densidad, el peso descende y si no se varía la velocidad con la que se está fluidizando la mezcla, se alterará el equilibrio ya que la fuerza de arrastre será mayor que el peso.

Si se dispone de un área perpendicular al flujo creciente, como se puede observar en la Figura 4.7, la propia forma del cuerpo regula este desequilibrio que se produce entre las fuerzas al torrefactor. Cuando la partícula pierde densidad se ve más arrastrada por el flujo por lo que aumenta su altura. Conforme asciende la partícula el área perpendicular al flujo aumenta, produciendo un descenso en la velocidad superficial, lo que hace descender la fuerza de arrastre, consiguiendo estabilizar la fluidización. Es por esto que la forma de la cámara de reacción ha sido la parte que mayor consideración ha tenido en el diseño.



Figura 4.7 Forma del cuerpo.

De la misma forma que esta configuración regula la fluidización de partículas cuando cambia la densidad puede actuar con otros factores, como el tamaño de partícula o el factor de forma. Permitiendo tratar lechos de partículas muy heterogéneos en cuanto al diámetro de partícula, la relación entre longitud y diámetro (relacionada con el factor de forma) o la propia densidad de partícula, entre otros.

A continuación se va a estudiar en cuanto varía la velocidad mínima de fluidización en función de las algunas características de las partículas y como se comporta el torrefactor. En la Tabla 4.1 se aprecia que para el tallo de algodón, con una densidad de partícula de 365 kg/m^3 pasa de una velocidad mínima de fluidización de $0,5 \text{ m/s}$ para un diámetro de $3,4 \text{ mm}$ y una relación entre la longitud y el diámetro (L/D) de 3, a una velocidad mínima de fluidización de $1,3 \text{ m/s}$ para un diámetro de partícula de $6,5 \text{ mm}$ y una relación L/D de 12.

Tabla 4.1 Fluidización del tallo de algodón [15].

Diámetro (mm)	3,4		5		6,5	
L/D	3	12	3	12	3	12
Vmf (m/s)	0,5	0,7	0,6	1,45	0,7	1,3

Con estos datos se obtiene que solo variando la relación L/D se obtiene un incremento relativo de la velocidad mínima de fluidización de:

Ecuación 3

$$\% \Delta v_{mf} = 100 \times \frac{(1,3 - 0,5)}{0,5} = 160\%$$

Si se tiene 1 kg de biomasa con una densidad de 365 kg/m³, el volumen que ocupa el sólido es de 0,0027 m³, que con una porosidad mínima de fluidización de 0,4 (obtenido de la Tabla A2.1) se tiene un volumen total de:

Ecuación 4

$$V_{LECHO} = \frac{1}{1 - \epsilon} \times V_{SÓLIDO} = \frac{1}{0,6} \times 0,0027 = 0,0045 \text{ m}^3$$

Para calcular la altura del lecho en el torrefactor dimensionado hay que tener en cuenta el volumen de la cámara y el del alimentador de biomasa:

Ecuación 5

$$V_{Cámara} = \pi * (R^2 + r^2 + R \times r) \times \frac{h}{3}$$

Ecuación 6

$$V_{Alimentador} = \pi * (R'^2) \times h$$

Ecuación 7

$$V_{LECHO} = V_{Cámara} - V_{Alimentador}$$

Conociendo que R = 0,2m, r = 0,1 m y R' = 0,04 m. Se obtiene que el volumen ocupado por el lecho fluidizado de 0,0045 m³ en la cámara de reacción corresponde con una altura de 0,11 m. También se puede deducir que el área inferior del cuerpo de 0,264 m² y el área superior de 0,1206 m². Con lo cual se obtiene una relación entre el área perpendicular al eje vertical en función de la altura de:

Ecuación 8

$$A = 0,2365 \times h + 0,0264$$

Con la que obtener la Tabla 4.2. La altura 0 m corresponde con la altura a la salida del difusor, 0,06 m corresponde con la altura en la que se tiene la mitad del volumen del lecho, 0,11 m es la altura de la superficie del lecho y 0,27 m es la cota baja de la salida de productos.

Tabla 4.2 Relación de las áreas a diferentes cotas de la cámara de reacción, %ΔA: Incremento de área relativo.

Altura de la cámara (m)	Área (m ²)	%ΔA (respecto a salida)
0	0,0264	214
0,06	0,0365	127
0,11	0,0460	80
0,27	0,0831	0

Con estos cálculos se puede apreciar que el torrefactor diseñado tiene la capacidad de compensar cambios en la velocidad de mínima fluidización debido al cambio de las características de las partículas que forman el lecho. Para un caudal dado, se observa que el torrefactor puede admitir partículas de diferentes características de tal forma que entre la V_{mf} de la que peor fluidice sea el 214% de la que mejor fluidice. Por lo que se comprueba que puede trabajar con una mezcla de partículas como la de la Tabla 4.1.

