

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Ingeniería básica de una planta de torrefacción de
biomasa

Autor: Daniel Pérez Escobar

Tutor: Manuel Campoy Naranjo

Dep. de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2014



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa

Autor:

Daniel Pérez Escobar

Tutor:

Manuel Campoy Naranjo

Profesor Contratado Doctor

Dep. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2014

Trabajo Fin de Grado: Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa

Autor: Daniel Pérez Escobar

Tutor: Manuel Campoy Naranjo

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2014

El Secretario del Tribunal

*A mi familia y todos mis seres
queridos, que tanto me han
ayudado y apoyado en mis
estudios*

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a:

- La Universidad de Sevilla y la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, donde he cursado este Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, por los servicios prestados durante estos cuatro años.
- Todos los profesores que he tenido en estos cuatro años, porque gracias a sus enseñanzas he podido aprender todo lo que sé sobre la Ingeniería.
- El IES Burguillos y todos los profesores que me dieron clase durante mi estancia en el mismo, donde recibí una buena preparación para mis estudios universitarios.
- El CEIP Manuel Medina y los maestros que tuve durante mi estancia allí, donde comencé a estudiar cuando era pequeño y donde recibí parte de la educación necesaria.
- Mis padres y mi hermana, que me han educado e inculcado unos valores necesarios para ser buena persona y buen estudiante; sin ellos no hubiera sido posible la consecución del título de grado.
- Toda mi familia: abuelos, tíos y primos, que siempre me han apoyado y animado a seguir adelante.
- Mi novia, Marta, y mis amigos, que siempre han estado, de una manera o de otra, apoyándome, sobre todo en los momentos más difíciles.

Daniel Pérez Escobar

Sevilla, 2014

Resumen

El objetivo principal de este documento es el diseño de una ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa. La planta debe producir biomasa torrefactada y peletizada para alimentar satisfactoriamente a una central térmica de 20 MW. La producción de la planta, para cumplir los requisitos impuestos, debe ser de 26750 t/año.

Para ello, se han estudiado los procesos que tienen lugar y se han diseñado los equipos necesarios para llevar a cabo el proceso. La metodología seguida ha sido buscar en bibliografía los datos necesarios y realizar los cálculos a partir de los mismos.

Así, se va a diseñar una planta que dispone de dos superficies de almacenamiento, una para la materia prima y otra para el producto final; una secadora de banda para reducir la humedad de la biomasa antes de procederse a la torrefacción de 15 m de largo, mejorando el secado la eficiencia del proceso; 6 silos de almacenamiento de 535 m³ cada uno donde se almacena la biomasa seca; un torrefactor o reactor de torrefacción, consistente en un cilindro de 13.5 m de largo y 3 m de diámetro, donde se produce, como su propio nombre indica, el proceso de torrefacción; 2 tornillos sinfín refrigeradores, que disminuyen la temperatura de la biomasa desde los 280°C a los que sale de la torrefacción hasta menos de 100°C; dos peletizadoras, que producen los pelets de biomasa torrefactada y un oxidador térmico, que quema los gases producidos en la torrefacción para emitirlos a la atmósfera por la chimenea sin peligro de contaminación.

Cabe destacar que el tipo de biomasa seleccionado para el proceso son astillas y restos de madera procedentes de la industria maderera, aprovechando así el subproducto de estas industrias.

Abstract

The main objective of this paper is to design a basic engineering of a roasting plant biomass. The plant should produce torrefied biomass and pelletized to successfully feed a 20 MW power plant. The output of the plant to meet the requirements, should be 26750 t / year.

To do this, we have studied the processes taking place and designed the necessary equipment to carry out the process. The methodology followed in the literature has been to seek the necessary data and perform calculations on them.

Thus, it was going to design a plant that has two surfaces for booting, one for the raw material and one for the final product; band dryer to reduce the moisture of the biomass before proceeding to the roasting of 15 m in length, improving the efficiency of the drying process; 6 storage silos where each 535 m³ dry biomass is stored; a roaster or roasting reactor, consisting of a cylinder of 13.5 m long and 3 m in diameter, where it occurs, as its name suggests, the roasting process; Two augers refrigerators, the temperature lowering from the 280 biomass leaving the roasting to less than 100; two pelletizing, producing torrefied biomass pellets and a thermal oxidizer that burns the gases produced in the roasting to issue them to the atmosphere by the fireplace without risk of contamination.

Note that the type of biomass for the process are selected and scrap wood chips from timber, taking advantage of the byproduct of these industries.

Agradecimientos	i
Resumen	iii
Abstract	v
Índice	viii
Índice de Tablas	ix
Índice de Figuras	xi
Notación	xiii
1 Introducción	17
1.1 Aspectos clave	17
1.2 Objetivo y antecedentes	22
1.3 Estructuración	22
2 Memoria descriptiva y justificativa	25
2.1 Almacenamiento de materia prima	27
2.2 Secado	28
2.3 Almacenamiento de la biomasa seca	30
2.4 Torrefacción	31
2.5 Oxidación térmica	33
2.6 Refrigeración	35
2.7 Peletización	36
2.8 Almacenamiento de producto final	37
3 Memoria de cálculo	39
3.1 Producción de la planta	39
3.2 Dimensionamiento de equipos	40
3.2.1 Almacenamiento de producto final	40
3.2.2 Peletizadora	40
3.2.3 Tornillo sinfín refrigerador	40
3.2.4 Torrefactor	41
3.2.5 Oxidador térmico	46
3.2.6 Tornillo sinfín	48
3.2.7 Silo de almacenamiento en seco	49
3.2.8 Secadora	49
3.2.9 Almacenamiento de materia prima	49
4 Mediciones y presupuesto	51
4.1 Movimiento de tierras	51
4.2 Cimentación	51
4.3 Edificios	52

<i>4.4 Equipos de proceso</i>	52
4.4.1 Almacenamiento de materia prima	52
4.4.2 Secado	53
4.4.3 Almacenamiento en seco	53
4.4.4 Tornillo sinfín	53
4.4.5 Torrefacción	53
4.4.6 Oxidación térmica	53
4.4.7 Refrigeración	54
4.4.8 Peletización	54
4.4.9 Almacenamiento de producto final	54
<i>4.4 Resumen del presupuesto</i>	55
5 Conclusiones	57
Bibliografía	
Anexo I: Planos y diagramas	
<i>Plano 1: Diagrama del proceso</i>	
<i>Plano 2: Diagrama de flujo</i>	
<i>Plano 3: P&ID</i>	
Anexo II: Hojas de especificaciones	
Anexo III: Catálogos	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Dimensiones de la secadora de banda	29
Tabla 3-1. Opciones de diámetro sección y longitud para el torrefactor	42
Tabla 3-2. Datos y resultados del caudal de gases producido en la torrefacción	43
Tabla 3-3. Datos de la biomasa en el torrefactor	43
Tabla 3-4. Composición elemental de la biomasa torrefactada a 280°C y 3h	44
Tabla 3-5. Balance de energía en el torrefactor	45
Tabla 3-6. Datos y reacciones del caudal de entrada al oxidador térmico	46
Tabla 3-7. Balance de energía en el oxidador térmico	47
Tabla 3-8. Datos y resultados del tornillo sinfín según su inclinación	48
Tabla 4-1. Cuadro-resumen del presupuesto	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Potencial de biomasa internacional	18
Figura 1-2. Efecto de la torrefacción en los componentes de la biomasa	19
Figura 1-3. Principales procesos de los componentes de la biomasa durante la torrefacción	21
Figura 1-4. Evolución de la temperatura con el tiempo en el interior del reactor	21
Figura 2-1. Características principales de los restos de madera	25
Figura 2-2. Relación entre humedad y densidad aparente	26
Figura 2-3. Diagrama de bloques del proceso	27
Figura 2-4. Vistas de la rosca de alimentación de la secadora	28
Figura 2-5. Secado de banda	30
Figura 2-6. Esquema del torrefactor y las corrientes involucradas en la torrefacción	32
Figura 2-7. Croquis del torrefactor	33
Figura 2-8. Mezclador de inducción atmosférica	34
Figura 2-9. Principio de funcionamiento del quemador de corona por inducción atmosférica	34
Figura 2-10. Corte de la sección del tornillo sinfín refrigerador	36
Figura 2-11. Funcionamiento de la peletizadora de matriz anular	37

Notación

°C	Grado/s centígrado/s
C	Carbono
H	Hidrógeno
O	Oxígeno
%	Por ciento
CO ₂	Dióxido de carbono
CO	Monóxido de carbono
min	Minuto/s
MW	Megavatio/s
t	Tonelada/s
kg	Kilogramo/s
h	Hora/s
PCI	Poder calorífico inferior
m ³	Metro/s cúbico/s
VOC's	Componentes orgánicos volátiles
m	Metro/s
m ²	Metro/s cuadrado/s
mg	Miligramo/s
Nm ³	Normal metro/s cúbico/s
Nº	Número
máx.	Máximo/a
m. c. a.	Metro/s de columna de agua
°	Grado/s
kW	Kilovatio/s
H ₂ O	Agua
rpm	Revoluciones por minuto
W	Vatio/s
mm	Milímetro/s
η _m	Rendimiento másico
m _{salida}	Masa a la salida
m _{entrada}	Masa a la entrada
η _e	Rendimiento energético
MJ	Megajulio/s
kJ	Kilojulio/s
s	Segundo/s
3er	Tercer

U	Coeficiente global de transferencia de calor
J	Julio/s
Q	Calor
m_B	Caudal másico de biomasa
C_{pB}	Calor específico de la biomasa
T_{EB}	Temperatura de entrada de la biomasa
T_{SB}	Temperatura de salida de la biomasa
m_W	Caudal másico de agua
C_{pW}	Calor específico del agua
T_{EW}	Temperatura de entrada del agua
T_{SW}	Temperatura de salida del agua
A	Área
DTLM	Diferencia de temperatura logarítmica media
Ln	Logaritmo neperiano
CV	Caballo/s de vapor
Q_m	Caudal másico
L	Longitud
F	Factor de fricción
Dep.	Departamento
Ing.	Ingeniería
H	Rendimiento
PM	Peso molecular
G	Gramo/s
F_i	Caudal másico del componente i
ΔH_{fi}^0	Entalpía de formación del componente i
C_{pi}	Calor específico del componente i
T_E	Temperatura de entrada
Q_{aporte}	Calor a aportar en el torrefactor
T_{ref}	Temperatura de referencia
T_S	Temperatura de salida
C_p	Calor específico
T	Temperatura
N_2	Nitrógeno molecular
O_2	Oxígeno molecular
kmol	Kilomol/es
$Q_{pérdidas}$	Calor de pérdidas
ent	Entrada
sal	Salida
vol.	Volumétrico
K	Kelvin
atm	Atmósfera
H	Altura
€	Euro/s

=	Igual
+	Más
-	Menos
x	Multiplicado por
/	Partido por
Σ	Sumatorio

1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realizará una introducción sobre el proyecto. Ésta incluye varios apartados: aspectos claves, donde se habla sobre la situación actual de la biomasa, sus características y los procesos y propiedades de la torrefacción, el proceso más importante de la planta; objetivo y antecedentes, donde se explica para qué se realiza este proyecto y la metodología seguida para ello, así como las necesidades iniciales para la realización del mismo, la ubicación de la planta y los casos anteriores similares; por último, se realiza una estructuración del proyecto, donde se explica brevemente el contenido de cada uno de los capítulos.

1.1 Aspectos claves

La biomasa se está convirtiendo en una de las alternativas más fiables a las fuentes de energía basadas en los combustibles fósiles, como pueden ser el petróleo, el gas natural o el carbón.

Éstas presentan grandes inconvenientes ya que son fuentes de energía no renovables y el tiempo que necesitan para regenerarse es muy grande (del orden de miles de años). Además, su utilización provoca efectos contaminantes en el medio ambiente, debido a las altas emisiones de gases nocivos a la atmósfera producidos en su combustión. Por todo ello, se está investigando en la actualidad la utilización de biomasa, entre otras, como fuente de energía para un futuro inmediato.

En la figura 1-1 se puede observar una estimación sobre la demanda de biomasa en el mundo para el año 2015.

El uso fundamental de la biomasa es como combustible. Se puede usar como combustible tanto en calderas para hogares como en calderas industriales, así como para la generación de energía eléctrica y térmica o para el funcionamiento de los vehículos (biodiesel o bioetanol).

La biomasa se obtiene de residuos biológicos, desde residuos urbanos hasta restos de cultivos agrícolas. Se puede hacer una clasificación de la biomasa dependiendo de su origen (*Castells, 2005*):

- Biomasa natural: Es aquella que procede de la naturaleza sin que haya ningún tipo de intervención por parte del ser humano. Un ejemplo de este tipo de biomasa son los restos de árboles que yacen en el suelo de los bosques por caída natural.
- Biomasa residual: Se trata de biomasa procedente de residuos de algunas actividades humanas como la agricultura, la ganadería, la industria, el tratamiento de residuos, etc. Este es el tipo de biomasa utilizado en la planta descrita en este proyecto, ya que la materia prima es un subproducto o residuo de la industria de la madera.

- Biomasa procedente de cultivos energéticos: Los cultivos energéticos son cultivos que se realizan, sólo y exclusivamente, para la producción de biocombustibles. Pueden ser cultivos de cereales o remolacha o cultivos como los lignocelulósicos forestales o herbáceos.

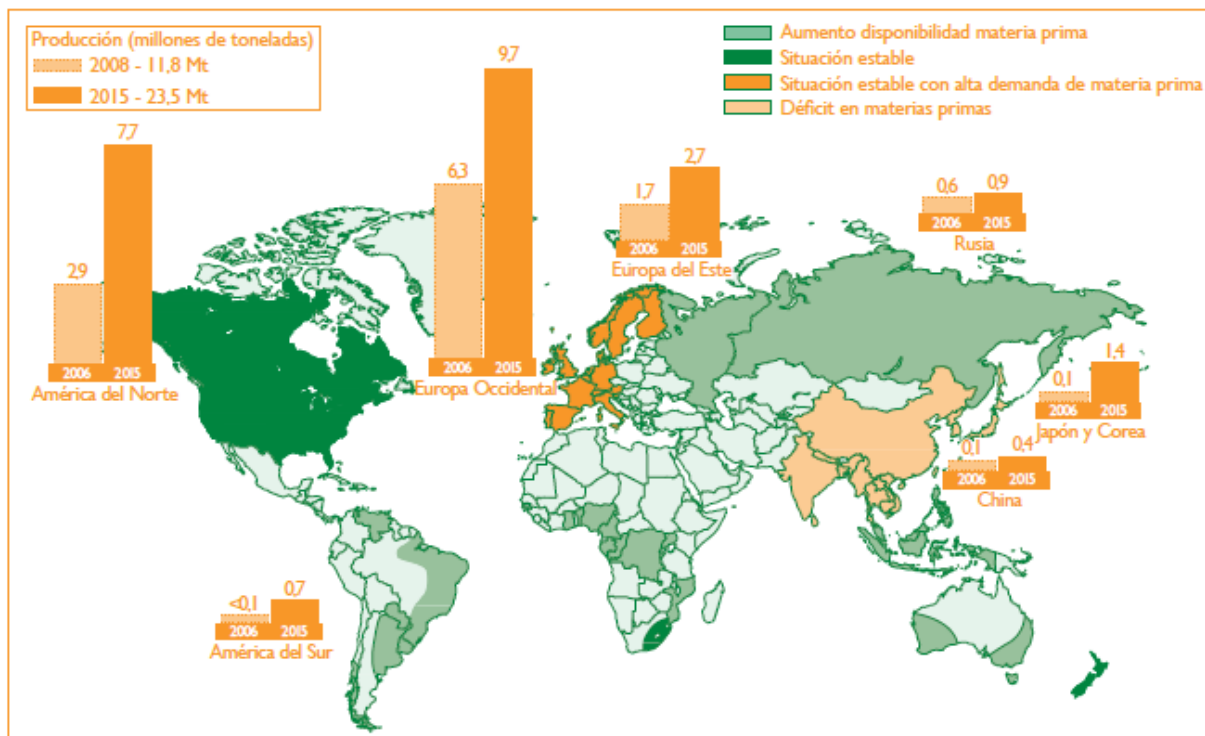


Figura 1-1. Potencial de biomasa internacional (Fuente: *BIOPLAT, Ministerio de Economía y Competitividad, Gobierno de España*)

Las ventajas de la biomasa están claras, pues es abundante e inagotable y es una fuente de energía muy limpia. Pero la biomasa presenta algunas desventajas como su estructura fibrosa y su alta tenacidad, que hacen que su reducción de tamaño sea costosa, o su alta humedad e higroscopía, que hacen que contenga una gran proporción de agua, teniendo así una menor densidad energética. Pues bien, estos inconvenientes pueden ser paliados mediante la aplicación de una serie de tratamientos para mejorar sus propiedades y hacer que su manejo sea más sencillo.

Entre estos tratamientos se encuentra la torrefacción, que consiste en un tratamiento termoquímico de la biomasa en un nivel de temperatura entre 200°C y 300°C, a presión atmosférica y en ausencia de oxígeno.

Los componentes de la biomasa que hacen que su estructura sea fibrosa y tenaz son la lignina, la hemicelulosa y la celulosa. La celulosa se encuentra en el interior de la hemicelulosa y ésta, a su vez, se encuentra rodeada por la lignina. Estos componentes se definen a continuación:

La celulosa es un polisacárido que tiene como fórmula general $(C_6H_{10}O_5)_n$ y su peso molecular promedio se encuentra en el rango de 300–500. Es la biomolécula orgánica más abundante. La celulosa tiene una función estructural en las plantas ya que forma parte de los tejidos de sostén. La pared de una célula vegetal joven contiene aproximadamente un 40% de celulosa; la madera un 50%, mientras que el ejemplo más puro de celulosa es el algodón con un porcentaje mayor al 90%.

La hemicelulosa son polisacáridos complejos con fórmula general $(C_5H_8O_4)_n$ que forma parte de las paredes de las diferentes células de los tejidos del vegetal, recubriendo la superficie de las fibras de celulosa y consisten en estructuras ramificadas. A diferencia de la celulosa, la hemicelulosa es soluble en soluciones alcalinas. Su composición puede variar considerablemente entre las especies de

biomasa leñosa y herbácea. Su componente más representativo es el *xilan* el cual puede llegar a ser un 10% y 30% del peso seco en las especies de maderas duras y blandas, respectivamente.

La lignina se caracteriza por ser un complejo aromático (no carbohidrato) con un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico). El acoplamiento aleatorio de estos radicales da origen a una estructura tridimensional (polímero amorfo) característica de la lignina. La lignina es el polímero natural más complejo en relación a su estructura y heterogeneidad. Este componente de la madera realiza múltiples funciones que son esenciales para la vida de las plantas. Por ejemplo, proporciona rigidez a la pared celular y los tejidos lignificados resisten el ataque de los microorganismos, impidiendo la penetración de las enzimas destructivas en la pared celular. La lignina acoplada a las fibras de celulosas da lugar a un complejo lignocelulósico del cual la lignina puede ser aislada por tratamiento con ácido sulfúrico por ser insoluble en soluciones ácidas. El contenido de lignina en base seca en las maderas leñosas suele estar presente en un 20% al 40% del peso, mientras que en las biomasa herbáceas es de un 10% a 40%.