Si la densidad antes de torrefactor es de 365 kg/m^3 y se considera que se pierde peso de tal manera que queda un 70-80% de la masa inicial, la densidad después de la torrefacción estará alrededor de unos 276 kg/m^3 aproximadamente (si el volumen permanece constante). Lo que nos permite aprovechar la Figura A2.1 para elaborar la Tabla 4.3. En donde se puede apreciar la variación en la velocidad de mínima fluidización para este cambio de densidad y relaciones R/L de 3 y 12. Como se puede ver se produce una disminución del 50% en la velocidad mínima de fluidización tanto para la relación L/D de 3 como de 12.

Tabla 4.3 V_{mf} para diferentes diámetros, densidades y relaciones L/D [15]

Diámetro (mm)	5		4	
Densidad (kg/m^3)	365		274	
L/D	3	12	3	12
V_{mf} (m/s)	0,6	1,2	0,3	0,6

El cambio en la velocidad mínima de fluidización que puede admitir el reactor entre las partículas que se encuentran en la parte superior del lecho (0,11m) y la salida de la biomasa torrefactada (0,27 m) es de un 80%. Se considera que una vez torrefacta la biomasa con el cambio que se produce en la densidad de la partícula es posible que el producto salga si necesidad de cambiar el caudal con el que se está trabajando, ya por el cambio de densidad puede haber un incremento relativo del 100%, más de lo que el reactor puede soportar entre la superficie del lecho y la salida de productos. Aunque para trabajar de esta forma la alimentación de materia prima debe ser homogénea.

Para determinar la altura de la cámara es importante tener en cuenta la altura libre del lecho, para lo cual existen distintas correlaciones de entre las cuales se ha escogido la correlación de Chase (2004) [15].

Ecuación 9

$$TDH = 21,171 \times \frac{U^2}{g} = 0,3 \text{ m}$$

En donde g es la gravedad y U es la velocidad de fluidización, si se considera la velocidad mínima de fluidización $0,6 \text{ m/s}$, en la parte baja de la cámara, en la parte superior se tendrá una velocidad superficial de $0,15 \text{ m/s}$, si introducimos la velocidad

media superficial (0,38 m/s) que se tiene a lo largo de la cámara, se obtiene una altura libre de 0,3 m. Por lo que en principio no se considera necesario dotar de altura libre extra al reactor ya que se considera suficiente la altura que tiene la cámara de reacción.

4.2 PLANTA

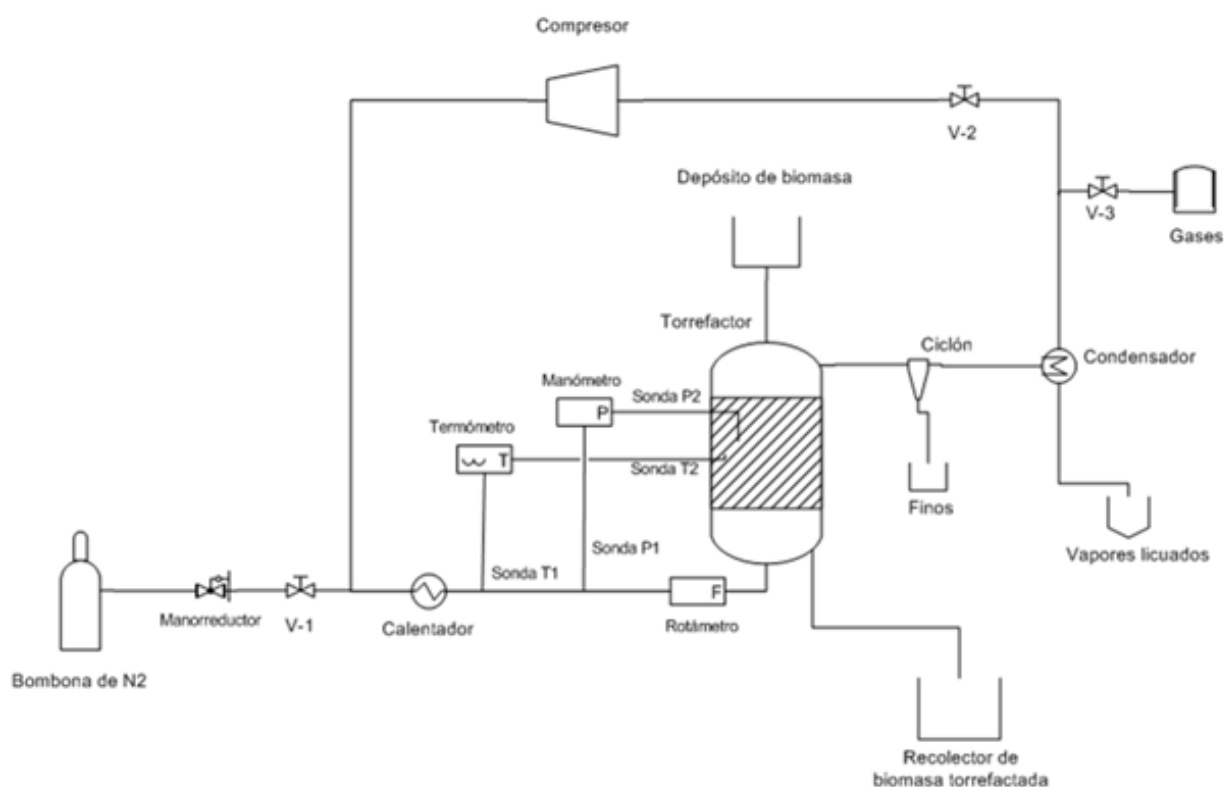


Figura 4.8 Esquema de la planta de torrefacción.

La planta está compuesta por:

- 1 bombona de nitrógeno:

La cual contiene el gas inerte necesario para llevar a cabo la torrefacción. Normalmente se utilizará nitrógeno, que habiendo contactado con una empresa del sector en Zaragoza, suelen distribuirse en bombonas de 35 kg.

Considerando un valor de 0,6 m/s para velocidad mínima de fluidización, y que el área del difusor es $0,026 \text{ m}^2$, es necesario un caudal de $0,015 \text{ m}^3/\text{s}$.

Aplicando la ley de los gases ideales:

Ecuación 10

$$P \times \frac{V}{t} = \frac{n}{t} \times R \times T$$

$$P = 1 \text{ [atm]}$$

$$V/t = 0,015 \text{ [m}^3\text{/s]} = 15,83 \text{ [l/s]}$$

$$R = 0,082 \text{ [atm*L/mol*K]}$$

$$T = 280 \text{ [}^\circ\text{C]} = 553,15 \text{ [K]}$$

Se obtiene un caudal molar de 0,35 mol/s, que con un peso molecular del nitrógeno de 28 g/mol, se corresponde con un caudal másico de 9,77 g/s.

De los datos desprendidos para lecho fluidizado de la Tabla 3 del Anexo 5, se puede estimar un tiempo de torrefacción de 21 minutos, esto representaría un gasto de nitrógeno de unos 12 kg, debido a las necesidades del lecho fluidizado. Ya que los gases de escape de la torrefacción pueden ser reinsertados en la unidad, previa separación de posibles partículas y vapores condensables, se considerará recircular estos gases para ahorrar en agente fluidizante.

- Manorreductor:

Cuando se trabaja con gases almacenados a alta presión, es necesario un manorreductor, que va instalado en la boquilla de la bombona. Sirve para reducir de la presión de almacenamiento a la presión necesaria en el proceso, capaz de superar las pérdidas hidráulicas de los equipos como la del propio lecho fluidizado.

- Válvulas de control (V-1, V-2, V-3)

En la planta hay tres válvulas: V-1 sirve para controlar el caudal que entra al torrefactor desde la bombona, si se está trabajando con recirculación seguramente esta válvula se encuentre totalmente cerrada durante el proceso. V-2 es la válvula que estando abierta permite la recirculación de los gases, es aconsejable no cerrar V-2 mientras está funcionando el compresor. Con la válvula V-3 abierta se permite la salida de gases desde la planta, durante el proceso, normalmente permanecerá cerrada y puede utilizarse junto con V-1 para controlar la presión en el interior del torrefactor. Abriendo V-3 con V-1 cerrada se reduce la presión en el interior de la planta, abriendo V-1 con V-3 cerrada se aumenta la presión en el interior.