El proceso de torrefacción consigue descomponer y despolimerizar estos componentes para disminuir la tenacidad de la biomasa y así facilitar su reducción de tamaño haciendo que ésta sea menos costosa. Además, por el mismo motivo, la biomasa, después del proceso de torrefacción, presenta un comportamiento de fluidificación que facilita su manejo. En la figura 1-2 se observa claramente el efecto de la torrefacción en la biomasa.

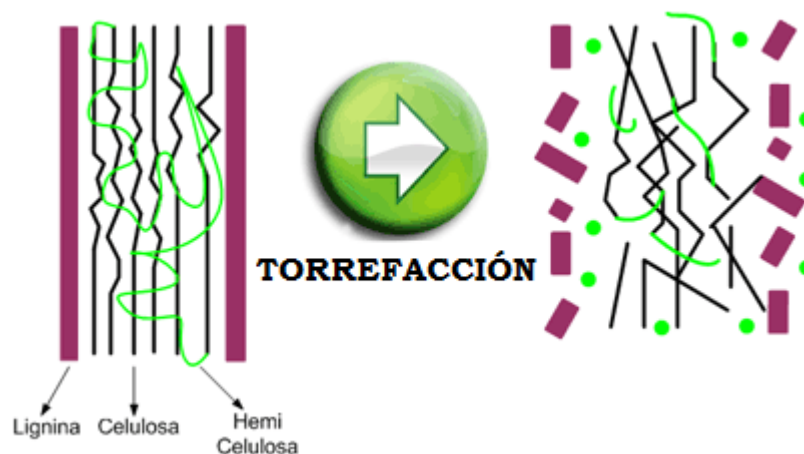


Figura 1-2. Efecto de la torrefacción en los componentes de la biomasa

Es conveniente destacar que cada componente se degrada a temperaturas diferentes, por lo que para uno de ellos se producirán reacciones diferentes. Así, los procesos y reacciones que ocurren en la torrefacción son los siguientes (*Shankar, 2011*):

- En primer lugar, hasta alcanzar una temperatura de 200°C, se produce un secado.
- A partir de aquí tiene lugar la torrefacción, que se produce entre 200°C y 300°C y consta de los siguientes procesos:
 - Devolatilización y carbonización de la hemicelulosa, cuyo efecto es desorientar las fibras desapareciendo así su coherencia mutua.
 - Depolimerización de la celulosa, cuyo efecto es la disminución de la longitud de las fibras.

- Depolimerización y devolatilización de la lignina, cuyo efecto es el ablandamiento de la biomasa y la pérdida de masa.

En la figura 1-3 se representan los procesos que sufre cada componente de la biomasa a medida que aumenta la temperatura.

La torrefacción suele producirse en dos pasos principales. Primero tienen lugar las reacciones de depolimerización a temperaturas menores de 250 °C y donde se producen poliazúcares alterados y reordenados. Y en segundo lugar se produce la descomposición y desvolatilización a temperaturas entre 250°C y 300°C, donde se produce CO₂, CO, agua y algunos componentes orgánicos volátiles (*Di Blasi y Lanzetta, 1997*).

Durante el proceso, la biomasa sufre diversas transformaciones. Primero, a unos 160°C, se produce el secado, donde la biomasa se seca eliminando el agua química. En esta etapa, se empieza a producir CO₂. Más tarde, en torno a los 180-270°C, se produce una reacción exotérmica y se empieza a degradar la hemicelulosa. La biomasa empieza a cambiar su color a negro/marrón y se elimina la humedad, produciéndose CO₂ y ácido acético con fenol. La biomasa retiene su potencial energético, es decir, elimina los volátiles con poco poder calorífico lo que hace que pierda masa pero no energía, pierde su higroscopicidad y se vuelve más desmenuzable. A 280°C, la reacción exotérmica aumenta la producción de gas ya que se empieza a producir la descomposición de la hemicelulosa y la lignina, y se produce CO y C_xH_y, además de otros productos pesados. A partir de los 300°C empieza la pirólisis, un proceso no deseado, ya que se descompondría la biomasa (*Zanzi, 2001*).

En la figura 1-4 se puede observar una gráfica donde se representa la evolución de la temperatura frente al tiempo, diferenciando los procesos que tienen lugar durante la torrefacción. Cabe destacar que el enfriamiento se realiza fuera del reactor.

Las principales propiedades del proceso de torrefacción son: la temperatura debe estar comprendida entre 200°C y 300°C, la presión debe ser la atmosférica, el proceso debe realizarse en ausencia de oxígeno para evitar la creación de óxidos que contaminen el producto final, la velocidad de calentamiento no puede superar los 50°C/min, y el tiempo de residencia es variable (*Shankar, 2011*). Las variables más importantes a controlar son la temperatura y el tiempo de residencia. Modificando estas dos variables se pueden conseguir diferentes tipos de biomasa torrefactada. Cuanto mayores sean la temperatura y el tiempo de residencia, mayores serán el contenido en carbono fijo y la energía contenida por kilogramo.

Los productos de la torrefacción son varios y se producen en dos corrientes. La corriente principal es la del sólido, que contiene a la biomasa torrefactada, suponiendo ésta un 70% aproximadamente del sólido inicial. La segunda corriente es gaseosa y contiene tanto gases permanentes como volátiles condensables. Los gases permanentes son dióxido de carbono y monóxido de carbono, y los volátiles condensables son agua, ácido acético, ácido láctico, acetona, ácido fórmico, metanol y trazas de fenol, furfural y amoníaco.

La biomasa torrefacta es hidrófoba y presenta mucha menor humedad que antes de la torrefacción. Por tanto, aumenta su energía por kilogramo, característica que es importante para el uso de la biomasa como fuente de energía, ya que disminuye su masa con la volatilización y se conserva su energía. También presenta una relación oxígeno/carbono menor.

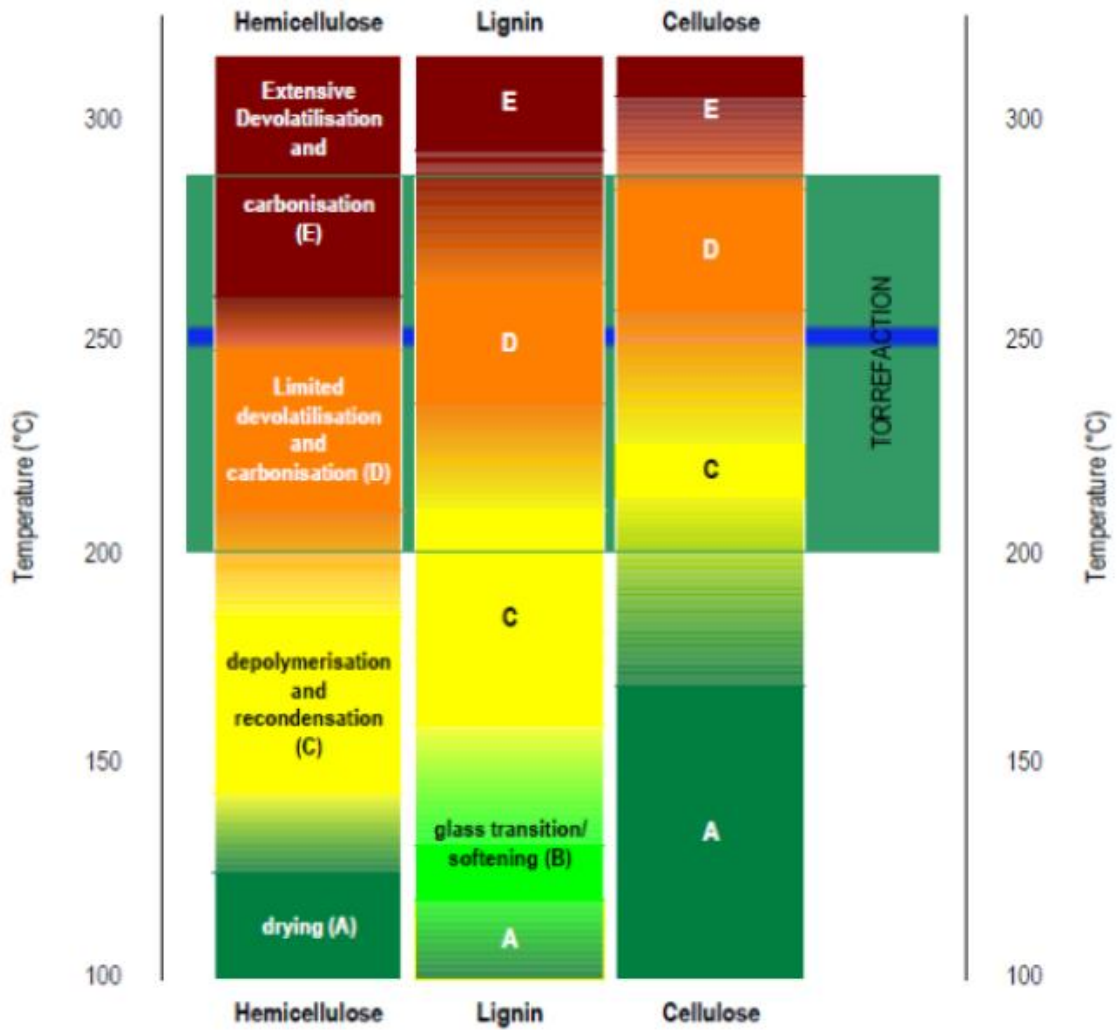


Figura 1-3. Principales procesos de los componentes de la biomasa durante la torrefacción (Fuente: ECN, 2005)

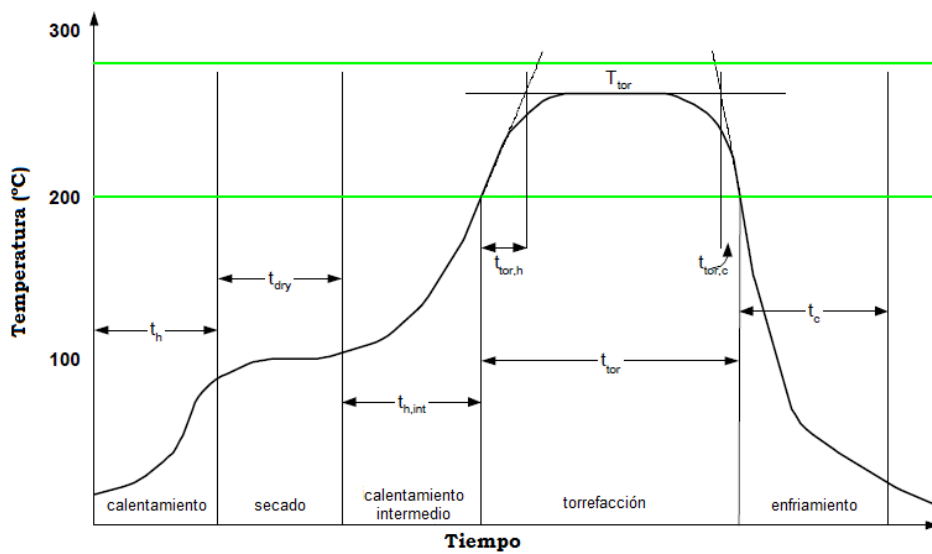


Figura 1-4. Evolución de la temperatura con el tiempo en el interior del reactor

1.2 Objetivo y antecedentes

El objetivo de este proyecto consiste en diseñar una ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa que sea capaz de producir biomasa torrefacta y peletizada para alimentar satisfactoriamente a una central térmica de 20 MW. La producción de la misma para cumplir estos requisitos es de 26750 t/año.

La metodología seguida para ello será la siguiente: se calcularán los parámetros más relevantes para el diseño de los equipos necesarios en el proceso, y se diseñará el proceso de la manera más eficiente posible. Los cálculos serán realizados a partir de la información encontrada en artículos y publicaciones sobre torrefacción.

Cabe destacar que la aplicación de la tecnología de torrefacción a la biomasa es relativamente moderna y se encuentra aún en fase de desarrollo, por lo que no existen muchas plantas de este tipo a escala industrial. Sí se han encontrado algunos experimentos a escala de laboratorio y muchos artículos con fundamentos teóricos sobre el proceso. A partir de ahí, y mediante algunas estimaciones, se ha diseñado esta planta.

En este apartado, es conveniente señalar que en España existe una planta de torrefacción de biomasa perteneciente al Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) y localizada en Navarra con una producción de 500 kg/h. La construcción de esta planta se realizó para realizar estudios sobre el proceso. Esta planta se ha utilizado como modelo para algunas partes de la realización de este proyecto.

La biomasa utilizada en el proceso se obtiene a partir de restos de la industria maderera, por lo tanto la planta debe estar localizada en una zona donde las industrias de la madera sean abundantes. El lugar de España con mayor número de aserraderos es Barcelona. Por tanto, para que la planta pueda estar suficientemente alimentada de materia prima, es conveniente la construcción de la misma en esa zona. Para alimentar suficientemente a la planta se necesitan 4776.7 kg/h de materia prima.

El tiempo de funcionamiento de la planta asciende 8000 h/año.

1.3 Estructuración

En este apartado se explica cómo está estructurado este documento.

- Capítulo 2: Memoria descriptiva y justificativa. En este capítulo se explica detalladamente el proceso, así como los equipos que están inmersos en él. También se explican las soluciones adoptadas y el por qué del uso de las mismas. El capítulo está dividido en apartados, en los que se explican individualmente cada proceso que tiene lugar en la planta, detallando el diseño los equipos pertenecientes a cada uno. Cada apartado se refiere a un proceso. Estos son: almacenamiento de materia prima, secado, almacenamiento de la biomasa seca, transporte de la biomasa, torrefacción, oxidación térmica, refrigeración, peletización y almacenamiento de producto final.
- Capítulo 3. Memoria de cálculo. En este capítulo se detallan todos los cálculos realizados para el diseño de la planta. Para ello, se calculan los parámetros más relevantes de cada equipo a partir de datos obtenidos en catálogos o publicaciones. Este capítulo se divide en dos apartados: producción de la planta y dimensionamiento de equipos. En el apartado "Producción de la planta" se calcula, como su propio nombre indica, las toneladas por año que es capaz de producir la planta. El apartado "Dimensionamiento de equipos" está dividido en subapartados los cuales representan, al igual que en el apartado anterior, un proceso cada

uno. Estos subapartados son los mismos que los apartados del capítulo anterior pero se colocan en orden inverso, por el hecho de comenzar a realizar los cálculos a partir de la producción de la planta.

- Capítulo 4: Mediciones y presupuesto. Este capítulo recoge los datos más importantes calculados para cada equipo, el material necesario para su construcción y el coste de cada equipo del proceso, así como los costes del movimiento de tierras, la cimentación y la construcción de edificios para oficinas y sala de control. También se realiza un cuadro resumen del presupuesto de la planta indicando por cada equipo coste unitario, unidades utilizadas y coste total. El capítulo se divide en cinco apartados: movimiento de tierras, cimentación, edificios, equipos de proceso y resumen del presupuesto. El apartado “Equipos de proceso” está a su vez dividido en subapartados, que vuelven a ser los mismos que en los capítulos anteriores, uno por cada parte del proceso.
- Capítulo 5: Conclusiones. En este capítulo se explican las conclusiones obtenidas sobre el proyecto. Se realiza un resumen de la metodología seguida en el proyecto y se analizan los datos más llamativos. Finalmente, el autor da brevemente su opinión sobre el proyecto.
- Anexo I: Planos y diagramas. En este anexo se adjuntan los planos realizados para aclarar la descripción y la explicación del proceso. Se incluyen un diagrama explicativo del proceso, un diagrama de flujo y un diagrama P&ID.
- Anexo II: Hojas de especificaciones. En este anexo aparecen las hojas de especificaciones de los equipos más importantes utilizados en el proceso.
- Anexo III: Catálogos. En este anexo se adjuntan los catálogos utilizados para seleccionar algunos de los equipos del proceso.

2 MEMORIA DESCRIPTIVA Y JUSTIFICATIVA

En este capítulo se va a proceder a describir y justificar el diseño de los equipos de los que se va a componer la planta. En primer lugar, se hará una visión general del proceso y posteriormente se analizará cada equipo por separado.

La biomasa utilizada para el proceso estará compuesta de astillas y restos de madera procedentes de la industria maderera, aprovechando así el subproducto de este tipo de industria. Las características de las astillas de madera pueden observarse en la figura 2-1.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES		
<i>Varios orígenes distribuidos en todo el territorio nacional</i>	PODER CALORÍFICO	
	PCI (en base seca)	18,9 MJ/kg ^a
	PCI (30%)	12,5 MJ/kg
	ANÁLISIS BÁSICO	
	Cenizas (%)	6 ^b
	Humedad (%)	40 ^c
	Volátiles (%)	< 75
	ANÁLISIS ELEMENTAL (en base seca)	
	Cloro (%)	0,01-0,05
	Azufre (%)	0,05-0,1
	Hidrógeno (%)	5-7
	Nitrógeno (%)	0,5-1
	Carbono (%)	40-50
	DENSIDAD (Kg/m³)	200 – 350
	GRANULOMETRÍA (mm) : 30, 50	
	^a Valor estable que depende matemáticamente del contenido de humedad. ^b Valor promedio anual 6%, valores extremos 3-10%. ^c Valor promedio anual 33%, valores extremos 20 – 45% en base húmeda	

Figura 2-1. Características principales de los restos de madera (Fuente: *factorverde*)

En la figura 2-2 se representa la relación entre la humedad y la densidad aparente de dos tipos de maderas con dos tipos de granulometría. Para realizar el diseño de la planta se escogerá un valor medio en cada caso.

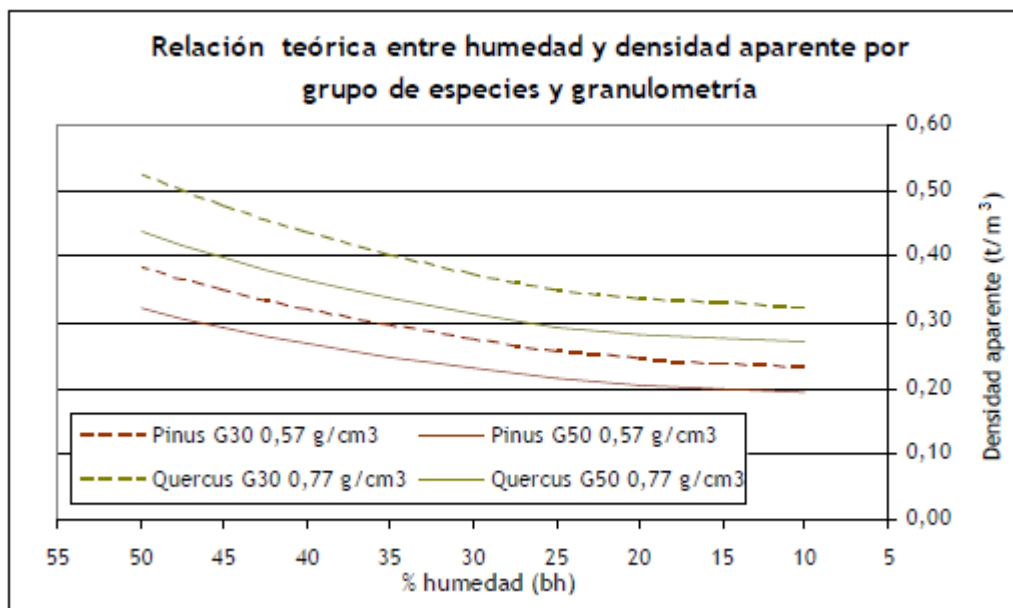


Figura 2-2. Relación entre humedad y densidad aparente (Fuente: *Centre Tecnologic Forestal de Catalunya*)

A continuación, se realiza una visión general del proceso que tiene lugar en la planta. En la figura 2-3 se puede observar un diagrama de bloques del mismo.