- Calentador:

El calentador es el elemento que sirve para suministrar la temperatura necesaria al gas para que se produzca la torrefacción, considerando que el gas está almacenado a

20 °C y que la temperatura de torrefacción puede alcanzar 300 °C, se puede calcular la potencia necesaria como el incremento de la entalpía del nitrógeno entre 20 y 300 °C.

$$C_p (N_2) = 20,12 \text{ J/mol K}$$

$$\dot{n} = 0,35 \text{ mol/s}$$

Ecuación 11

$$\dot{Q} = \dot{n} \times C_p \times (T_2 - T_1) = 0,35 \times 20,12 \times (573 - 293) = 1,97 \text{ kW}$$

Una vez en funcionamiento cuando la temperatura de recirculación es de 80 °C el calor necesario será:

Ecuación 12

$$\dot{Q} = \dot{n} \times C_p \times (T_2 - T_1) = 0,35 \times 20,12 \times (573 - 393) = 1,27 \text{ kW}$$

- Termopar, manómetro, flujómetro:

La planta debe contar con los equipos necesarios para medir la temperatura, presión y caudal, de tal manera que el medidor de caudal se encuentre antes del torrefactor y para las medidas de temperatura y presión es preciso dotar a la instalación de los orificios necesarios para introducir las sondas de temperatura y presión antes y después del lecho fluidizado para estudiar cómo se modifican estas variables antes y después de la reacción.

- Torrefactor:

Es el reactor donde se produce la torrefacción ya detallado en el apartado anterior.

- Ciclón:

Para asegurarnos un buen funcionamiento en los equipos que siguen al torrefactor es interesante dotar a la planta de un equipo encargado de eliminar los finos que se pueden ver arrastrados por la corriente de salida de gases, para ello se recomienda la instalación de un ciclón a la salida del torrefactor pese a que el propio diseño del reactor se encarga de minimizar el arrastre de estas partículas.

- Intercambiador de calor:

El intercambiador de calor tiene una doble función, por un lado permite recuperar los compuestos volátiles que se han formado durante la torrefacción, los cuales pasan a ser estudiados, por otro lado, gracias a la inserción de este equipo el precio del compresor puede ser menor debido a que las especificaciones que han de cumplir los materiales del compresor son menos restrictivas.

Los principales productos condensables que se obtienen son el agua y ácido acético como se puede ver en la Tabla 2.2. La temperatura de ebullición a 1 atmósfera

de presión es de 117,9 °C para el ácido acético y de 100 °C para el agua. Por tanto hay que reducir la temperatura de 300 °C a 80 °C para condensar estos vapores.

Si se trabaja recirculando los gases de escape, previo llenado del reactor con nitrógeno, y conociendo el volumen del reactor que es 29,8 litros, se sabe que los moles de nitrógeno que se tienen dentro del reactor serán 0,63 moles a una temperatura de 300 °C.

Durante la torrefacción de biomasa se pueden producir un 30% de gases, que con un peso molecular estimado en 22,9 g/mol corresponden a una cantidad de 0,013 moles que se producen durante la torrefacción, con lo que al suponer que la pérdida de calor sensible de la corriente de salida del torrefactor es debido principalmente a la variación de entalpía del nitrógeno entre 300 y 80 °C. De esta manera queda sobredimensionada ya que no se está considerando que la reacción endotérmica hará que la temperatura de salida sea menor a la de la entrada.

Ecuación 13

$$\dot{Q}_S = \dot{n} \times C_p \times (T_2 - T_1) = 0,35 \times 20,12 \times (573 - 353) = 1,54 \text{ kW}$$

A este calor sensible hay que sumarle el calor latente relacionado con la condensación de los volátiles. Durante la torrefacción de biomasa a 300 °C, temperatura en la que más vapores se producen, se puede obtener un 6,6 % de agua y un 7,7 % de ácido acético en masa, lo que se corresponde con unas cantidades de 3,67 moles de agua y 1,2 moles por experimento.

$$H_{v,H_2O} = 40,683 \text{ kJ/mol}$$

$$H_{v,CH_3COOH} = 23,697 \text{ kJ/mol}$$

Ecuación 14

$$Q_L = n_{H_2O} \times H_{v,H_2O} + n_{CH_3COOH} \times H_{v,CH_3COOH}$$

$$Q_L = 3,67 \times 40,683 + 1,2 \times 23,697 = 177,60 \text{ kJ}$$

Si el experimento dura 21 minutos.

Ecuación 15

$$\dot{Q}_L = \frac{Q}{t} = \frac{177,60}{21 \times 60} = 0,141 \text{ kW}$$

El calor que se necesita evacuar es:

Ecuación 16

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_S + \dot{Q}_L = 1,54 + 0,141 = 1,681 \text{ kW}$$

- Compresor:

Es el equipo con el cual se pueden recircular los gases al torrefactor, debe ser capaz de impulsar un caudal de 10 L/s, que es el relacionado con un caudal molar de 0,35 moles a una temperatura de 80 °C.