La planta tiene una capacidad de producción de 26750 t/año, lo suficiente para alimentar a una central térmica que produce 20MW. La planta funciona durante 8000 h/año.

La biomasa procedente de la industria de la madera se almacena en la planta bajo cubierta y con ventilación entre montones, pues los restos de madera húmedos desprenden calor en su fermentación y puede ser peligroso. Para ello se dispondrá de una superficie en la planta acondicionada para ello.

A continuación la biomasa pasa a una cinta transportadora que hace a su vez de secadora. El sólido se pone en contacto con aire conforme va avanzando por la cinta. El aire se precalienta previamente en un intercambiador de calor con agua de proceso y se lleva a la temperatura necesaria para el secado en una camisa de refrigeración del reactor de torrefacción aprovechando el calor que se desprende en este proceso. Mediante el secado se consigue reducir la humedad de la madera mejorando así la eficiencia del proceso de torrefacción posterior.

Las astillas de madera secas se almacenan en silos construido de acero inoxidable para evitar la formación de óxidos que provoquen la contaminación de la madera.

A continuación, se alimenta desde el silo a un tornillo sin fin que lleva la biomasa hasta el reactor de torrefacción.

En el reactor es donde se produce el proceso de torrefacción. El reactor consiste en un trommel que gira a medida que va avanzando la biomasa a lo largo de su longitud. Se deben alcanzar temperaturas de entre 200°C y 300°C, por lo que es necesario calentar el interior del reactor. Para ello, se introduce una corriente caliente de gas inerte en el interior del reactor que sirve también para crear una atmósfera sin oxígeno, para que no se produzca la oxidación de la biomasa. A la salida del reactor se obtiene la biomasa torrefacta, CO₂, CO, agua y algunos componentes volátiles orgánicos que son arrastrados por el flujo de gas introducido. Parte de la corriente de gases producida se recircula al interior del reactor y constituye ese caudal de gas caliente que crea la atmósfera inerte. La parte restante se purga, para que no se acumule el gas en el sistema, y se lleva a un oxidador térmico donde se quema para eliminar los compuestos orgánicos volátiles y tras ello, se envía a la atmósfera por la chimenea.

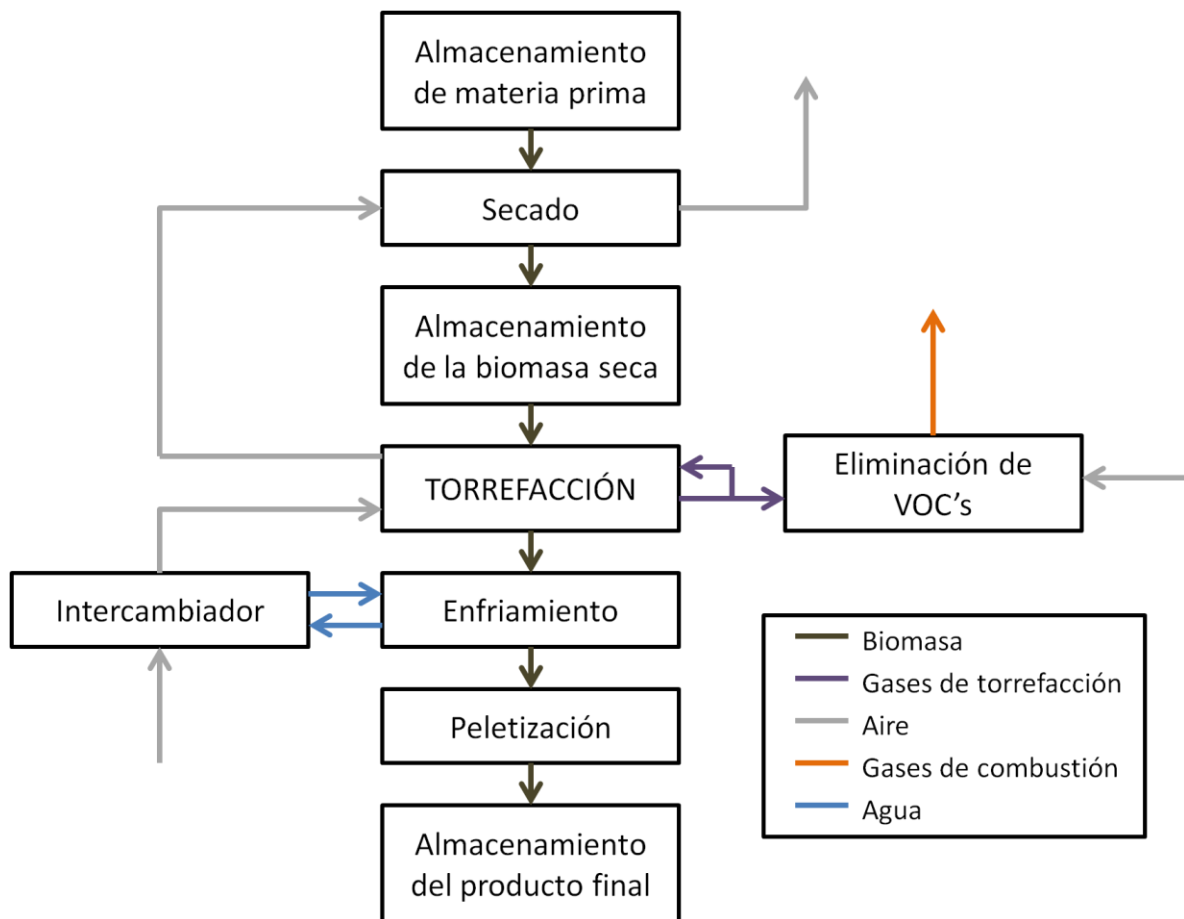


Figura 2-3. Diagrama de bloques del proceso

La biomasa torrefacta y a alta temperatura se enfría hasta una temperatura menor de 100°C en un tornillo sin fin refrigerado con agua a 30°C. Este agua se calienta hasta 95°C y se refrigera de nuevo hasta 30°C en un intercambiador, aprovechando su calor para precalentar el aire del secado.

Finalmente, se dispone de una peletizadora, que produce pelets a partir de la biomasa torrefactada, obteniéndose así el producto final, que se almacena a granel bajo cubierta.

A continuación se va a proceder a explicar cada uno de los equipos y procesos que tienen lugar en la planta.

2.1 Almacenamiento de materia prima

El almacenamiento de la materia prima se realizará bajo cubierta. Para ello se dispondrá de un área condicionada para tal fin, en la que se depositarán los restos de madera en montones, y de una cubierta que tamará a los mismos protegiéndolos así de las inclemencias meteorológicas. Los montones tendrán 2.5 m de altura y una longitud de 61.15 m. Se dispondrá de 7 montones con forma de prisma triangular colocado horizontalmente. Además deben existir canales de ventilación entre los montones, pues el almacenamiento de restos de madera puede ser peligroso debido al calor producido por su fermentación, pudiéndose llegar a alcanzar los 53°C de temperatura en montones de 2.5 m de altura. Para ello se establecen pasillos entre cada montón de 1.5 m de ancho.

El área acotada para el almacenamiento de la madera en la planta consiste en un rectángulo de 3750 m², de manera que pueda abastecerse a la misma durante una semana para la producción deseada de biomasa torrefactada. La altura de la cubierta debe ser de 8 m de manera que puedan entrar y salir máquinas y camiones en la superficie de almacenamiento.

La superficie debe permanecer totalmente limpia, con suelo de hormigón. Los camiones descargan la biomasa en la misma superficie gracias a un volquete de manera que queda agrupada en los

montones. Los camiones, capaces de transportar entre 12 y 20 toneladas por hora, llegan a la planta con una frecuencia de 6 camiones al día.

La cubierta será un tejado a dos aguas, con estructura metálica y techo de chapa recubierto en su interior con un aislante térmico, en este caso lana mineral de vidrio, para evitar que aumente la temperatura en el interior de la zona de almacenamiento.

La lana de vidrio es un material de origen natural, mineral e inorgánico con gran resistencia a la humedad. No retiene el agua y tiene una gran capacidad como aislante térmico y acústico. Además, aporta una total garantía de seguridad frente al fuego.

La inspección del producto almacenado y la limpieza de los almacenes deben ser efectuadas regularmente, pues esto ayudará a la disminución de las pérdidas de materia prima y de la contaminación en la misma.

2.2 Secado

Las astillas y restos de madera procedentes de la industria contienen un alto grado de humedad por lo que es conveniente someterlo a un tratamiento, en este caso un secado de banda, para reducir su contenido en humedad. De esta manera se aumenta la eficiencia de la torrefacción, consiguiéndose un producto de mejor calidad.

La biomasa de entrada posee una humedad del 30% y se necesita reducirlo hasta el 10%. Para ello, la materia prima depositada en el área de almacenamiento bajo cubierta se extrae de la misma en una cinta transportadora en la que se va a proceder al secado de la biomasa.

En la figura 2-5 se observa un esquema del funcionamiento de la secadora.

El secado se realiza con aire caliente. Para obtenerlo, el aire de la atmósfera se introduce en un intercambiador de calor mediante una soplante, donde se va a precalentar hasta unos 83°C con ayuda de agua de proceso, calentada en otra parte de la planta y refrigerada aquí para volver a utilizarla, reduciendo así el consumo energético de la planta. Seguidamente, esta corriente de aire se hace pasar por una camisa de refrigeración que rodea al reactor de torrefacción para alcanzar la temperatura óptima para el secado que es de 120°C. La capacidad de la soplante se ajusta mediante un convertidor de frecuencia de acuerdo a la energía disponible en el intercambiador y en el torrefactor.

Al trabajar con bajas temperaturas las emisiones de compuestos orgánicos volátiles son despreciables y es posible mantener el contenido de lignina en el producto.

Para el secado se distribuye el sólido húmedo uniformemente sobre la cinta transportadora mediante una rosca de alimentación. Una rosca es una especie de tornillo sinfín que distribuye el sólido uniformemente en la banda. En la figura 2-4 se observa con más detalle. La banda transporta la capa de producto a lo largo del túnel de secado hasta la primera rosca de descarga. Mediante otra rosca transportadora, el sólido se recircula hasta la segunda rosca de alimentación, que lo deposita de nuevo en la banda, formándose una segunda capa de producto. Tras pasar por segunda vez por el túnel de secado, la biomasa se extrae del sistema mediante la segunda rosca de descarga.

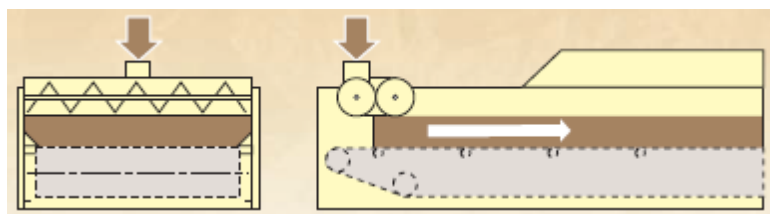


Figura 2-4. Vistas de la rosca de alimentación de la secadora

Trabajando con este sistema de doble capa de producto se consigue una máxima saturación del aire de secado y, consecuentemente, una máxima eficiencia energética.

A la salida de la camisa del torrefactor se mide la temperatura del aire con un termopar y se controla

la misma variando el caudal de aire introducido.

En la tabla 2-1 se resumen las dimensiones y características de la cinta secadora. La marca de la secadora seleccionada es “KAHL”. La secadora seleccionada está dividida en 4 secciones. De las dos opciones disponibles se ha escogido ésta por ser la que menor espacio va a ocupar en la planta, ya que aunque es más ancha el número de secciones que es necesario utilizar es menor.

Con un humidímetro o medidor de humedad, se mide la humedad de la biomasa seca al final del proceso y se controla manualmente la velocidad de avance de la banda transportadora en función de la humedad a la salida. La capacidad de secado, y por tanto el paso del producto a través de la banda, depende de la energía disponible.

Para asegurar una óptima operación del sistema, la banda se limpia continuamente con un cepillo rotativo y un sistema intermitente de alta presión que se activa automáticamente.

Se ha escogido este tipo de secado porque se trata de un secado limpio, con bajas emisiones a la atmósfera, menores de $15\text{mg}/\text{Nm}^3$. Además usa energía residual a baja temperatura, lo cual hace que se pueda reducir el consumo energético de la planta aprovechando la energía producida en cualquier otro equipo de la misma; permite una operación automática y minimiza el riesgo de incendio. A todo esto hay que añadirle que al tratarse de un secado indirecto el aire de secado es aire limpio y no se introducen partículas del exterior y que, además, se trabaja a baja temperatura, por lo que la calidad de la biomasa y sus propiedades permanecen intactas.

Anchura de la cinta	6 m
Anchura total	6.5 m
Longitud de la cinta	11.52 m
Longitud total	15 m
Nº de secciones	4
Longitud de una sección	2.88 m
Altura de capa máx.	300 mm
Altura total	3.5m

Tabla 2-1. Dimensiones de la secadora de banda

Para introducir el aire en la secadora se utiliza una soplante. El caudal de aire a procesar por la soplante es de $14890.9\text{ m}^3/\text{h}$. De catálogos, se ha seleccionado el modelo ZM-143 de la marca “Atlas Copco” capaz de procesar el caudal deseado y consumiendo una potencia de 299 kW. Se ha escogido este modelo porque de todos los posibles es el que menos potencia consume.

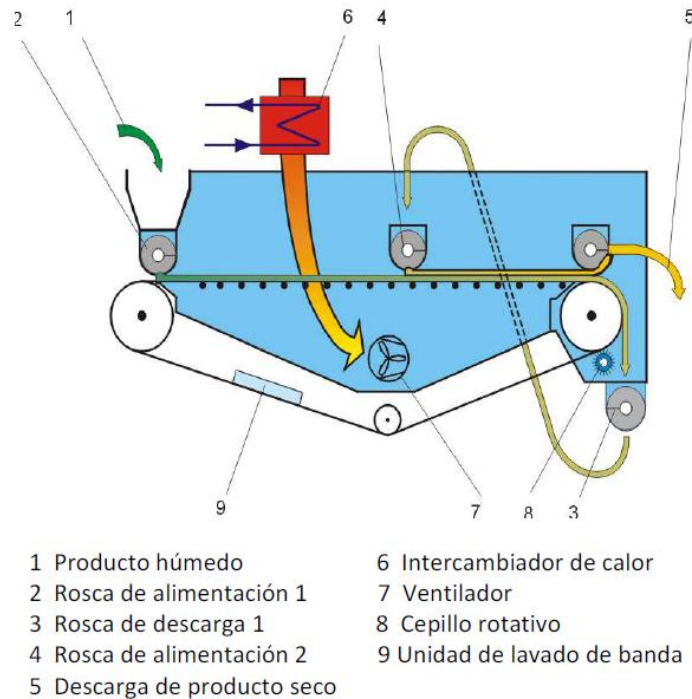


Figura 2-5. Secado de banda.

2.3 Almacenamiento de la biomasa seca

Una vez seca, es necesario almacenar la biomasa antes de alimentar al reactor para la torrefacción. Para almacenar las astillas y restos de madera secos se utilizarán silos, que se alimentarán desde la secadora mediante transporte neumático. El hecho de transportar los sólidos por un sistema de transporte neumático se ha seleccionado por su flexibilidad, sus pocas exigencias de mantenimiento y su facilidad de instalación.

Se dispone de seis silos idénticos, de aproximadamente 535 m³ cada uno, para almacenar una cantidad de biomasa que asegure que la planta siga funcionando en caso de avería de la secadora o parada por mantenimiento de la misma. Los silos proporcionan una autonomía de una semana. Los silos poseen forma cilíndrica, con una altura de 25 m y un diámetro de 5.2 m. El material de construcción empleado es acero inoxidable, para evitar la contaminación de la biomasa. Concretamente se usa el AISI 321 para la construcción del silo y el AISI 409, que es un acero estructural de uso general y utilizado en aplicaciones que no requieren alta calidad de apariencia, para la estructura.

Los silos están compuestos por una parte superior en la que se encuentra la cámara de filtración y una parte inferior que tiene la función de contenedor. En la parte superior se encuentra instalada una placa de acero con contraplaca en la que se encuentran las mangas en tejido que constituyen la superficie filtrante. Esta superficie garantiza una óptima filtración y permite volver a emitir limpio el aire del sistema de transporte neumático al ambiente. La limpieza de las mangas se realiza por sacudida de las mismas a través de medios motovibradores.

El silo está fijado al terreno gracias a un perfilado en HBE situado en la base, utilizado para trabajar a compresión. Está compuesto por una cobertura con barandilla, una puerta de acceso a la cámara de filtración y el depósito de sólido, compuertas antiexplosión, cristales de plexiglass para los controles de nivel, una escala externa con protecciones y las predisposiciones para la admisión y expulsión de aire.

Cinco de los silos están conectados mediante un sistema de transporte neumático al silo restante, que es el silo de alimentación al reactor. De este silo es del que se extrae la biomasa para alimentar al

reactor.

La fase de extracción de la biomasa seca acumulada en el interior del silo de alimentación al reactor se produce gracias a un extractor compuesto por dos ballestas que tienen la función de mover el sólido, un tornillo sinfín fijado al pavimento del silo, que es el que se encarga de conducir la biomasa hasta el reactor de torrefacción, y una válvula rotativa colocada en el exterior de la cámara de ensilado. El extractor tiene la función de deshacer las bóvedas de sólido que se pueden crear en el interior del silo mientras éste se llena.

La válvula rotativa tiene la función de recibir el material y distribuirlo al tornillo sin fin conectado al sistema de alimentación al reactor, haciendo hermético cada pasaje de aire entre el silo y el reactor.

Para transportar el sólido desde los silos hasta el torrefactor se usará un tornillo sinfín que tiene una longitud de 9.08 m y una inclinación de 15°, consumiendo una potencia de 434 kW.

2.4 Torrefacción

Es el punto central del proceso, donde se va a realizar el tratamiento adecuado a la biomasa para conseguir que ésta tenga unas mejores propiedades. Para ello se dispone de un reactor rotatorio tipo trommel en el que se introducirá la biomasa además de un caudal de gases calientes sin contenido de oxígeno, debido a que es necesario aumentar la temperatura en el interior del reactor y el proceso de torrefacción debe producirse en ausencia de oxígeno. Por ello se introduce este gas, que se encarga de crear una atmósfera inerte y caliente en el interior del reactor. En este caso, la corriente de gas utilizada en el proceso procede de la recirculación de una parte de los gases que salen del torrefactor. Esta corriente contiene CO₂, CO, H₂O y varios componentes orgánicos volátiles y se encuentra a 280°C. La otra parte de esta corriente se purga, para que no se acumule, y se quema en el oxidador térmico para su emisión a la atmósfera por la chimenea.

La alimentación de biomasa al reactor se produce por un extremo, y conforme va avanzando a lo largo del mismo la biomasa se va calentando hasta alcanzar la temperatura de 280°C, perdiendo humedad y compuestos volátiles, quemados posteriormente en el oxidador térmico. El tiempo de residencia de la biomasa en el reactor es de 3h.

El calentamiento se produce de manera directa a través de la introducción de una parte de la corriente de salida de los gases de torrefacción. Además, se conoce que la reacción de torrefacción con un tiempo de residencia de 3h y a una temperatura de 280°C es exotérmica, con una entalpía de reacción de 600 kJ/kg (*Technische Universiteit Eindhoven, 2005*). La corriente de gases se introduce en isocorrente. De esta manera el sólido a la entrada, a menor temperatura, es calentado por el gas a mayor temperatura. Y conforme van avanzando a lo largo del reactor el sólido se va calentando. Para controlar la temperatura en el interior se dispone de una serie de termopares situados en distintos puntos a lo largo del cilindro que constituye el reactor y, en función de la temperatura que registren éstos, se varía el caudal de gases de recirculación al reactor. El valor de la temperatura en el interior del sólido no debe superar los 300°C, pues de ser así se produciría la pirolisis de la biomasa. A la salida la temperatura de la biomasa torrefactada debe ser 280°C.

En la figura 2-6 se puede ver un esquema del torrefactor y las corrientes involucradas en el proceso de la torrefacción.

El reactor consiste en un cilindro que gira sobre su propio eje de 13.51 m de longitud y 3 m de diámetro, constituyendo un volumen de 95.523 m³, y está construido de acero inoxidable para evitar la formación de óxidos en su interior que puedan contaminar el producto final. El acero inoxidable utilizado es el AISI 310, que posee alta resistencia mecánica, tenacidad y excelente resistencia a la oxidación a temperaturas muy altas y, además, a diferencia del AISI 309, es refractario.

El reactor se encuentra con una inclinación de 10°, situándose la parte de la entrada de la biomasa a una altura superior que la parte de descarga, para facilitar de esta manera el movimiento del flujo del sólido. Para favorecer el volteo de la biomasa en el interior del reactor las paredes poseen por su cara

interna unos pequeños cilindros salientes o púas que ayudan a agarrar al sólido a las paredes.

El proceso de torrefacción es exotérmico y se libera calor en el mismo. Por ello, se rodea el cilindro que constituye el torrefactor de una camisa de refrigeración, que es atravesada por aire, y en la que se calienta éste hasta 120°C para utilizarlo en el secado de la biomasa. Este aire ha sido precalentado previamente en un intercambiador. La camisa de refrigeración se encuentra fija, sin tocar las paredes del reactor pero muy cercana a ellas. En la figura 2-7 se puede ver un croquis aproximado del torrefactor.

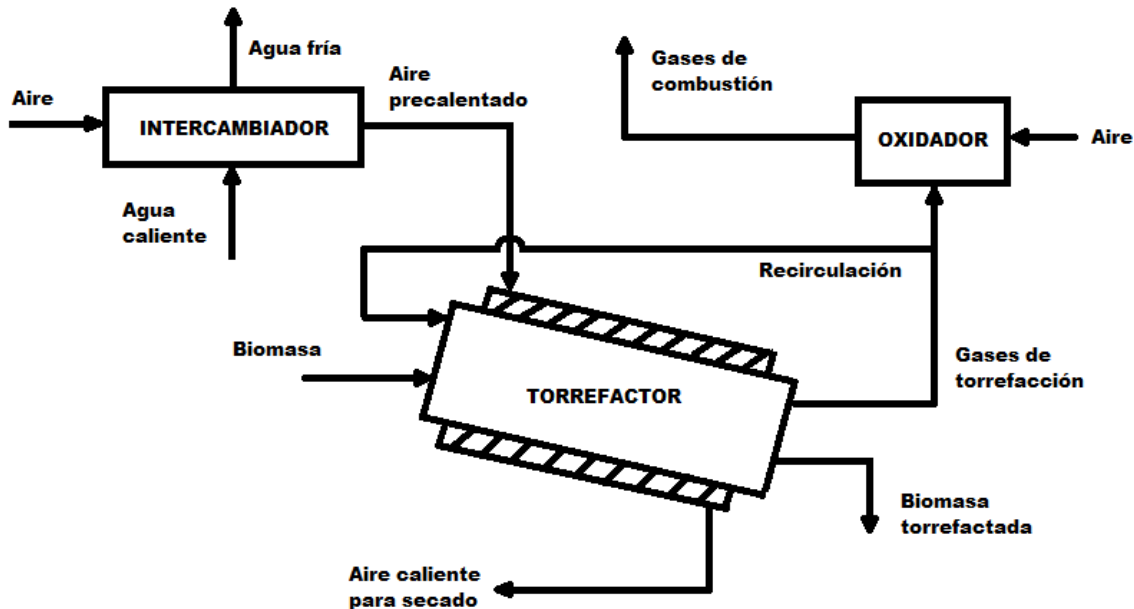


Figura 2-6. Esquema del torrefactor y las corrientes involucradas en el proceso de torrefacción en régimen permanente

A la entrada y a la salida de la biomasa se dispone de una esclusa para evitar la entrada de aire en el interior del reactor.

Además, el torrefactor cuenta con un motor reductor para conseguir la velocidad de giro deseada, que se estima en unas 5 rpm.

Para su mantenimiento y control, el torrefactor está dotado también de una puerta de acceso al interior del equipo, ventanas de inspección y, según la normativa, debe incluir también una escalera de acceso y una pasarela de mantenimiento. El interior del equipo está dotado de iluminación para facilitar la limpieza y el mantenimiento.

Para el caudal de recirculación de gases se utiliza una soplante que sea capaz de procesar 998.82 m³/h. Para ello, se ha seleccionado el modelo ZM 61 de la marca "Atlas Copco", que procesando ese caudal consume una potencia de 21.13 kW. El criterio de selección ha sido el menor consumo de potencia entre todas las posibilidades.

Para el arranque de la planta, hay que calentar el torrefactor para que se produzca la torrefacción. Esto se consigue introduciendo en el mismo una parte de los gases de combustión producidos en el oxidador térmico, con precaución de que la temperatura de la biomasa no supere los 300°C en el interior, hasta alcanzar el régimen permanente. Los gases de combustión son producidos en el arranque de la planta utilizando gas natural como combustible y con un mínimo exceso de aire, de manera que la atmósfera en el interior del reactor sea inerte.

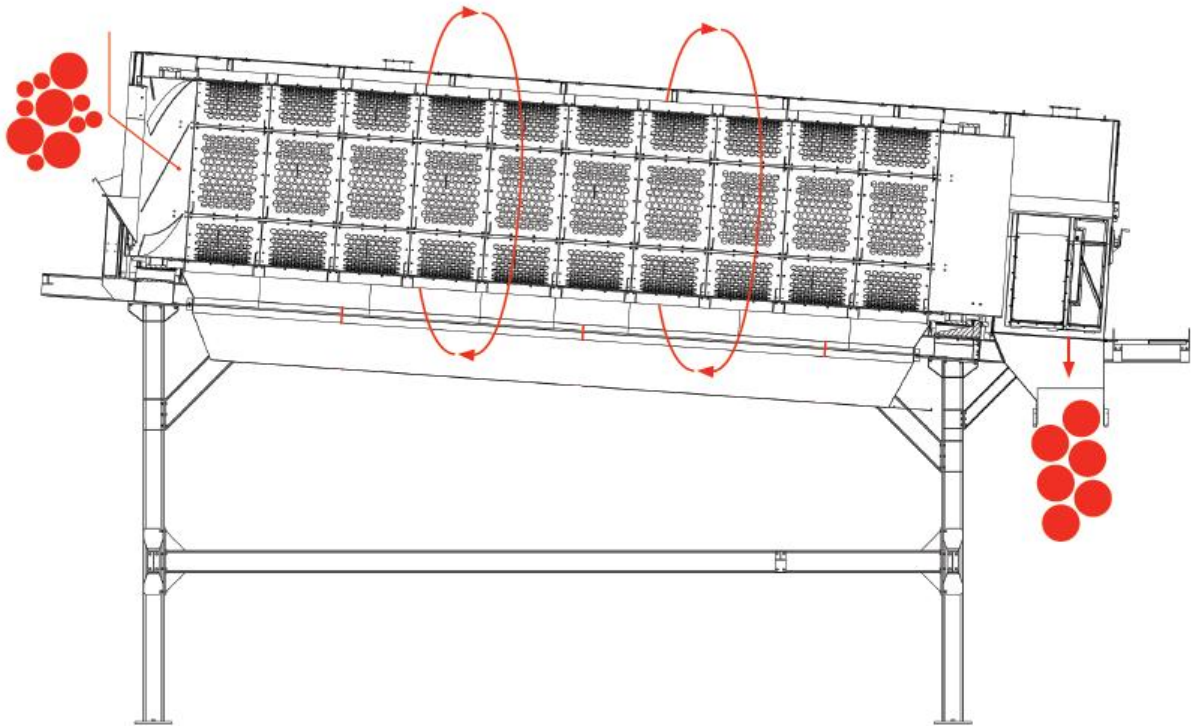


Figura 2-7. Croquis del torrefactor (Fuente: *MASIAS RECYCLING*)

2.5 Oxidación térmica

Uno de los productos de la torrefacción son los compuestos orgánicos volátiles formados durante el proceso, que son arrastrados por la corriente de gas inerte que se introduce en el reactor. Esta corriente, rica en compuestos orgánicos volátiles, provoca la contaminación atmosférica, por lo que estos componentes deben ser eliminados antes de emitirse a la atmósfera. La corriente de gases de torrefacción que sale del torrefactor se divide en dos. Una parte se recircula al interior del mismo y la otra se quema en un oxidador térmico para la eliminación de estos compuestos.

El oxidador térmico es un sistema diseñado para tratar residuos químicos a través de un proceso controlado de oxidación que genera un producto final que puede ser emitido a la atmósfera sin provocar un efecto dañino para el medio ambiente.

Las principales ventajas de este tipo de equipos son:

- Las emisiones a la atmósfera suelen ser constantes y limpias.
- Presenta gran facilidad de operación.
- Los tiempos de montaje son reducidos.
- Se puede recuperar energía y así reducir el consumo de la planta.
- Presenta gran fiabilidad ante la presencia de polvo o líquidos y ante los cambios de concentración de contaminante.

El oxidador térmico consiste en una cámara de combustión, donde se introduce aire y la corriente de gas a tratar, y donde se produce la oxidación a temperaturas de entre 700°C y 1200°C, con unos tiempos de residencia de entre 0.6 y 2 segundos.

El oxidador térmico es un cilindro de 1.77 m de diámetro y 8 m de longitud. El exterior del mismo es de acero inoxidable de la serie AISI 310, usados a altas temperaturas, y las paredes interiores de la cámara de combustión están construidas de un material refractario.

El quemador utilizado en la cámara de combustión es de mezcla previa. Para ello se utiliza un

mezclador de inducción atmosférica o quemador atmosférico, ya que el aire entra a presión atmosférica. El gas es el fluido inductor que aspira el aire ambiente. En la figura 2-8 se puede observar un esquema del mismo.

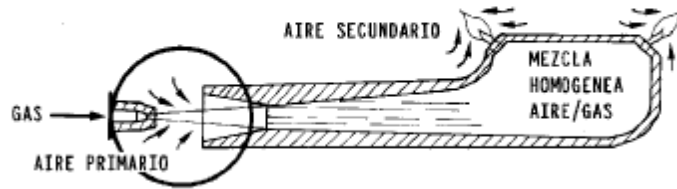


Figura 2-8. Mezclador de inducción atmosférica. (Fuente: *Dep. Ingeniería energética y fluidomécnica, ETS Ingenieros Industriales, Universidad de Valladolid*)

El principio de funcionamiento del quemador es la inducción y el efecto Venturi, como se puede observar en la figura 2-9. Es el quemador más simple y barato. No puede trabajar con cámaras sobrepresionadas (el oxidador térmico no lo está). Se compone de tres partes: el inyector, que es el accesorio más delicado del quemador y se encarga de inyectar el gas a través de un orificio; la cámara de mezcla, que es el elemento encargado de realizar la mezcla entre el aire primario y el gas; y la cabeza del quemador, que es donde se produce la llama, utilizándose en éste caso un quemador de corona (Figura 2-9).

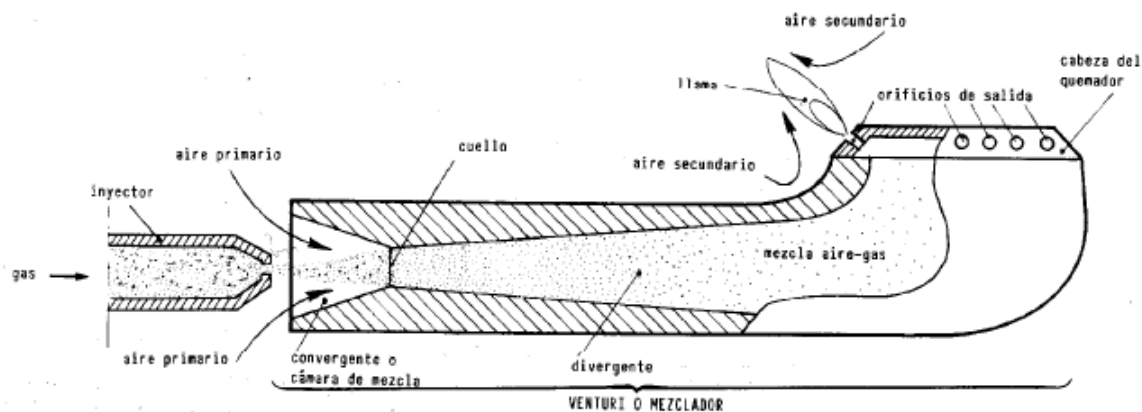


Figura 2-9. Principio de funcionamiento del quemador de corona por inducción atmosférica. (Fuente: *Dep. Ingeniería energética y fluidomécnica, ETS Ingenieros Industriales, Universidad de Valladolid*)

Las características de este tipo de quemador son:

- Sencillez de construcción.
- Utiliza sólo la presión del gas.
- Precio de compra bajo.
- Presión de mezcla baja.
- Sensibilidad a las contrapresiones de la cámara de combustión.
- No necesita energía auxiliar.

Para introducir el aire en el oxidador se utiliza una soplante que sea capaz de procesar el caudal necesario para producir la combustión completa y que los productos de la combustión salgan a 900°C. Para ello, es necesario introducir un 153.6% de exceso de aire, por lo que el caudal introducido es de 7755 m³/h. Cabe destacar, que la única función del oxidador es eliminar por completo todos los componentes orgánicos volátiles producidos en la torrefacción, por lo que da

igual que el exceso de aire intrducido sea muy elevado.

Para introducir el aire se usa una soplante del modelo ZM 126 del fabricante “Atlas Copco”, que procesando el caudal deseado consume una potencia de 173.81 kW. El criterio de selección ha sido la menor potencia consumida.

Para llevar los gases de combustión hasta la chimenea también es necesario utilizar una soplante. El caudal a procesar es de 35585.7 m³/h. Para ello, se utiliza una soplante del modelo ZM187 de la marca “Atlas Copco”, consumiendo una potencia para ese caudal de 1242.07 kW. De todas las posibles, se ha escogido la solución que consume menor potencia.

2.6 Refrigeración

Después del proceso de torrefacción, la biomasa se encuentra a una alta temperatura, unos 280 °C, por lo que se debe enfriar para proceder a la peletización y manipulación como producto. La temperatura para ello debe ser inferior a los 100°C.

Para lograrlo se utilizan dos tornillos sinfín conectados en serie que tienen dos funciones: llevar el producto torrefactado a la peletizadora y enfriar el producto a lo largo de la carrera de los tornillos.

Para enfriar el producto, se refrigeran las paredes del tornillo con agua, que procede del intercambiador de calor, donde se ha enfriado hasta 30°C. Para aprovechar al máximo la energía contenida en el agua y utilizar así un caudal menor, ésta se calienta hasta 95°C.

Se usarán 2 tornillos en serie del modelo UPK-C 600 de la marca ETIA para conseguir disminuir la temperatura hasta menos de 100°C. La longitud de cada tornillo es de 9 m, y están colocados en serie, permiten transportar la biomasa torrefacta hasta la peletizadora, virtiendola en la tolva de alimentación de la misma. El material de construcción de los tornillos es acero inoxidable 316, para no contaminar el producto.

Cada tornillo consume una potencia de 204.9 kW, por lo que la potencia total consumida en esta área de la planta será de 409.8 kW.

El área de intercambio para cada tornillo es de 27.20 m² y el coeficiente de transferencia de calor es de 50 W/m²°C.

La temperatura de salida de la biomasa es de aproximadamente 90°C. Con un termopar se mide esta temperatura y se controla mediante la variación del caudal de agua introducido en los tornillos. Esta temperatura debe estar siempre por debajo de los 100°C.

En su interior el tornillo posee unas paletas que favorecen el intercambio y facilitan el flujo.

En la figura 2-10 se representa la sección de paso de este tornillo donde se puede observar el funcionamiento del mismo.

Las ventajas de este tipo de tornillo son:

- Enfriamiento rápido
- Limpieza fácil.
- Tratamiento homogéneo y de mezcla perfecta garantizados por las paletas.

La velocidad del tornillo se controla en función del grado de enfriamiento del material y del caudal de alimentación a la peletizadora.

Es conveniente señalar que el agua utilizada para el enfriamiento en el tornillo y para el precalentamiento del aire de secado se va deteriorando con el tiempo, por lo que hay que realizar un continuo aporte de agua, a la vez que se va purgando. Los caudales de aporte y de purga deben ser los mismos. Esto se consigue con un lazo de control. A partir de la medida del caudal de purga, se controla el caudal de aporte de agua.

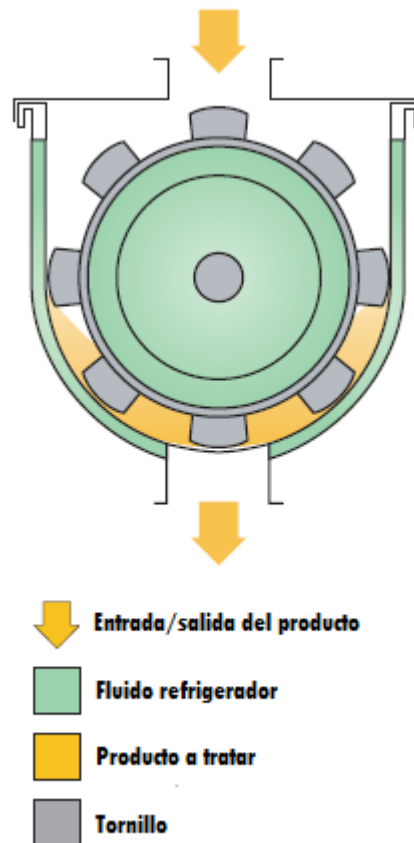


Figura 2-10. Corte de la sección del tornillo sinfín refrigerador (Fuente: ETiA)

El circuito de agua consta de una bomba que impulsa el agua desde el intercambiador al tornillo, y otra que hace lo propio a la inversa. El caudal de agua necesario para enfriar la biomasa y calentar el aire hasta las temperaturas deseadas es de 3528 kg/h, lo que supone que la bomba procesa 3.53 m³/h. Para ello se utilizarán dos bombas centrífugas, una la salida de cada equipo del circuito, de acero inoxidable de la “Serie Ultra” del modelo U3-100/5T del fabricante “Salvador Escoda S.A.”, capaz de procesar un caudal de hasta 3.6 m³/h, consiguiendo una altura de hasta 25 m.c.a. y consumiendo una potencia de 0.74 kW. Están construidas de acero inoxidable AISI 304.