- Cuadro eléctrico mando y maniobra

Si se desea tener una intervención informatizada, se puede controlar el proceso a través del cuadro de control.

- Estructura:

La planta necesita una estructura para sostener cada equipo y poder mantener las conexiones entre los equipos de forma segura.

4.3 CONCLUSIONES

Con el torrefactor diseñado se pretende tener capacidad para estudiar la torrefacción a nivel de laboratorio. También es posible estudiar el proceso de fluidización pudiéndose realizar pruebas experimentales con las que intentar mejorar los problemas que esta tecnología tiene para su escalado.

El diseño del reactor y el de la planta, se ha realizado en base a poder experimentar con el proceso de la torrefacción y el de la fluidización de biomasa, proporcionándole versatilidad al diseño.

La configuración de la cámara de reacción con cambio de sección hace que el reactor sea especialmente interesante para tratar un lecho heterogéneo de partículas.

El reactor diseñado puede servir para otros procesos, como el secado de la biomasa u otro tipo de flujos, como el lecho fijo.

El torrefactor podrá trabajar en discontinuo y en continuo:

Si trabaja en discontinuo, una vez producida la torrefacción de biomasa, se puede promover la salida de partículas mediante la apertura de la escotilla integrada en el depósito de la pieza “salida de productos” y si lo requiere, el cierre de la salida de gases. En esta escotilla se debe incorporar un filtro que retenga la biomasa torrefactada.

Si trabaja en continuo, sería interesante que la altura de la pieza “salida de productos” pudiese ser regulable de tal manera que para un lecho de partículas homogéneo se encontrase la altura en la que una vez torrefactadas las partículas, salieran de la cámara, dado el cambio producido en el peso de las partículas.

5. PROPUESTA ECONÓMICA

5.1 COSTES DE OPERACIÓN

- Coste de la biomasa:

El coste de la tonelada de biomasa puede rondar los 500 euros, incluido el transporte.

- Coste de la electricidad:

Actualmente el precio de la electricidad puede experimentar un cierto incremento y puede variar algo en función de la compañía contratada, pero puede estimarse en 0,13 €/kWh.

- Coste del nitrógeno:

La bombona de 35 kg cuesta 60 euros. Más un coste de 100 euros anuales por el servicio de transporte y un seguro de accidentes.

Para obtener los costes del agente fluidizante se contactó con una empresa zaragozana del sector.

5.2 COSTES DE FABRICACIÓN

Los costes de fabricación desprendidos tras varias reuniones con una empresa zaragozana con experiencia en este tipo de instalaciones son los siguientes:

- Torrefactor:

Íntegramente fabricado en acero refractario AISI – 310 de 3 mm de espesor.

Tapa superior: De 400 mm Ø con tubo de salida de gases de 40 mm Ø.

Tubo alimentador central: de 80 mm Ø y 470 mm de longitud, con ranuras interiores y con acoplamiento de brida al tornillo de alimentación.

Cuerpo troncocónico de 400 mm Ø superior, 200 mm Ø inferior y 400 mm de altura. Salida lateral para recogida del producto de sólidos con acople a tolva, ventana con mirilla en cristal cerámico. Difusor interior tipo “ALETEADO” según plano con anillo exterior e interior y juntas de cierre. Con sistema de cono interno para distribución de la masa y de flujo de gas.

Tapa inferior: cónica con entrada de tubo para nitrógeno con sistema de cierre por bridas de acero inoxidable AISI – 304.

Tolva de recogida: para la acumulación de sólidos.

Fabricada en acero inoxidable AISI – 304 de 2 mm de espesor.

Dimensiones: 200 mm Ø por 200 mm de altura con salida inferior cónica y válvula de acero inoxidable AISI – 304 de ¾”.

- Tornillo de alimentación

Tornillo sinfín estanco acero inoxidable AISI – 303 y AISI – 310.

Conjunto rodamientos + retenes + motor-reductor.

Caudal de alimentación 1 kg/min.

Motor de ¾ c.v.

- Conducciones y tuberías

Fabricado en acero Inoxidable AISI – 304 y AISI – 310.

Acoplamientos rápidos tipo “CLAMP”

Calorifugados.

- Estructura

Estructura soporte para todo el conjunto reactor en tubo de acero inoxidable AISI – 304 de 40 x 40 x 1,5 mm.

Chapa de acero inoxidable AISI – 304 de 1,2 mm de espesor con ruedas para su manejo-transporte.

- Calentador

Circuito de precalentamiento del fluido por el modo resistencias vivas con una masa de cerámica refractaria consiguiendo una temperatura de salida de 720 °C.

Resistencias fabricadas en hilo de KANTHAL APM (temperatura del elemento 1.400 °C) con sonda Termopar tipo “K”.

Aislamiento del módulo en fibra cerámica.

Potencia del módulo: 4.5 kW

Dimensiones: 300 x 300 x 600 mm

- Ciclón

Cuerpo fabricado en acero inoxidable AISI – 304 de 2 mm de espesor.

Tolva de recogida, para el ciclón.

- Intercambiador

Fabricado íntegramente en acero inoxidable AISI – 304 de 120 mm Ø y 600 mm de longitud.

Tolva inferior con válvula de ½’’ en acero inoxidable y tolva de recogida de sólidos.

10 Tubos intercambiadores de 10 mm. Ø en acero inoxidable AISI – 304.

Cámara de agua con entrada y salida en ½’’, cierre superior e inferior con brida y valona de acero inoxidable para facilitar su limpieza al ser desmontable.

Con filtro de 120 mm. Ø por 600 mm de longitud

En acero inoxidable AISI – 304.

- Cuadro eléctrico mando y maniobra

Regulador electrónico digital de 2 visores para pre-calentador.

Indicador de temperatura y sonda tipo “K” para reactor.

Manómetro digital.

Variador de frecuencia para motor-reductor del tornillo de alimentación.

Relé de estado sólido.

Interruptor motor-reductor, calentador y general.

PIA y Magneto-térmico.

Rotámetro manual para flujo de nitrógeno.

Manorreductor para botella de nitrógeno.

3 Válvulas manuales de acero inoxidable AISI – 316.

- Compresor de 1 c.v monofásico: Tipo “frigorífico”

Tabla 5.1 Resumen de precios de la planta.

Elementos	Coste (€)
FABRICADO	23.742
Torrefactor	
Tornillo de alimentación	
Calentador	
Ciclón + Tolva	
Intercambiador	1.136
Conducciones y tuberías	
Estructura	
Intercambiador	1.136
ENSAMBLADO	5.098
Compresor	848
Cuadro eléctrico	4.250
TOTAL	28.840

5.3 CONCLUSIONES

En este capítulo se ha evaluado el coste que puede tener el prototipo propuesto. Se aprecia que las partes fabricadas por la empresa son las que mayor precio tienen, ya que son piezas elaboradas a medida que necesitan mayor tiempo y dedicación en la fabricación. Estas piezas son: el torrefactor, el tornillo de alimentación (que va dentro del tubo de alimentación de biomasa), el calentador, el ciclón y su correspondiente tolva de almacenamiento para finos, el intercambiador, la estructura y por último las conducciones y tuberías. Todo ello tiene un coste de 23.742 €.

El compresor y el cuadro eléctrico son equipos que pueden ser seleccionados en el mercado especializado. El cuadro eléctrico tiene un coste elevado, un 14,7% del total, porque se trata de un control automático e informatizado, pero este precio puede descender si, el programa que se implementa en el regulador es programado por el cliente o si se opta por un control manual.

6 CONCLUSIONES

Durante la realización de este proyecto final de carrera se han podido comprobar las distintas mejoras que se producen en las propiedades de la biomasa en su uso como combustible. Principalmente se aumenta el poder calorífico del producto, se reduce la cantidad de humedad y también se reduce la resistencia mecánica. Todo esto repercute en ahorros a la hora de transportar y almacenar el combustible. Además se aumentan las posibilidades de uso de la biomasa como fuente de energía.

Se ha realizado una revisión de la tecnología disponible para torrefactor biomasa con el propósito de seleccionar la más adecuada. Resultando que diseñar un lecho fluidizado inspirado en la tecnología Torbed, es la mejor opción dada la buena transferencia de calor, la menor inversión y la oportunidad que ofrece para estudiar e intentar innovar la tecnología.

Se han presentado las variables de las que depende la fluidización, así como los factores de diseño y operación sobre los que se puede actuar para conseguir una buena fluidización. Con todo esto, se ha llevado a cabo el diseño del torrefactor y el esquema de la planta experimental, que puede servir para estudiar tanto la torrefacción como la fluidización de biomasa, de tal manera que se ha servido de base para elaborar una propuesta económica.

El presente proyecto final de carrera ha sido fruto del estudio del Estado del Arte para la torrefacción y las tecnologías aplicables. Este estudio ha sido posible gracias al acceso a artículos de reciente investigación que se facilita a los estudiantes desde la Universidad de Zaragoza. Con lo cual, se ha elaborado la base de datos de estudios referentes a la torrefacción, que era un objetivo del proyecto.