El intercambiador para enfriar el agua y precalentar el aire será un intercambiador de carcasa y tubos, con el agua circulando por el interior de los tubos, que posee un área de intercambio de 223.47 m².

2.7 Peletización

A continuación se procede a la peletización del serrín torrefactado. Con la peletización se produce la densificación de la biomasa hasta los 800 kg/m³ y se consiguen, de esta manera, mejores propiedades de la biomasa para su uso como combustible, como puede ser una mayor densidad energética. Para la peletización de la biomasa se utilizan dos peletizadoras de matriz anular. El motivo de utilizar dos peletizadoras de este tipo es que no pueden procesar un caudal mayor de 2000 kg/h.

El sólido llega a través del tornillo sinfín a la tolva de alimentación de la peletizadora y entra en una matriz cilíndrica montada verticalmente y provista de orificios por los que sale el serrín torrefactado presionado por un rodillo. Una cuchilla se encarga de cortar los pellets. De esta manera, se obtienen los pellets de biomasa torrefacta. En la Figura 2-11 se puede observar el funcionamiento de una peletizadora de matriz anular.

La peletización se realiza en seco, ya que mediante este método no es necesario ningún fluido para mejorar la circulación del sólido.

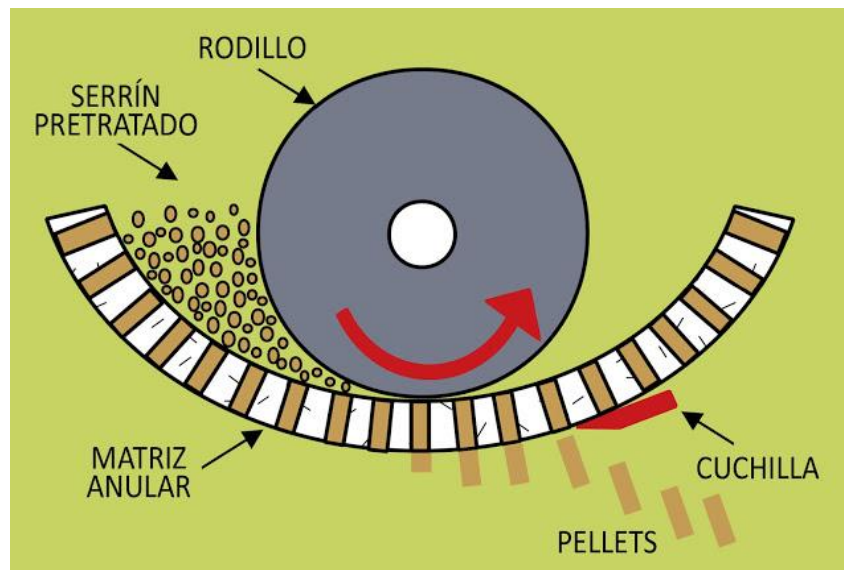


Figura 2-11. Funcionamiento de la peletizadora de matriz anular.

Las ventajas de utilizar una peletizadora de matriz anular son que tiene una buena eficiencia energética debido a que el deslizamiento de rodillos durante el proceso de peletización produce una fricción adicional, que ayuda a mejorar la calidad de los pellets; y generan poco desgaste ya que el interior y el exterior del rodillo recorren la misma distancia.

El caudal a procesar por las peletizadoras es de 3343.3 kg/h. La peletizadoras utilizadas son del modelo KMPM508 de la marca KMEC. Tienen una capacidad para procesar entre 1500 y 2000 kg/h, por lo que se usarán dos de este tipo. La potencia consumida por cada una es de 136.5 kW. Sus dimensiones son 2990x1200x2410 mm y su peso es de 4500 kg.

2.8 Almacenamiento del producto final

Los pellets de biomasa torrefacta se almacenan a granel bajo cubierta para protegerlos de las inclemencias meteorológicas. La superficie debe tener las mismas características que la de almacenamiento de materia prima, con la única diferencia de que, en este caso, es necesaria una superficie menor. Aproximadamente unos 2000 m².

El producto final se almacena en 4 montones de 2.5 m de altura y 56.2 m de largo. Los montones tienen forma, al igual que en el almacenamiento de la materia prima, de prisma triangular colocado horizontalmente, y existe un pasillo entre cada montón de 1.5 m de ancho para seguridad, inspección y mantenimiento. De esta manera, se tiene almacenamiento de producto final para dos semanas.

La cubierta es metálica, con tejado de chapa recubierto con un aislante, que vuelve a ser lana de vidrio, para evitar las altas temperaturas en el interior de la nave. La altura de la misma debe ser 8 m para que puedan entrar máquinas y camiones.

La superficie está construida de hormigón, y debe permanecer totalmente limpia, para no contaminar el producto final.

Los pellets se almacenan en montones y los camiones, que transportan la biomasa torrefacta hasta la central de producción de energía, se cargan en la misma superficie. Como el camión es capaz de transportar de entre 12 a 20 toneladas a la hora, con 6 camiones al día es suficiente para alimentar a la central.

3 MEMORIA DE CÁLCULO

En este capítulo se procede a detallar los cálculos realizados para el diseño de la planta. En primer lugar se van a describir los cálculos realizados para fijar la producción de la planta y a continuación se detallan los cálculos para el dimensionamiento de los equipos.

El dimensionamiento de los equipos se va a realizar en orden inverso al que realiza la biomasa en el proceso, comenzando por el almacenamiento de producto final y terminando por el almacenamiento de la materia prima.

3.1 Producción de la planta

La planta se ha diseñado para alimentar una central térmica que produce 20 MW y se estima que trabaja durante 8000 h/año.

Los rendimientos másico y energético del proceso de torrefacción son del 70% y el 90%, respectivamente (*P.C.A. Bergman, 2005*). La definición de los rendimientos másico y energético es la siguiente:

$$\eta_m = \frac{m_{salida}}{m_{entrada}}$$
$$\eta_e = \eta_m \frac{PCI_{salida}}{PCI_{entrada}}$$

La biomasa de entrada en la planta posee un 30% de humedad y, tras el secado, su humedad se ve reducida al 10%. Por tanto, el PCI con el que llega la biomasa al torrefactor es el equivalente al del 10% de humedad. Este PCI inicial se puede estimar a partir de los datos de la figura 2-1, donde se proporciona el PCI para el 30% de humedad (12.5 MJ/kg) y el PCI en base seca (18.9 MJ/kg). Por tanto, suponiendo que este aumento es lineal, se estima que para un 10% de humedad el PCI tendrá un valor de 16.75 MJ/kg. A partir de este dato se obtiene la producción de la planta después de calcular el PCI a la salida de la torrefacción:

$$PCI_{salida} = \frac{0.9}{0.7} \times 16750 \frac{kJ}{kg} = 21535.7 \frac{kJ}{kg}$$
$$Producción = 20000 \frac{kJ}{s} \times \frac{1 kg}{21535.7 kJ} \times \frac{3600 s}{1 h} = 3343.3 \frac{kg}{h}$$

Suponiendo que la planta va a funcionar 8000 horas al año, queda que:

$$Producción = 3343.3 \frac{kg}{h} \times 8000 \frac{h}{año} = 26746400 \frac{kg}{año} \cong 26750 \frac{t}{año}$$

3.2 Dimensionamiento de los equipos

Como se ha explicado anteriormente, el dimensionamiento de los equipos se va a realizar en orden inverso al del proceso. Para cada equipo se calcularán los parámetros que se consideran necesarios para que estos queden lo suficientemente definidos.

3.2.1 Almacenamiento de producto final

El almacenamiento de producto final se realizará en montones de 2.5 m de altura. El ángulo de talud necesario para este tipo de producto es de 45°, por lo que, el ancho de cada montón, por trigonometría, resultará ser de 5 m. Se ha supuesto que cada montón tiene forma de prisma triangular colocado horizontalmente.

El volumen a almacenar se obtiene a partir de la producción de la planta, de la densidad del producto final y del tiempo que se estime que va a estar almacenado el producto. Así, sabiendo que la densidad de la biomasa torrefactada y peletizada es de 800 kg/m³ (*Bioenergy International España N° 4, 3er triemstre, 2009*) y que el almacenamiento se va a producir para 2 semanas se tiene que:

$$\text{Volumen a almacenar} = 3343.3 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{800 \text{ kg}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \times \frac{7 \text{ días}}{1 \text{ semana}} \times 2 \text{ semanas} = 1404.2 \text{ m}^3$$

Ahora se debe escoger el número de montones y la longitud de los mismos para saber la superficie necesaria para almacenar a granel el volumen requerido. La longitud total de montones se obtiene a partir del cociente entre el volumen total y la sección de cada montón. Aproximando por una sección triangular se obtiene que:

$$\text{Sección} = \frac{\text{Base} \times \text{Altura}}{2} = \frac{5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}}{2} = 6.25 \text{ m}^2$$

$$\text{Longitud total} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Sección}} = \frac{1404.2 \text{ m}^3}{6.25 \text{ m}^2} = 224.7 \text{ m}$$

Se decide que el número de montones es 4, por lo que la longitud de cada montón es 56.2 m.

Por tanto, con 4 montones de 5 m de ancho y 56.2 m de largo, son necesarios 1124 m² sólo para los montones. A esto hay que añadir, los espacios entre montones, que se suponen de 1.5 m de ancho, por lo que se necesitan 421.5 m² más, que sumados a lo anterior resultan 1545.5 m². Por tanto, aplicando un margen de seguridad del 30%, la superficie necesaria para el almacenamiento del producto final es de 2000 m².

3.2.2 Peletizadora

El único dato necesario para seleccionar la peletizadora es el caudal que procesa, y éste es el mismo que el caudal de producción de la planta. Por tanto, no es necesario realizar ningún cálculo para este equipo.

3.2.3 Tornillo sinfín refrigerador

En el tornillo sinfín refrigerador, se va a calcular la temperatura de salida de la biomasa, que tiene que ser menor que 100°C, y el caudal másico de agua necesaria para que esto ocurra.

El modelo de tornillo utilizado en el proceso, buscado en catálogos (marca *ETiA*), proporciona algunos datos para el cálculo como son la longitud de 9 m, el área de intercambio es de 27.2 m² y el coeficiente de transferencia de calor (U) es 50 W/m²°C.

Además se conoce que la temperatura de entrada de la biomasa es 280°C y que el caudal de la misma es 3343.3 kg/h. También se conocen los calores específicos de la biomasa y del agua, que son 1500 J/kg°C (*Renewable Fuel Technologies, INC., California, 2013*) y 4180 J/kg°C, respectivamente. El agua entra a 30°C, procedente de un intercambiador de calor donde se enfría aprovechándose su temperatura para precalentar la corriente de aire que se utiliza en la secadora para secar la biomasa, y

se quiere que salga a 95°C, para que absorba la mayor energía posible sin pasar a vapor, y así usar un caudal menor de la misma.

Así, se utilizan las siguientes ecuaciones para el cálculo en el tornillo:

$$Q = m_B \times C_{pB} \times (T_{EB} - T_{SB})$$

$$Q = m_W \times C_{pW} \times (T_{SW} - T_{EW})$$

$$Q = U \times A \times DTLM$$

El agua entra a contracorriente, por lo que la DTLM es:

$$DTLM = \frac{(T_{EB} - T_{SW}) - (T_{SB} - T_{EW})}{\ln\left(\frac{T_{EB} - T_{SW}}{T_{SB} - T_{EW}}\right)}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones queda que $T_{SB}=139.5^\circ\text{C}$ y $m_W=0.720$ kg/s.

Como la temperatura de la biomasa no es inferior a los 100°C, se debe añadir un nuevo tornillo, idéntico al anterior, en serie. En este caso, la temperatura de entrada de la biomasa será la temperatura de salida del primer tornillo.

Volviendo a resolver el sistema queda que $T_{SB}=89.2^\circ\text{C}$ y $m_W=0.26$ kg/s.

Por tanto, usando dos tornillos conectados en serie, la temperatura de salida de la biomasa torrefactada es inferior a 100°C.

El caudal de agua total utilizado para enfriar la biomasa se calcula sumando los caudales usados en cada tornillo, resultando un caudal total de agua de 0.98 kg/s, o lo que es lo mismo, 3528 kg/h. Este caudal de agua se usará posteriormente en el intercambiador de la secadora para calentar el aire.

Para llevar el agua hasta el intercambiador se utiliza una bomba centrífuga que procesa el caudal necesario. Los parámetros de esta bomba se han obtenido del catálogo.

Para calcular la potencia consumida de cada tornillo se utiliza la siguiente fórmula, teniendo en cuenta que estos tornillos no tienen ningún tipo de inclinación:

$$\text{Potencia (CV)} = \frac{Q_m \times L \times F}{270 \times \eta}$$

El caudal másico (Q_m) es 3343.3 kg/h, la longitud (L) de cada tornillo es de 9 m, el factor de fricción (F) para este tipo de material es 2.5 (*Dep. Ing. Química, ETSI Sevilla*) y el rendimiento (η) es 1, ya que no hay reducción de capacidad al no estar inclinados. Por tanto, metiendo los datos en la fórmula, se obtiene una potencia para cada tornillo de 278.6 CV, que equivalen a 204.9 kW. Al disponer de dos tornillos idénticos, la potencia consumida en esta área de la planta es 409.8 kW.

3.2.4 Torrefactor

Para realizar los cálculos del torrefactor, se realiza un balance de materia y energía sobre el mismo.

Existen tres corrientes: la de entrada de biomasa, la de salida de biomasa y la de salida de los gases producidos. Se conoce el caudal de salida del torrefactor que es de 3343.3 kg/h y que el rendimiento másico es del 70%. Por tanto, el caudal de entrada de biomasa al torrefactor es:

$$\text{Caudal de entrada de biomasa} = \frac{3343.3 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{0.7} = 4776.15 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Por tanto, el caudal de gases producido es:

$$\text{Caudal producido de gases} = 4776.15 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 3343.3 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 1432.85 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Ahora se realiza el balance de energía en el torrefactor para saber la energía necesaria que hay que

aportar al mismo para que la biomasa salga a una temperatura de 280°C. Para realizar el balance de materia se supone que el caudal de gases que se introduce en el interior del reactor es la diferencia entre el caudal de gas total en el reactor y el caudal de gases producido en la torrefacción.

El caudal de gas total en el reactor se obtiene a partir del volumen del mismo, del porcentaje ocupado por el gas y del tiempo de residencia de éste en el interior del torrefactor.

Para el cálculo del volumen del trommel, es necesario conocer la densidad de la biomasa a la entrada, el coeficiente de llenado del reactor y el tiempo de residencia del sólido en el mismo. Estos datos son conocidos. La densidad de la biomasa con un 10% de humedad es 250 kg/m³ (Figura 2-2), el coeficiente de llenado óptimo para un trommel se estima de 0.6 y el tiempo de residencia, obtenido de información de ensayos realizados en laboratorios, es 3h. A partir de estos tres datos y del caudal de sólido a la entrada, se obtiene el volumen del reactor.

$$Volumen = 4776.15 \frac{kg}{h} \times \frac{1 m^3}{250 kg} \times \frac{1}{0.6} \times 3 h = 95.523 m^3$$

Sabiendo que el reactor es un cilindro se puede calcular la longitud y el diámetro del mismo a partir de su volumen. Se calculan varios diámetros para varias longitudes y se escoge la más adecuada. En la tabla 3-1 se recogen la relación entre longitud y diámetro.

Diámetro (m)	Sección (m ²)	Longitud (m)
2	3.14	30.42
2.5	4.91	19.45
3	7.07	13.51
3.5	9.62	9.93
4	12.57	7.60

Tabla 3-1. Opciones de diámetro, sección y longitud para el torrefactor

Se puede seguir probando, pero buscando en catálogos y comparando con otras aplicaciones, se ha podido comprobar que la mejor opción es la tercera, porque de esta manera se encuentra un compromiso entre longitud y diámetro, de manera que el reactor no es excesivamente largo (lo cuál puede influir al tiempo de residencia del sólido) ni excesivamente ancho (lo cual puede influir en el área de intercambio de calor al reactor). Por tanto, la longitud del reactor es de 13.51 m y el diámetro de 3 m.

Para saber el caudal de gas que circula por el interior del reactor, se debe conocer el tiempo de residencia del mismo, que se calcula a partir de la velocidad que lleva en el interior del torrefactor. La velocidad del gas se estima de 0.3 m/s para iniciar los cálculos, aunque éste dato puede ser variable. Por tanto, el tiempo de residencia del gas se obtiene dividiendo la longitud del reactor entre la velocidad del gas, quedando un tiempo de residencia de 45.03 segundos, o lo que es lo mismo, 0.0125 h.

El volumen de gas en el interior del reactor es el que no está ocupado por el sólido, es decir, el 40% del volumen del reactor. El volumen de gas es 38.21 m³. Por tanto, el caudal máximo de gases que puede circular por el reactor es el cociente entre el volumen de gases y el tiempo de residencia del gas, resultando 3056.8 m³/h.

Ahora se debe conocer el volumen de gas que se produce durante la torrefacción. Para ello, se debe conocer la concentración de cada sustancia en el caudal de gases de salida, que se estima a partir de informes de experiencias en laboratorios (*Idaho National Laboratory, 2006*), así como su peso molecular. Mediante la ley de los gases perfectos a 280°C y 1 atm se calcula el caudal volumétrico

que se produce de cada sustancia y estos se suman para obtener el caudal total. La tabla 3-2 recoge estos datos y resultados.

Compuesto	% en masa	Caudal más. (kg/h)	PM (g/mol)	Caudal Vol. (m ³ /h)
Agua	9	429.85	18	1082.90
Ácido láctico	2.5	119.40	90	60.16
Acetona	2	95.52	58	74.68
Ácido acético	4.5	214.93	60	162.43
Ácido fórmico	2	95.52	46	94.16
Metanol	4	191.05	32	270.72
CO ₂	4	191.05	44	196.89
CO	1.5	71.64	28	116.02
Trazas	0.5	23.88	-	-
Total	30	1432.85		2057.98

Tabla 3-2. Datos y resultados del caudal de gases producidos en la torrefacción

De esta manera, y sin tener en cuenta las trazas, el caudal volumétrico que se produce durante la torrefacción es de 2057.98 m³/h. Por tanto, como máximo, se podrá recircular al reactor la diferencia entre el caudal de gases máximo en el interior de reactor y el caudal de gases producidos en la torrefacción. De esta manera, el caudal que se recircula es de 998.82 m³/h. El caudal restante, que, en régimen permanente, es el mismo que el producido durante la torrefacción, se envía al oxidador para quemarlo. Hasta alcanzar el régimen permanente el caudal que llega al oxidador será menor.

Por tanto, ya se sabe el caudal de recirculación de gases al interior del reactor y se puede resolver el balance de energía para conocer el calor necesario a aportar. Para ello, suponiendo mezcla perfecta en el interior del torrefactor, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\sum_{\text{entrada}} F_i x (\Delta H_{fi}^0 + C_{pi} x (T_E - T_{ref})) + Q_{aporte} = \sum_{\text{salida}} F_i x (\Delta H_{fi}^0 + C_{pi} x (T_S - T_{ref}))$$

Los datos conocidos de la biomasa se detallan en la tabla 3-3.

	Entrada	Salida
Caudal (kg/h)	4776.15	3343.3
PCI (kJ/kg)	16750	21535.7
C_p (kJ/kg°C)	1.5	1.5
T (°C)	25	280

Tabla 3-3. Datos de la biomasa en el torrefactor

La temperatura de referencia se toma de 25°C.

Para el cálculo de la entalpía de formación de la biomasa a la entrada y a la salida se supone que éste posee una fórmula molecular de la siguiente forma C_xH_yO_z. Los subíndices para cada compuesto se obtienen a partir de la composición elemental de la biomasa a la entrada y a la salida.

La composición de la biomasa a la entrada se obtiene de la Figura 2-1.

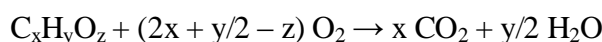
La composición de la biomasa torrefactada se puede observar en la tabla 3-4.

	Composición (%)
Carbono	59.6
Hidrógeno	5.7
Oxígeno	34.6

Tabla 3-4. Composición elemental de la biomasa torrefactada a 280°C y 3h. (Fuente: *Pach, Zanzi y Björnbom, 2002*)

A partir de estos datos, y de la reacción de combustión de la biomasa se pueden obtener las entalpías de formación a la entrada y a la salida del torrefactor, sabiendo que el PCI es la entalpía de combustión cambiada de signo.

La reacción de combustión de la biomasa es:



Y por tanto, la fórmula para calcular la entalpía de reacción es:

$$\Delta H_r = x \Delta H_{fCO_2}^0 + \frac{y}{2} \Delta H_{fH_2O}^0 - \Delta H_{fC_xH_yO_z}^0 = (-PCI)$$

De esta manera, conociendo los subíndices a la entrada y la salida y sabiendo que las entalpías de formación del CO₂ y del agua en estado gas son -393.5 kJ/mol y -241.6 kJ/mol, se puede despejar la entalpía de formación para cada caso.

Los subíndices se calculan a partir del peso molecular de cada elemento, que para el C es 12, para el H es 1 y para el O es 16; y de la composición de la biomasa en cada caso.

Así, queda que para la biomasa de entrada la fórmula es CH_{1.6}O_{0.8}, obteniéndose un peso molecular de 26.4 g/mol. Por tanto, la entalpía de formación a la entrada es -5477.27 kJ/kg.

Para la biomasa a la salida la fórmula es CH_{1.15}O_{0.44}, su peso molecular es 20.19 g/mol y la entalpía de formación es -4821.78 kJ/kg.

Ya se tienen todos los datos para resolver el balance de materia, que se realiza en una hoja de cálculo suponiendo que la concentración del caudal de gas de recirculación es la misma que la del caudal de gas de salida del torrefactor y suponiendo que la temperatura también es la misma. El caudal de gases a la salida es la suma del caudal de gases producido y el caudal recirculado. La tabla 3-5 recoge los datos y resultados del balance de energía en el torrefactor.

Las entalpías de formación y los calores específicos de los compuestos que forman los caudales gaseosos son conocidos y se recogen en la tabla 3-5.

Utilizando el Solver de Excel se calcula el balance de materia, y el calor a aportar sale negativo, lo cual significa que, no sólo no hay que aportar calor, sino que se desprende calor en el proceso. El calor desprendido es 168.8 kW.

Por tanto, no hay que calentar el torrefactor sino enfriarlo. Para ello, se va a utilizar la energía que se produce para calentar la corriente de aire que se utiliza en la secadora para secar la biomasa a 120 °C. El área de intercambio es una parte del área exterior del cilindro. Esta corriente de aire es precalentada anteriormente por el agua procedente del tornillo sinfín refrigerador, aprovechando también para enfriar la misma.

Para conocer la temperatura de entrada del aire a la camisa de refrigeración se resuelve un sistema de ecuaciones con dos incógnitas, que son esta temperatura y el caudal de aire utilizado. Las dos ecuaciones son los balances en el intercambiador y en la camisa. Se conoce el calor aportado por el agua procedente del tornillo, que se ha calculado anteriormente, y el calor aportado al aire por el torrefactor. El calor específico del aire también es conocido y la temperatura de entrada al

intercambiador es 25°C y la de salida de la camisa debe ser 120°C.

Componente	Caudal másico (kg/s)	Peso molecular (g/mol)	Entalpía de formación (kJ/mol)	Entalpía de formación (kJ/kg)	Calor específico (kJ/ kg °C)	T (°C)	T ref (°C)	Q (kW)
Biomasa ent	1.327	26.4000	-144.6000	-5477.2727	1.5000	25.0000	25.0000	-7266.7434
H ₂ O ent	0.058	18.0000	-241.6000	-13422.2222	1.9010	280.0000	25.0000	-748.0488
Ácido láctico	0.016	90.0000	-615.9000	-6843.3333	1.9989	280.0000	25.0000	-101.7255
Acetona	0.013	58.0000	-218.5000	-3767.2414	1.2931	280.0000	25.0000	-44.1683
Ácido acético	0.029	60.0000	-438.1000	-7301.6667	1.0567	280.0000	25.0000	-203.3026
Ácido fórmico	0.013	46.0000	-362.6000	-7882.6087	0.9930	280.0000	25.0000	-98.0297
Metanol	0.026	32.0000	-201.3000	-6290.6250	1.9197	280.0000	25.0000	-149.0764
CO ₂ ent	0.026	44.0000	-393.5000	-8943.1818	0.8440	280.0000	25.0000	-224.2905
CO	0.010	28.0000	-110.4000	-3942.8571	1.0200	280.0000	25.0000	-35.4897
Q total ent								-8870.8748

Biomasa sal	0.929	20.2000	-97.4000	-4821.7822	1.5000	280.0000	25.0000	-4122.7429
H ₂ O sal	0.177	18.0000	-241.6000	-13422.2222	1.9010	280.0000	25.0000	-2292.8309
Ácido láctico	0.049	90.0000	-615.9000	-6843.3333	1.9989	280.0000	25.0000	-311.7971
Acetona	0.039	58.0000	-218.5000	-3767.2414	1.2931	280.0000	25.0000	-135.3795
Ácido acético	0.089	60.0000	-438.1000	-7301.6667	1.0567	280.0000	25.0000	-623.1391
Ácido fórmico	0.039	46.0000	-362.6000	-7882.6087	0.9930	280.0000	25.0000	-300.4690
Metanol	0.079	32.0000	-201.3000	-6290.6250	1.9197	280.0000	25.0000	-456.9313
CO ₂ sal	0.079	44.0000	-393.5000	-8943.1818	0.8440	280.0000	25.0000	-687.4689
CO	0.030	28.0000	-110.4000	-3942.8571	1.0200	280.0000	25.0000	-108.7789
Q total sal								-9039.5375

Tabla 3-5. Balance de energía en el torrefactor

Con estos, datos de puede resolver el sistema de ecuaciones siguiente:

$$Q = 266.27 \text{ kW} = m_a \times 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (T - 25)$$

$$Q = 168.67 \text{ kW} = m_a \times 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (120 - T)$$

La solución del sistema de ecuaciones es T=83.15°C y m_a=4.55 kg/s.

Por tanto, la temperatura a la que sale el aire del intercambiador y entra en la camisa de refrigeración del torrefactor es de 83.15°C y el caudal de aire utilizado es 4.55 kg/s, o lo que es lo mismo, 16380 kg/h, que dividido entre la densidad del aire, que es de 1.1 kg/ m³, da un caudal de 148903.9 m³/h.

Para llevar el aire hasta el intercambiador se usará una soplante capaz de procesar este caudal cuyos parámetros se obtienen de catálogos.

Para calcular el área del intercambiador se usa la fórmula Q=U x A x DTLM, de donde se despeja A, estimando que U=150 W/m² °C para intercambio aire-agua con convección forzada y sabiendo que DTLM=7.94°C. El calor intercambiado debe ser el que aporta el agua, que es de 266.27 kW. El resultado es un área para cada intercambiador de:

$$\text{Área} = \frac{266.27 \text{ kW}}{0.15 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2^\circ\text{C}} \times 7.94^\circ\text{C}} = 223.6 \text{ m}^2$$

3.2.5 Oxidador térmico

En el oxidador térmico se queman los gases producidos en la torrefacción. Del caudal de salida del torrefactor sólo se quema una parte del caudal, que, en régimen permanente, equivale al caudal que se produce en la torrefacción. La otra parte se recircula al interior del torrefactor.

El caudal de gases que se produce en el torrefactor es conocido y se obtiene a partir del balance de materia en el mismo. Su valor es de 1432.5 kg/h.

Mediante un balance de energía en el oxidador térmico se puede conocer el caudal de aire necesario para quemar completamente los compuestos orgánicos volátiles, imponiendo la temperatura de salida de los gases de combustión. Éste se realiza a partir de la siguiente fórmula:

$$\sum_{\text{entrada}} F_i x (\Delta H_{fi}^0 + C_{pi} x (T_E - T_{ref})) = \sum_{\text{salida}} F_i x (\Delta H_{fi}^0 + C_{pi} x (T_S - T_{ref})) + Q_{pérdidas}$$

Para ello se deben conocer los caudales de entrada y de salida, las entalpías de formación y el calor específico medio de todas las sustancias que intervienen en el proceso de combustión y las temperaturas de entrada de cada sustancia. La temperatura de referencia se toma de 25°C. Las pérdidas se estiman de un 5% de la energía aportada por el gas.

Para conocer los caudales de salida es necesario conocer las reacciones que tienen lugar en el oxidador y la composición de la corriente de gases de salida del torrefactor, que se estima a partir de experiencias en laboratorios (*Idaho National Laboratory, 2006*). Se usará el peso molecular para pasar de caudal másico y caudal molar. Estos datos se recogen en la tabla 3-6.

Compuesto	% en masa	Caudal (kg/h)	PM (g/mol)	Reacción
Agua	9	429.85	18	-
Ácido láctico	2.5	119.40	90	$C_3H_6O_3 + O_2 \rightarrow 3 CO_2 + 3 H_2O$
Acetona	2	95.52	58	$C_3H_6O + 4 O_2 \rightarrow 3 CO_2 + 3 H_2O$
Ácido acético	4.5	214.93	60	$C_2H_4O_2 + 2 O_2 \rightarrow 2 CO_2 + 2 H_2O$
Ácido fórmico	2	95.52	46	$HCOOH + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$
Metanol	4	191.05	32	$CH_3OH + \frac{3}{2} O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$
CO ₂	4	191.05	44	-
CO	1.5	71.64	28	$2 CO + O_2 \rightarrow 2 CO_2$
Trazas	0.5	23.88		-
Total	30	1432.85		-

Tabla 3-6. Datos y reacciones del caudal de entrada al oxidador

A partir de la estequiometría de las reacciones y del peso molecular se pueden calcular los caudales molares de salida del oxidador, suponiendo que se produce la combustión completa de los gases.

Para ello, es necesario conocer el caudal de aire introducido. Se impone la temperatura de salida de los gases de combustión de 900°C y se resuelve el balance de energía mediante la función Solver de Excel. Los resultados se recogen en la tabla 3-7.

Del balance de materia, se obtiene que las pérdidas, estimadas de un 5%, son de 173.1 kW, y que el exceso de aire necesario para conseguir una temperatura de salida de gases de combustión a 900°C es del 153.6%.

Cabe destacar, que el único objetivo del oxidador térmico es eliminar los compuestos orgánicos, que son contaminantes para la atmósfera, por lo que no importa que el exceso de aire introducido sea elevado si se cumple con los requisitos impuestos.

Componente	Caudal másico (kg/s)	Peso molecular (g/mol)	Caudal molar (kmol/s)	O ₂ necesario (kmol/s)	CO ₂ producido (kmol/s)	H ₂ O producido (kmol/s)	Entalpía de formación (kJ/mol)	Entalpía de formación (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg °C)	T (°C)	T _{ref} (°C)	Q (kW)
N ₂ ent	1.955	28.0000	0.0698	-	-	-	0.0000	0.0000	1.0400	25.0000	25.0000	0.0000
O ₂ ent	0.594	32.0000	0.0186	-	-	-	0.0000	0.0000	0.9190	25.0000	25.0000	0.0000
H ₂ O ent	0.119	18.0000	0.0066	-	-	0.0066	-241.6000	-13422.2222	1.9010	25.0000	25.0000	-1602.6637
Ácido láctico	0.033	90.0000	0.0004	0.0004	0.0011	0.0011	-615.9000	-6843.3333	1.9989	25.0000	25.0000	-226.9777
Acetona	0.027	58.0000	0.0005	0.0018	0.0014	0.0014	-218.5000	-3767.2414	1.2931	25.0000	25.0000	-99.9606
Ácido acético	0.060	60.0000	0.0010	0.0020	0.0020	0.0020	-438.1000	-7301.6667	1.0567	25.0000	25.0000	-435.9232
Ácido fórmico	0.027	46.0000	0.0006	0.0003	0.0006	0.0006	-362.6000	-7882.6087	0.9930	25.0000	25.0000	-209.1585
Metanol	0.053	32.0000	0.0017	0.0025	0.0017	0.0017	-201.3000	-6290.6250	1.9197	25.0000	25.0000	-333.8330
CO ₂ ent	0.053	44.0000	0.0012	-	0.0012	-	-393.5000	-8943.1818	0.8440	25.0000	25.0000	-474.5998
CO	0.020	28.0000	0.0007	0.0004	0.0007	-	-110.4000	-3942.8571	1.0200	25.0000	25.0000	-78.4653
				0.0073	0.0086	0.0133					Q total ent	-3461.5817
CO ₂ sal	0.3793	44.0000	0.0086	-	-	-	-393.5000	-8943.1818	1.2710	900.0000	25.0000	-2970.2183
H ₂ O sal	0.2401	18.0000	0.0133	-	-	-	-241.6000	-13422.2222	2.4120	900.0000	25.0000	-2715.5327
N ₂ sal	1.9554	28.0000	0.0698	-	-	-	0.0000	0.0000	1.1970	900.0000	25.0000	2048.0853
O ₂ sal	0.3598	32.0000	0.0112	-	-	-	0.0000	0.0000	1.1090	900.0000	25.0000	349.1631
											Q total sal	-3288.5026

Tabla 3-7. Balance de energía en el oxidador térmico

Una vez calculado el exceso de aire introducido, a partir del mismo, del caudal de oxígeno que reacciona (obtenido del balance de energía) y de la proporción de éste en el aire se puede calcular el caudal de aire que se introduce en el oxidador:

$$\text{Caudal de aire} = 2.536 \times 26.28 \frac{\text{kmol de O}_2}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ kmol de aire}}{0.21 \text{ kmol de O}_2} = 317.36 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

El caudal volumétrico de aire introducido se puede calcular con la ley de los gases perfectos a 25°C y 1 atm. El resultado es 7755 m³/h de aire.

El caudal de oxígeno a la salida será la diferencia entre lo que se introduce y lo que reacciona. Se introduce un 21% (n/n) del caudal de aire, lo que supone 66.65 kmol/h, y reaccionan 26.28 kmol/h como se obtiene del balance de energía. Por tanto, el caudal de salida de oxígeno es de 40.37 kmol/h. Multiplicando por el peso molecular del oxígeno (32 g/mol) se obtiene el caudal másico, que asciende a 1291.84 kg/h.

Por su parte, el nitrógeno no reacciona, lo cual significa que sale el mismo caudal que entra. El caudal de entrada es el 79% (n/n) del caudal de aire introducido, es decir, 250.71 kmol/h. Por tanto, el caudal de salida será también de 250.71 kmol/h, que multiplicado por el peso molecular del nitrógeno (28 g/mol) da un caudal másico de 7020 kg/h.

Los caudales de salida de dióxido de carbono y agua se obtienen de las estequiometría de las reacciones y se recogen en el balance de energía (tabla 3-7) y son 30.96 kmol/h y 47.88 kmol/h, respectivamente. Multiplicados por sus respectivos pesos moleculares (44 g/mol y 18 g/mol) se obtienen los caudales másicos. El caudal másico de dióxido de carbono es 1362.24 kg/h y el caudal másico de agua es 861.84 kg/h.

A partir de la temperatura de salida de los gases, que se ha impuesto de 900°C, con la ley de los gases perfectos se puede calcular también el caudal volumétrico de gases que se emiten a la atmósfera. Para ello se parte de la suma de los caudales molares de cada componente que abandonan el oxidador.

El caudal volumétrico se obtiene de la siguiente forma:

$$Caudal\ vol. = (40.37 + 250.71 + 30.96 + 47.88) \frac{kmol}{h} \times \frac{0.082 \frac{atm\ m^3}{K\ kmol} \times 1173.15\ K}{1\ atm} = 35585.7 \frac{m^3}{h}$$

Por tanto, el caudal emitido a la atmósfera a través de la chimenea es de 35585.7 m³/h.

Cabe destacar que para el arranque de la planta es necesario utilizar gas natural como combustible en el oxidador térmico, para producir gases de combustión que ayuden a calentar el reactor para comenzar a torrefactor. Esta combustión se produce con un mínimo exceso de aire de manera que el caudal de salida contenga muy poco oxígeno y así crear la atmósfera inerte producida en la torrefacción.

Las dimensiones del oxidador se calculan a partir del caudal de gases procesado y del tiempo de residencia de los mismos en el interior de éste. El tiempo de residencia de los gases es de 2 segundos (escogiendo la opción más desfavorable para este tipo de oxidador) y el caudal volumétrico máximo procesado es el de salida, 35585.7 m³/h. Por tanto, el volumen del oxidador, resultante el producto del caudal volumétrico y el tiempo de residencia, debe ser de 19.77 m³. La sección de paso, estimando una velocidad de los gases en el proceso de 4 m/s, se calcula dividiendo el caudal volumétrico entre la velocidad, y resulta de 2.47 m², lo que supone un diámetro de 1.77 m. Por tanto, la longitud del oxidador es de 8 m.

Para introducir el aire en el oxidador es necesaria una soplante que sea capaz de procesar el caudal deseado, que asciende a 7755 m³/h.

A la salida del oxidador, se dispone de otra soplante para enviar los gases de combustión a la chimenea que sea capaz de procesar 35585.7 m³/h.

Los datos de estas soplantes se obtienen de catálogos.