Gracias a este paso he tenido la oportunidad de familiarizarme con los recursos digitales y los textos científicos, la mayoría en lengua inglesa como es habitual. También a conocer y trabajar con software de tratamiento de bibliografía como el programa “Endnote”.

En el cumplimiento de otro de los objetivos se ha realizado una comparativa entre las tecnologías para realizar la selección de un tipo de reactor, para lo cual, una vez estudiadas las características más influyentes, se realizó una tabla de decisión, técnica aprendida en el transcurso de la carrera, que ayudó a seleccionar la tecnología más conveniente.

Una vez seleccionada la tecnología se realizó el diseño de la planta, ayudado por la herramienta “visio”, también el dimensionamiento del torrefactor en “auto CAD”, lo cual ha contribuido en gran medida a ganar confianza y destreza con estos programas que seguramente pueda utilizar en el futuro.

A la vez que se realizaba el diseño se mantuvieron unas reuniones con una empresa que se puede encargar de la fabricación del prototipo, durante este periodo tuve

oportunidad de aprender los pequeños detalles que pueden pasar inadvertidos al diseñador y son interesantes para el fabricante, entre otras cosas. Se obtuvo un presupuesto de la fabricación del torrefactor así como de otros elementos que complementan la planta experimental, con lo que se puede tener referencia de un coste aproximado, cumpliendo los objetivos planteados.

En el trabajo de diseñar el torrefactor varios modelos fueron estudiados, por ejemplo, la salida de biomasa torrefactada sufrió varias modificaciones, aumentándose la sección de salida de la cámara y separándola lo máximo posible de la salida de gases, de manera que se evitase arrastrar partículas en la corriente de salida de gases. De todas formas, se aconseja introducir una escotilla con la que poder controlar la salida del producto cuando esté totalmente torrefactado. También puede resultar interesante realizar pruebas experimentales para cerciorarse de la correcta ubicación de las diferentes partes al cuerpo del reactor y el tamaño de las distintas piezas.

El prototipo diseñado tiene la opción de realizar experimentos sobre una tecnología innovadora, que da la oportunidad de experimentar sobre un proceso que puede contribuir a solucionar problemas energéticos, especialmente sufridos por países como España, el cual no tiene grandes reservas de combustibles. Ya que como se ha comprobado, gracias a la torrefacción, se puede tener un combustible a partir de la biomasa con bajos costes y balance casi neutro en cuanto a las emisiones de CO₂, que es especialmente interesante para producir calor residencial descentralizado gracias a los beneficios obtenidos cuando hay que transportar grandes cantidades a largas distancias.

En la línea de investigación que permite el prototipo diseñado, sería interesante realizar una clasificación de la biomasa, en función de sus compuestos y realizar ensayos para determinar la optimización en las variables principales de la torrefacción. Asimismo es posible determinar la rentabilidad de introducir el proceso de torrefacción, teniendo en cuenta los usos y la situación geográfica, así como el tipo de biomasa y la procedencia del recurso. Además, se pueden probar los distintos parámetros de operación comentados para la mejora de la fluidización.

FIGURAS

Figura 2.1 Esquema torrefacción [2].....	13
Figura 2. 2 Pirólisis de la biomasa de algodón [2].	13
Figura 2.3 Mecanismo de reacción [6].....	14
Figura 2.4 Rendimiento a los sólidos “A”, “B”, “C” a diferentes temperaturas y tiempos de reacción [6].....	15
Figura 2.5 Productos gaseosos obtenidos tras la torrefacción [7]	16
Figura 2.6 Tratamiento térmico de la caña de alpiste no tratada y torrefactada [7].	19
Figura 2.7 Oxidación de la caña de alpiste no tratada y torrefactada [7].	19
Figura 2.8 Krevelen para carbón, biomasa y biomasa torrefactada [7].....	21
Figura 2.9 Potencia consumida y capacidad de molienda frente a tamaño de partícula. En la leyenda se indica: tipo de biomasa, temperatura y tiempo de torrefacción [9].	22
Figura 3.1 Esquema de planta de torrefacción industrial [5].....	26
Figura 3.2 Tornillo sin fin.	29
Figura 3.3 Horno rotativo.....	30
Figura 3.4 Lecho fluidizado.	31
Figura 3.5 Torbed [12].	32
Figura 3.7 Lecho móvil [14].	33
Figura 3.8 Turbo-secador Wyssmont [1].	34
Figura 3.10 Homogeneidad frente a las fuerzas HDF e IPF [11].....	36
Figura 3.11 Clasificación de Geldart [10]	37
Figura 3.12 Distribuidor en espiral y distribución de los álabes del Torbed [13]	38
Figura 4.1 Vista del torrefactor.	40
Figura 4.2 Entrada de gas.	42
Figura 4.3 Disco difusor.....	42
Figura 4.4 Cuerpo.....	43
Figura 4.5 Entrada de biomasa.	43
Figura 4.6 Salida de productos.	44
Figura 4.7 Forma del cuerpo.	45
Figura 4.8 Esquema de la planta de torrefacción.	48