3.2.6 Tornillo sinfín

El torrefactor tiene una longitud de 13.51 m y una inclinación de 10°, por lo que hay que elevar el material hasta 2.35 m de altura mediante el tornillo sinfín. A mayor inclinación, mayor pérdida de capacidad pero también menor longitud. Se debe buscar un compromiso entre reducción de capacidad y longitud, escogiendo el ángulo de inclinación más conveniente en términos de potencia consumida. Para el cálculo de la potencia se utiliza la siguiente expresión:

$$Potencia\ (CV) = \frac{Q_m \times L \times F}{270 \times \eta} + \frac{Q_m \times H}{270}$$

Así, sabiendo que el caudal másico (Q_m) es 4776.15 kg/h, que el factor de fricción (F) para este tipo de material es 2.5 y que la altura es de 2.35 m, se puede calcular para cada inclinación la potencia dependiendo de la longitud (L) y la reducción de capacidad (1-η).

En la tabla 3-8, se resumen los resultados para cada inclinación.

Inclinación	Reducción de capacidad (%)	Longitud (m)	Potencia (CV)	Potencia (kW)
20°	45	6.87	599.27	440.76
15°	26	9.08	589.51	433.58
10°	10	13.53	711.7	523.45

Tabla 3-8. Datos y resultados del tornillo sinfín según inclinación (Fuente: *Dep. Ing. Química, ETSI Sevilla*)

Es claro, que la elección más adecuada en términos de potencia es la de 15°, por tanto, el tornillo tendrá una longitud de 9.08 m y consumirá una potencia de 433.58 kW.

3.2.7 Silo de almacenamiento en seco

Para dimensionar los silos de almacenamiento en seco se debe conocer el caudal de sólido, su densidad y el tiempo que se quiera almacenar. Todos son datos conocidos. El caudal es 4776.15 kg/h, la densidad de la biomasa al 10% de humedad es 250 kg/m³ (Figura 2-2) y el tiempo que se quiere almacenar es 1 semana. De esta manera, se puede calcular el volumen necesario para cumplir los requisitos impuestos:

$$\text{Volumen total} = 4776.15 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{250 \text{ kg}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \times \frac{7 \text{ días}}{1 \text{ semana}} \times 1 \text{ semana} = 3209.6 \text{ m}^3$$

Este volumen se dividirá en 6 silos idénticos, por lo que cada silo posee un volumen de 535 m³. Cada silo tiene 25 m de altura, por lo que tendrá 5.2 m de diámetro.

3.2.8 Secadora

Para la secadora sólo es necesario saber el volumen que debe secar y una vez que se sepa buscar en catálogos la más adecuada para el proceso. Para saber el volumen que se va a secar se necesita el caudal de sólido, la densidad de la biomasa antes del secado y el tiempo de residencia para el secado. Todos los datos son conocidos. El caudal es 4776.15 kg/h, la densidad de la madera con 30% de humedad es de 300 kg/m³ y el tiempo de residencia para el secado se ha estimado en 1 h. Así, el volumen a secar es:

$$\text{Volumen a secar} = 4776.15 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{300 \text{ kg}} \times 1 \text{ h} = 15.92 \text{ m}^3$$

El secado se realiza con aire a 120°C, que, como se ha explicado anteriormente, se precalienta en un intercambiador a partir del agua procedente del tornillo sinfín refrigerador y se lleva hasta 120°C en la camisa de refrigeración del torrefactor. Para calcular el caudal de aire necesario se realiza un balance de energía en el intercambiador. El calor aportado por el agua debe ser el mismo que el que absorba el aire.

El caudal de aire introducido y el área del intercambiador de precalentamiento se han calculado anteriormente.

3.2.9 Almacenamiento de materia prima

El almacenamiento de la materia prima se realizará a granel bajo cubierta. Para ello los restos y astillas procedentes de la industria maderera, se depositarán en montones antes de ser procesados. Los montones tendrán una altura de 2.5 m y el ángulo de talud para este producto es 45°, por lo que, por trigonometría, el ancho de la base de los montones será de 5 m. Los montones tienen forma de prisma triangular colocado en posición horizontal.

El volumen a almacenar se calcula nuevamente a partir del caudal, la densidad y el tiempo de almacenamiento. Estos son, respectivamente, 4776.15 kg/h, 300 kg/m³ (Figura 2-2) y 1 semana. De esta manera, se obtiene el volumen a almacenar:

$$\text{Volumen a almacenar} = 4776.15 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{300 \text{ kg}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \times \frac{7 \text{ días}}{1 \text{ semana}} \times 1 \text{ semana} = 2675 \text{ m}^3$$

Una vez calculado el volumen necesario a almacenar, se puede calcular la longitud total de los montones dividiendo entre la sección del montón. Éstas son:

$$\text{Sección} = \frac{\text{Base} \times \text{Altura}}{2} = \frac{5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}}{2} = 6.25 \text{ m}^2$$

$$\text{Longitud total} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Sección}} = \frac{2675 \text{ m}^3}{6.25 \text{ m}^2} = 428 \text{ m}$$

Ahora se debe escoger el número de montones para saber la longitud de los mismos. En este caso, se

dispondrá de 7 montones, por lo que la longitud de cada montón debe ser 61.15 m. Cada montón ocupa una superficie de 305.75 m^2 , por lo que, sólo para almacenar los montones serán necesarios 2140.25 m^2 . A esta superficie hay que sumarle el espacio entre montones, que se supone de 1,5 m de ancho, lo cual supone una superficie adicional de 733.8 m^2 , resultando una superficie necesaria total de 2874.05 m^2 . Aplicando un factor de seguridad del 30%, se puede aproximar a 3750 m^2 , los necesarios para almacenar la materia prima.

4 MEDICIONES Y PRESUPUESTO

En este capítulo se van a detallar los datos más relevantes de los equipos que aparecen en la planta así como su coste para poder realizar de esta manera un presupuesto aproximado de la construcción de la planta.

En primer lugar se van a analizar los movimientos de tierras y la cimentación necesarios para la construcción de la planta, así como la construcción de edificios para oficinas y salas de control. Y seguidamente se detallarán las mediciones y el coste de los equipos del proceso uno a uno. Al final del capítulo aparecerá un cuadro resumen del presupuesto de la planta.

Los precios han sido estimados a partir de presupuestos de otros proyectos similares y de documentos de estimación de costes de equipos.

4.1 Movimiento de tierras

Para la construcción de la planta son necesarios, entre oficinas, superficies de almacenamiento de productos y superficie ocupadas por equipos, con el margen de seguridad que ello conlleva, unos 10000 m². El desbroce y limpieza del terreno por medios mecánicos tiene un precio de 0.43 €/m². Por tanto, el desbroce y limpieza supone 4300 €.

Se necesitan 200 m³ de tierras procedentes de excavación a vertederos para la construcción de la planta. El transporte de las mismas asciende a 3.43 €/m³, por lo que el coste total supone 686 €.

Es necesario realizar algunas zanjas para la construcción de la planta, suponiendo un volumen total de 20 m³. El coste unitario de excavación con retroexcavadora con extracción de tierras a los bordes es de 5.51 €/m³. El coste total supone 110.20 €.

Se realiza también un relleno y compactado de tierras por medios mecánicos de un volumen de 2000 m³ con un coste unitario de 5.45 €/m³. Este coste asciende a 10900 €.

En total, el movimiento de tierras tiene un coste total de 15996.2 €.

4.2 Cimentación

Se realiza un encofrado y desencofrado con madera suelta en zapatas, zanjas y vigas riostras de cementación, considerando 8 posturas de 250 m², con un precio unitario de 9.92 €/m². Por tanto, el coste total es de 2480 €.

Se utilizan dos tipos de hormigón: el primero para el encofrado y desencofrado que rellena las zapatas de cimentación, que es un hormigón en masa, vertido por medios manuales, vibrado y colocación, del que se utilizan 150 m³ y cuyo coste unitario es de 78.82 €/m³; y el segundo es un hormigón armado vertido por medio de pluma-grúa, vibrado y colocación, del que se necesitan 200 m³, teniendo un coste unitario de 128.47 €/m³. Por tanto, el coste en hormigón asciende a 37517 €.

En total, la cimentación tiene un coste de 39997 €.

4.3 Edificios

Además de la construcción para lo que es el proceso en sí, se construyen edificios para oficinas y una sala de control de la planta.

El edificio de las oficinas estará compuesto por hall, oficinas, salas de reuniones, aseos, vestuarios, oficina del director, oficina de encargados, pasillos y comedor, ocupando una superficie de 500 m². A esto hay que añadirle la sala de control, que tiene 60 m².

El coste de la construcción de tabiques con ladrillo perforado de 25x12x9 cm, sentado con mortero de cemento y arena de río incluyendo la mano de obra asciende a 22.67 €/m². Se construyen 700 m², por lo que el coste es de 15869 €.

El enyesado de las paredes tiene un coste de 9.62 €/m². La superficie a enyesar es de 900 m², por lo que su coste asciende a 8658 €.

La pintura de las paredes incluyendo la mano de obra con dos manos y a color liso tiene un coste de 2.27 €/m². Se pintan 900 m², por lo que el coste es de 2043 €.

El coste del falso techo formado por paneles “box” de 297x1200 mm con perfilera vista de hacer completamente instalado es de 37.82 €/m². Son necesarios 560 m², por lo que el coste es de 21179.20 €.

Los costes de fontanería, incluyendo materiales e instalación, ascienden a 12000 €.

La instalación eléctrica supone un coste de 21000 €, y se añade una instalación contra incendios de 1500 €.

El coste total en edificios asciende a 82249.20 €

4.4 Equipos de proceso

Para detallar los equipos se va a seguir el orden del proceso, comenzando por el almacenamiento de materia prima y terminando por el almacenamiento del producto final.

Para realizar este capítulo, cabe destacar que se ha buscado en catálogos el equipo más conveniente para el proceso, según los datos de los que se partían para realizar los cálculos. Del coste de los equipos que no se han buscado en catálogos se ha hecho una estimación.

A continuación, se detalla cada uno de los equipos:

4.4.1 Almacenamiento de materia prima

Para el almacenamiento de materia prima es necesaria una superficie de 3750 m², en forma de rectángulo. Además es necesaria una cubierta de unos 8 m de altura para la posible entrada de caminos y máquinas al recinto.

El material del que está construída la superficie del suelo es hormigón, cuyo coste se ha calculado anteriormente, y la cubierta es una estructura metálica con el techo de chapa, recubierto por el interior con lana de vidrio.

El acero usado para la estructura metálica es acero laminado A-42b cuyo coste unitario totalmente montado y con dos manos de pintura de minio de plomo es de 0.88 €/kg. Para la construcción de esta estructura se emplean 200.000 kg de este acero, lo que representa un coste de 176000 €.

Para la cubierta se necesitan 4000 m² de un panel con doble chapa de acero y que contiene la lana de vidrio en su interior, cuyo coste unitario es de 36.45 €/m². El coste total es de 147040 €.

Por tanto, el coste de la cubierta al completo asciende a 323040 €.

El coste del hormigón se ha incluido anteriormente.

4.4.2 Secado

La secadora consiste en una cinta transportadora donde a medida que el sólido va avanzando se le aplica aire a 80°C para reducir la humedad de la biomasa. Se ha buscado en catálogos a partir del dato del volumen, obtenido en la memoria de cálculo. El volumen a secar es de 15.92 m³, y la secadora de banda escogida es de la marca KALH.

Para precalentar el aire de secado se utiliza un intercambiador de calor de 223.47 m² de área, cuyo coste asciende a 23215€.

El coste de la cinta es de 29350€.

A ambos costes hay que añadirle el coste de una soplante para impulsar el aire y una bomba para impulsar el agua de intercambio hasta el tornillo sinfín. La soplante, de la marca “Atlas Copco”, procesa un caudal de 14890.9 m³/h de aire y la bomba, de la marca “Salvador Escoda SA”, un caudal de 3.53 m³/h de agua. El coste de la soplante es de 15500€ y el de la bomba es de 308 €.

Por tanto, el coste total del área de secado es de 68373 €.

4.4.3 Almacenamiento en seco

Los silos deben albergar en total 3209.6 m³ de producto. Se dispone de seis silos idénticos, de 535 m³ cada uno, y con una altura de 25 m y un diámetro de 5.2 m. La marca de los silos es “TAMA GROUP”. Y el material de construcción es acero inoxidable. Además, en la parte superior los silos llevan una cámara de filtración con filtros de mangas, para separar la biomasa del aire del transporte neumático.

El coste de cada silo es de 115000 €. Por tanto, el coste de los 6 silos asciende a 690000 €.

Al coste de los silos hay que añadirle el coste del sistema de transporte neumático, que es de 260000 €, incluyendo las cámaras de filtración de cada silo.

El coste total de esta área asciende a 950000 €.

4.4.4 Tornillo sinfín

El tornillo sinfín que alimenta al reactor tiene una longitud de 9.08 m y consume una potencia de 433.6 kW. El material de construcción es acero inoxidable.

El coste del tornillo sinfín es de 3900 €.

4.4.5 Torrefacción

El torrefactor consiste en un cilindro construido de acero inoxidable de 13.51 m de largo y 3 m de diámetro. Además, lleva una camisa de refrigeración para aprovechar la energía producida en el proceso para calentar el aire de secado.

El coste del torrefactor se ha estimado de 77360 €.

A este coste hay que añadir el coste de la soplante del canal de recirculación al torrefactor, que procesa 998.82 m³/h. El fabricante es “Atlas Copco” y su coste es de 1240 €.

El coste total de esta área es de 78600 €.

4.4.6 Oxidación térmica

El oxidador térmico está construido de acero inoxidable en su exterior, capaz de soportar altas temperaturas, y material refractario en su interior. Las dimensiones del mismo son 8 m de largo y 1.77 m de diámetro.

El coste del oxidador térmico es de 99000 €.

Al coste del oxidador hay que sumarle el de dos soplantes, una para introducir el aire en el oxidador, que procesa $7755 \text{ m}^3/\text{h}$, y otra para llevar los gases de combustión hasta la chimenea, que procesa $35585.7 \text{ m}^3/\text{h}$. Las soplantes son de la marca “Atlas Copco” y sus costes son, respectivamente, 3100 € y 23200 €.

Por tanto, el coste total de esta área es de 125300 €.

4.4.7 Refrigeración

Para refrigerar la biomasa y transportarla hasta la peletizadora se usan dos tornillos sinfín refrigeradores. Estos consisten en un transportador de tornillo tradicional con una camisa de refrigeración. El material de construcción es de acero inoxidable. La longitud de cada tornillo es de 9 m y la potencia consumida por cada uno es de 204.9 kW. La marca de estos tornillos es ETiA.

El coste de cada tornillo es de 12581 €. Como se usan dos, el coste asciende a 25162 €.

Al coste de los tornillos hay que sumarle el coste de una bomba para impulsar el agua usada como refrigerante, capaz de procesar $3.53 \text{ m}^3/\text{h}$. Este coste asciende a 308 €.

El coste total de esta área resulta de 25470 €.

4.4.8 Peletización

El caudal a procesar por la peletizadora es de 3343.3 kg/h . La peletizadora utilizada es de matriz anular. Es el modelo KMPM508 de la marca KMEC. Tiene una capacidad para procesar entre 1500 y 2000 kg/h, por lo que se usarán dos de este tipo. La potencia consumida por cada una es de 136.5 kW. Sus dimensiones son $2990 \times 1200 \times 2410 \text{ mm}$ y su peso es de 4500 kg.

El coste de cada peletizadora asciende a 88700 €. Por tanto, el coste total es de 177400 €.

4.4.9 Almacenamiento del producto final

Para el almacenamiento de la biomasa torrefactada y peletizada en montones a granel son necesarios 2000 m^2 de superficie. El suelo de dicha superficie estará construido de hormigón y el coste de éste ya está incluido en el apartado de Cimentación.

Además, la superficie, al igual que la de almacenamiento de materia prima, posee una cubierta con estructura metálica y techo de chapa recubierto de lana de vidrio. La altura de la misma es de 8 m.

El acero usado para la estructura metálica es acero laminado A-42b cuyo coste unitario totalmente montado y con dos manos de pintura de minio de plomo es de 0.88 €/kg. Para la construcción de esta estructura se emplean 160.000 kg de este acero, lo que representa un coste de 140800 €.

Para la cubierta se necesitan 2200 m^2 de un panel con doble chapa de acero y que contiene la lana de vidrio en su interior, cuyo coste unitario es de 36.45 €/m²- El coste total es de 80190 €.

El coste de la cubierta asciende a 220990€.

Sumando todos estos costes, queda un coste total de la planta de 2110075.40 €

4.5 Resumen del presupuesto

	Precio unitario	Cantidad	Precio total
Movimiento de tierras			
Desbroce y limpieza	0.43 €	10000	4 300.00 €
Movimiento de tierras	3.43 €	200	686.00 €
Excavaciones	5.51 €	20	110.20 €
Relleno y compactado de tierras	5.45 €	2000	10 900.00 €
		Subtotal	15 996.20 €
Cimentación			
Encofrado y desencofrado	9.92 €	250	2 480.00 €
Hormigón en masa	78.82 €	150	11 823.00 €
Hormigón armado	128.47 €	200	25 694.00 €
		Subtotal	39 997.00 €
Edificios			
Construcción tabiques	22.67 €	700	15 869.00 €
Enyesado	9.62 €	900	8 658.00 €
Pintura	2.27 €	900	2 043.00 €
Techo	37.82 €	560	21 179.20 €
Fontanería	-	-	12 000.00 €
Instalación eléctrica	-	-	21 000.00 €
Instalación contra incendios	-	-	1 500.00 €
		Subtotal	82 249.20 €
Equipos			
Secadora de banda	29 350.00 €	1	29 350.00 €
Intercambiador de calor	23 215.00 €	1	23 215.00 €
Soplante	15 500.00 €	1	15 500.00 €
Bomba	308.00 €	1	308.00 €
Silo	115 000.00 €	6	690 000.00 €
Sistema de transporte neumático	260 000.00 €	1	260 000.00 €
Tornillo sinfín	3 900.00 €	1	3 900.00 €
Torrefactor	77 360.00 €	1	77 360.00 €
Soplante	1 240.00 €	1	1 240.00 €
Oxidador térmico	99 000.00 €	1	99 000.00 €
Soplante	3 100.00 €	1	3 100.00 €
Soplante	23 200.00 €	1	23 200.00 €
Tornillo sinfín refrigerador	12 581.00 €	2	25 162.00 €
Bomba	308.00 €	1	308.00 €
Peletizadora	88 700.00 €	2	177 400.00 €
		Subtotal	1 429 043.00 €
Cubiertas			
Acero laminado A-42b estructura	0.88 €	360000	316 800.00 €
Panel de chapa techo	36.45 €	6200	225 990.00 €
		Subtotal	542 790.00 €
		TOTAL	2 110 075.40 €

Tabla 4-1. Cuadro-resumen del presupuesto

5. CONCLUSIONES

En este capítulo se van a explicar las conclusiones que se han obtenido de la realización proyecto, y se va a realizar un resumen del mismo.

En la elaboración del proyecto se ha ido detallando el proceso de diseño de la planta, basándose sobre todo en la tecnología usada en la misma. En primer lugar se realizó una breve introducción sobre la biomasa en la actualidad y sobre el proceso de torrefacción en sí, destacando las reacciones que tienen lugar y las propiedades del proceso, así como las propiedades que adquiere la biomasa tras sufrir las transformaciones que se engloban en el mismo.