TABLAS

Tabla 2.1 Componentes de la biomasa [3].	11
Tabla 2.2 Compuestos formados en la torrefacción de la caña de alpiste [8].	17
Tabla 2. 3 Resultados del TGA, material orgánico, cenizas y carbón fijo en base seca [4].	18
Tabla 2.4 Comparación del análisis elemental para diferentes biomasa y grados de torrefacción [6].	20
Tabla 2.5. Propiedades del combustible [5].	23
Tabla 3.1 Comparativa entre las diferentes tecnologías.	35
Tabla 4.1 Fluidización del tallo de algodón [15].	45
Tabla 4.2 Relación de las áreas a diferentes cotas de la cámara de reacción, % ΔA : Incremento de área relativo.	46
Tabla 4.3 Vmf para diferentes diámetros, densidades y relaciones L/D [15]	47
Tabla 5.1 Resumen de precios de la planta.	56

ECUACIONES

Ecuación 1	15
Ecuación 2	15
Ecuación 3	46
Ecuación 4	46
Ecuación 5	46
Ecuación 6	46
Ecuación 7	46
Ecuación 8	46
Ecuación 9	47
Ecuación 10	49
Ecuación 11	50
Ecuación 12	50
Ecuación 13	51
Ecuación 14	51
Ecuación 15	51
Ecuación 16	51

BIBLIOGRAFÍA

1. Kristoffer Persson, I.O.a.A.N., *Biomass Refinement by Torrefaction*.
2. Bergman, P.C.A., et al., *Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass*.
3. Fernandez, J., *Materias primas para la producción de biocombustibles sólidos*. 5º Jornadas abulenses de Energías renovables. 2006.
4. Arauzo, J., M.L. Salvador, and R. Bilbao, *BIOMASA*. 1995.
5. Bergman, P.C.A., *Combined torrefaction and pelletisation*. 2005.
6. Mark J. Prins *, K.J.P., Frans J.J.G. Janssen, *Torrefaction of wood Part 1. Weight loss kinetics*. 2006.
7. Bridgeman, T.G., et al., *Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties*. Fuel, 2008. **87**(6): p. 844-856.
8. Prins, M.J., *Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction*. 2005.
9. B. Arias, C.P., J. Feroso, M.G. Plaza, F. Rubiera, J.J. Pis, *Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass*. 2007.
10. Walas, S.M., *Chemical process equipment*. 1990.
11. Zhang, W., *A Review of Techniques for the Process Intensification of Fluidized Bed Reactors*. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2009. **17**(4): p. 688-702.
12. *REACTORS*.
13. TOPELL, *Topell on torrefaction*. 2009.
14. Group, T., *Process Reactor Technologies*.
15. Chase, G.G., *Elutriation*. Akron University, Ohio.: p. 61-67.
16. Science, I.I.o., *Project Completion Report on Torrefaction of Bamboo*. October, 2006.
17. Barnó, J.G., *La torrefacción: una tecnología innovadora en el pre tratamiento y la densificación energética de la biomasa*. 2008.
18. Westerhof, R.J.M., et al., *Effect of Temperature in Fluidized Bed Fast Pyrolysis of Biomass: Oil Quality Assessment in Test Units*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010. **49**(3): p. 1160-1168.
19. Zhong, W.Q., et al., *Fluidization of Biomass Particles in a Gas-Solid Fluidized Bed*. Energy & Fuels, 2008. **22**(6): p. 4170-4176.
20. Cui, H.P. and J.R. Grace, *Fluidization of biomass particles: A review of experimental multiphase flow aspects*. Chemical Engineering Science, 2007. **62**(1-2): p. 45-55.
21. Si, C.D. and Q.J. Guo, *Fluidization Characteristics of Binary Mixtures of Biomass and Quartz Sand in an Acoustic Fluidized Bed*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008. **47**(23): p. 9773-9782.
22. Svoboda, K., et al., *Pretreatment and feeding of biomass for pressurized entrained flow gasification*. Fuel Processing Technology, 2009. **90**(5): p. 629-635.
23. Bergman, P.C.A., et al., *Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations*.