La siguiente parte del proyecto se centra en la planta propiamente dicha, pues se encarga de describir uno a uno los equipos utilizados en la misma, así como sus principales datos. También se justifican alguna de las soluciones tomadas.

A continuación aparecen todos los cálculos realizados para el diseño de la planta. En este caso, se han calculado los parámetros más relevantes para cada equipo a partir de los datos disponibles en artículos y publicaciones sobre el tema. Algunos datos han sido estimados en base a otras aplicaciones similares.

Una vez realizado el diseño de todos los equipos se realiza un presupuesto de la planta. Se estiman los costes de movimientos de tierras y de cimentación, y el de los equipos involucrados en el proceso, y se obtiene un coste de inversión de algo más de 2 millones de euros.

Seguidamente se exponen en este capítulo las conclusiones más relevantes sacadas de la realización del proceso.

Tras las conclusiones, se incluyen en el anexo I tres diagramas del proceso que son un diagrama explicativo del proceso, un diagrama de flujo donde se da detalle del caudal, temperatura y presión de cada corriente y un P&ID donde se incluyen los indicadores y controladores existentes en la planta. Todos son controladores de temperatura, ya que es la variable a controlar más importante del proceso en todo momento.

Finalmente, en el anexo II se recogen las hojas de especificaciones de los equipos de la planta y en el anexo III se adjuntan todos los catálogos utilizados para el diseño de la planta.

De los resultados obtenidos son llamativas las grandes superficies de almacenamiento que son necesarias debido al gran caudal másico de biomasa procesado en la planta y a la baja densidad de los productos a almacenar.

De la torrefacción en sí es destacable la gran diferencia que existe entre el PCI de la biomasa torrefactada y el PCI de la biomasa sin torrefactar, por lo que se deduce que este proceso mejora mucho las propiedades de la biomasa como combustible. En este aspecto, también es reseñable el gran caudal de gas que se desprende de la torrefacción, capaz de producir grandes cantidades de gases de combustión tras ser quemados.

En el diseño de la planta se ha buscado la máxima eficiencia energética de la misma, aprovechándose el calor producido en una parte del proceso en otras partes del mismo. Así, el calor producido durante el proceso de torrefacción se aprovecha para calentar el aire utilizado en la secadora. Este aire que se va a utilizar en la secadora se precalienta con agua que ha sido calentada en el tornillo sinfín refrigerador y, a su vez, en el tornillo sinfín refrigerador se utiliza el mismo agua que ha sido enfriado en el intercambiador de calor donde se precalienta el aire.

En general, la realización del proyecto ha resultado realmente interesante. Ha servido para que el autor descubra un tema, como es la torrefacción, y unos conceptos que antes desconocía. Además, es la primera vez que el autor diseña la ingeniería básica de una planta, adquiriendo ya algunos conocimientos para el mundo laboral. Hay que destacar también la labor del tutor, que ha prestado su ayuda siempre que se le ha requerido, por lo que es de agradecer, además de haber guiado en todo momento la realización del proyecto.

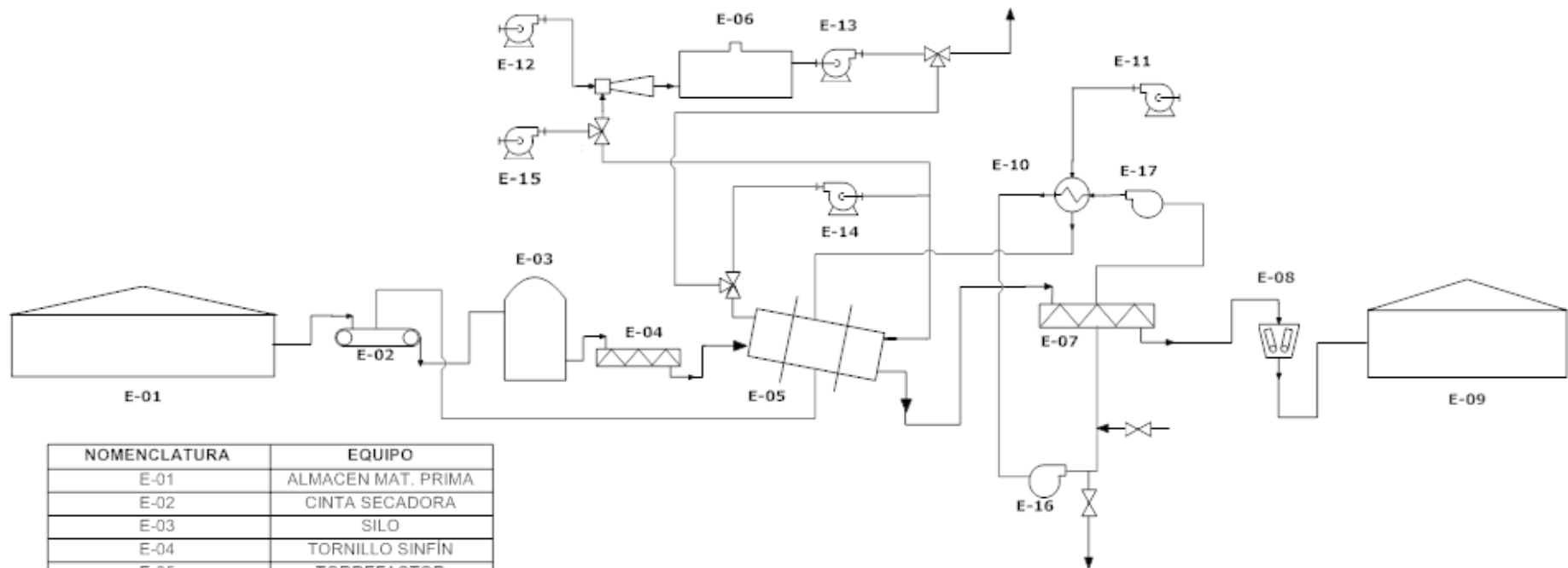
BIBLIOGRAFÍA

- P.C.A. Bergman, Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass, Energy research Centre of Netherlands (ECN), 2005.
- Bourgeois, J.P. and Guyonnet, R, “Characterisation and analysis of torrefied wood”, Wood Sci. Tech., 22, 1988.
- Di Blasi, C. and Lanzetta, M., “Intrinsic kinetics of isothermal xylan degradation in inert atmosphere”, J. Anal. Appl. Pyrolysis, 40-41, 1997.
- Felfli, F.F., Luengo, C.A., Bezzon, G. and Beaton Soler, P., Bench unit for biomass residues torrefaction, in Kopetz, H., Weber, T., Palz, W., Chartier, P. and Ferrero, G.L. (Eds.), Proc. 10th Eur. Conf. Biomass for Energy & Industry, Würzburg, Germany, June 8-11, 1998.
- Haygreen, J.G. and Bowyer, J.L., “Forest products and wood science, Iowa State Universty Press, Ames, 1987.
- Pach, M., Zanzi, R. and Bjørnbom, E., Torrefied biomass a substitute for wood and charcoal, 6th Asia-Pacific international symposium on combustion and energy Utilization, Kuala Lumpur, 2002.
- Ing. Renieur Abreu Naranjo, Utilización energética de la biomasa ligno-celulósica obtenida del *Dichrostachys cinerea* mediante procesos de termodescomposición, Università Politecnica delle Marche, 2012.
- Jaya Shankar Tumuluru, A Review on Biomass Torrefaction Process and Product Properties, Idaho National Laboratory, 2011.
- Jaap Koppejan, Procede Biomass, Netherlands; Shahab Sokhansanj, UBC, Canada; Staffan Melin, UBC, Canada; Sebnem Madrali, CanmetENERGY, Status overview of torrefaction technologies, Enschede, 2012.
- Mark J. Prins, Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction, Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2005.

ANEXO I: PLANOS Y DIAGRAMAS

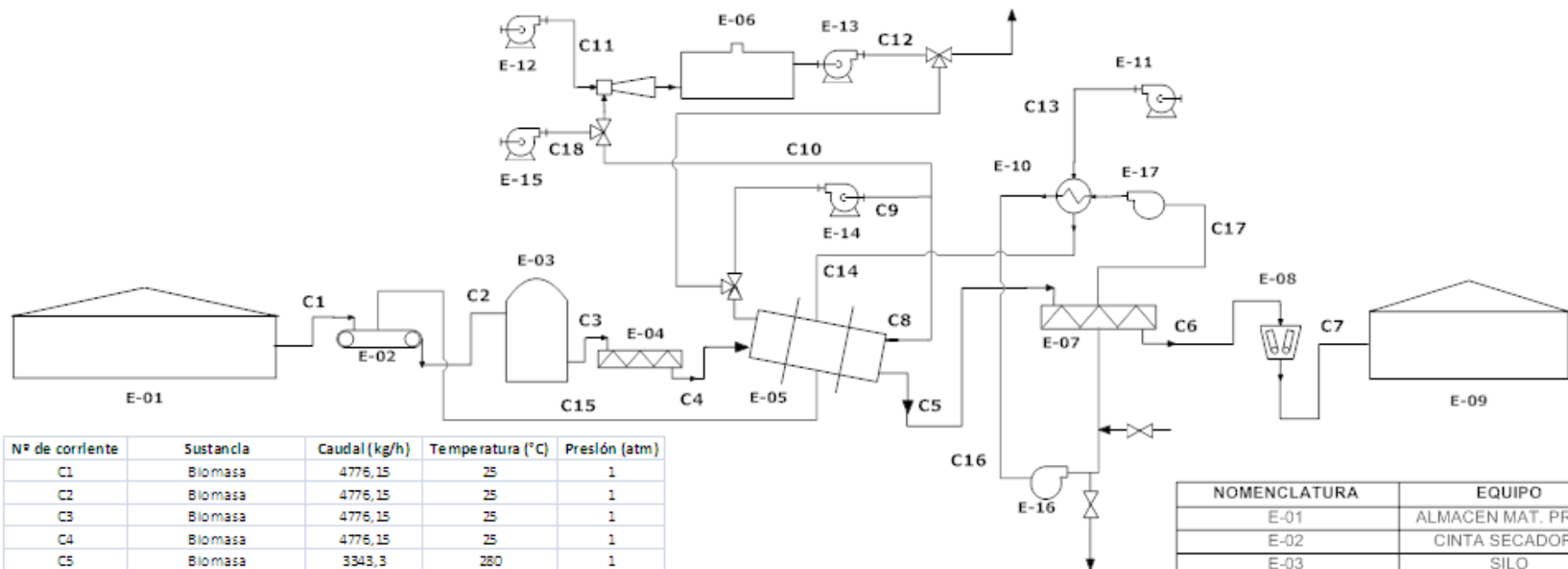
En este anexo se adjuntan los planos y diagramas que se han realizado para el diseño de la planta. Los planos que se han hecho para esta ingeniería básica son tres:

- Plano 1: Diagrama del proceso
- Plano 2: Diagrama de flujo del proceso
- Plano 3: P&ID



NOMENCLATURA	EQUIPO
E-01	ALMACEN MAT. PRIMA
E-02	CINTA SECADORA
E-03	SILO
E-04	TORNILLO SINFIN
E-05	TORREFACTOR
E-06	OXIDADOR TÉRMICO
E-07	TORNILLO SINFIN REFRIGERADOR
E-08	PELETIZADORA
E-09	ALMACÉN PROD. FINAL
E-10	INT. DE CALOR
E-11, E-12, E-13, E-14, E-15	SOPLANTE
E-16, E-17	BOMBA

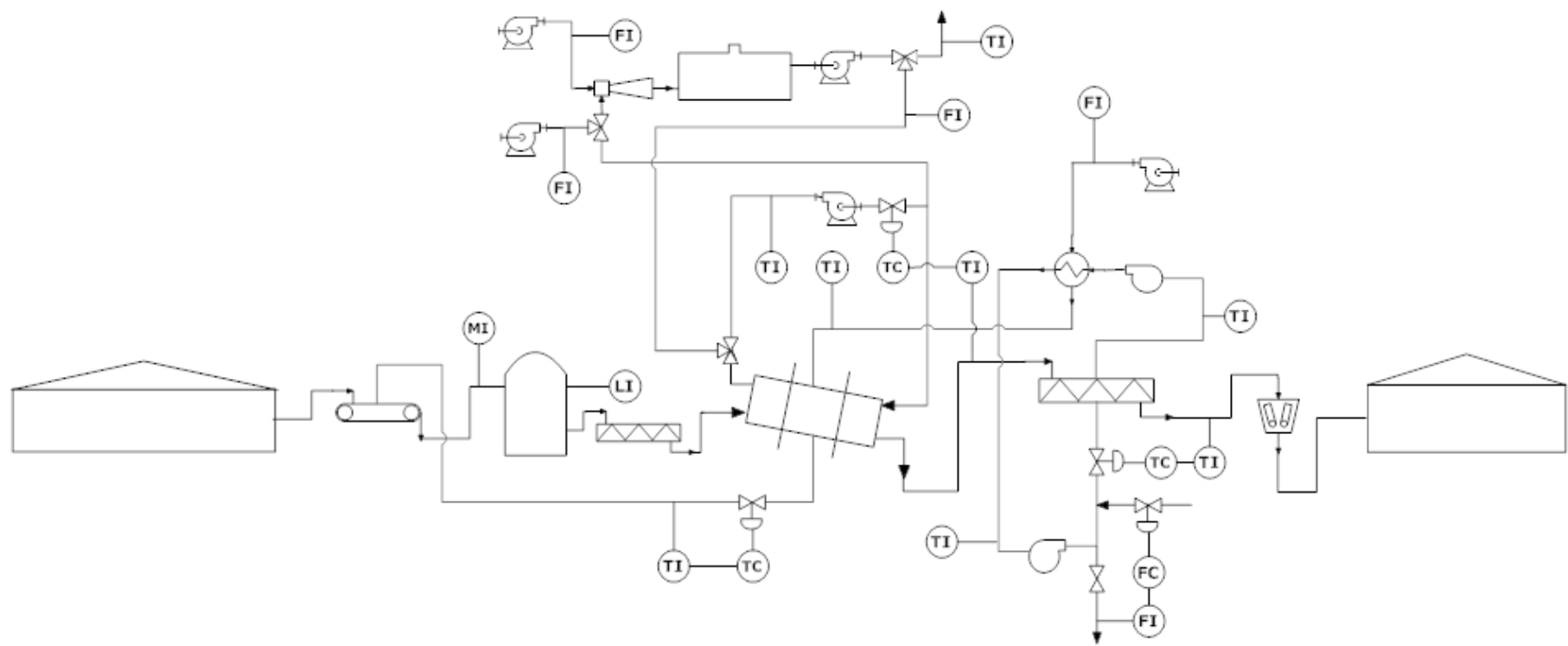
Plano 1. Diagrama del proceso



Nº de corriente	Sustancia	Caudal (kg/h)	Temperatura (°C)	Presión (atm)
C1	Biomasa	4776,15	25	1
C2	Biomasa	4776,15	25	1
C3	Biomasa	4776,15	25	1
C4	Biomasa	4776,15	25	1
C5	Biomasa	3343,3	280	1
C6	Biomasa	3343,3	89,2	1
C7	Biomasa	3343,3	89,2	1
C8	Gases de torrefacción	2128,27	280	1
C9	Gases de torrefacción	696,42	280	1
C10	Gases de torrefacción	1432,85	280	1
C11	Aire	9203,44	25	1
C12	Gases de combustión	10535,92	900	1
C13	Aire	16380	25	1
C14	Aire	16380	83,15	1
C15	Aire	16380	120	1
C16	Agua	3528	30	1
C17	Agua	3528	95	1
C18	Gas Natural	-	25	1

NOMENCLATURA	EQUIPO
E-01	ALMACÉN MAT. PRIMA
E-02	CINTA SECADORA
E-03	SILO
E-04	TORNILLO SINFIN
E-05	TORREFACTOR
E-06	OXIDADOR TÉRMICO
E-07	TORNILLO SINFIN REFRIGERADOR
E-08	PELETIZADORA
E-09	ALMACÉN PROD. FINAL
E-10	INT. DE CALOR
E-11, E-12, E-13, E-14, E-15	SOPLANTE
E-16, E-17	BOMBA

Plano 2. Diagrama de flujo



Plano 3. P&ID

ANEXO II: HOJAS DE ESPECIFICACIONES

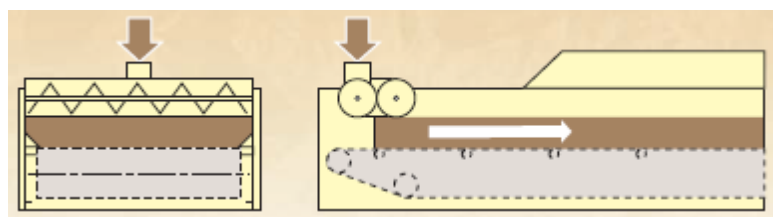
Este anexo contiene las hojas de especificaciones de los equipos utilizados en la planta.

En ellas se detallan los parámetros y datos más importantes de cada equipo del proceso. Algunos de estos datos han sido calculados y otros han sido obtenidos de catálogos.

Primero se incluyen las hojas de especificaciones de los equipos más importantes del proceso y después de los equipos auxiliares.

SUPERFICIE CUBIERTA DE ALMACENAMIENTO DE MATERIA PRIMA	
PROYECTO	Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa
SERVICIO	Almacenar las astillas y restos de madera procedentes de aserraderos
ESPECIFICACIONES	
SUPERFICIE	3750 m ² (75 x 50 m)
MODO DE ALMACENAMIENTO	A granel en montones con forma de prisma triangular colocado horizontalmente
Nº DE MONTONES	7
ALTURA DE MONTÓN	2.5 m
ANCHURA DE MONTÓN	5 m
LONGITUD DE MONTÓN	61.15 m
Nº DE PASILLOS	8
ANCHURA DE PASILLO	1.5 m
LONGITUD DE PASILLO	61.15 m
ALTURA DE CUBIERTA	8 m
TIEMPO MÁX. DE ALMACENAMIENTO	1 semana
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
SUPERFICIE	Hormigón
ESTRUCTURA	Acero laminado A-42b
CUBIERTA	Chapa de acero recubierta de lana de vidrio
CROQUIS	
<p>Vista aérea de la disposición de los montones en caso de ocupar toda la superficie</p>	

SECADORA DE BANDA	
PROYECTO	Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa
SERVICIO	Reducir la humedad de la biomasa hasta un 10%
MARCA	KAHL
ESPECIFICACIONES	
HUMEDAD A LA ENTRADA	30%
HUMEDAD A LA SALIDA	10%
TEMPERATURA DE AIRE DE SECADO	120°C
ANCHURA DE LA CINTA	6 m
ANCHURA TOTAL	6.5 m
LONGITUD DE LA CINTA	11.52 m
LONGITUD TOTAL	15 m
Nº DE SECCIONES	4
LONGITUD DE UNA SECCIÓN	2.88 m
ALTURA DE CAPA MÁXIMA	300 mm
ALTURA TOTAL	3.5 m
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
CINTA	Tejido plástico
CROQUIS	



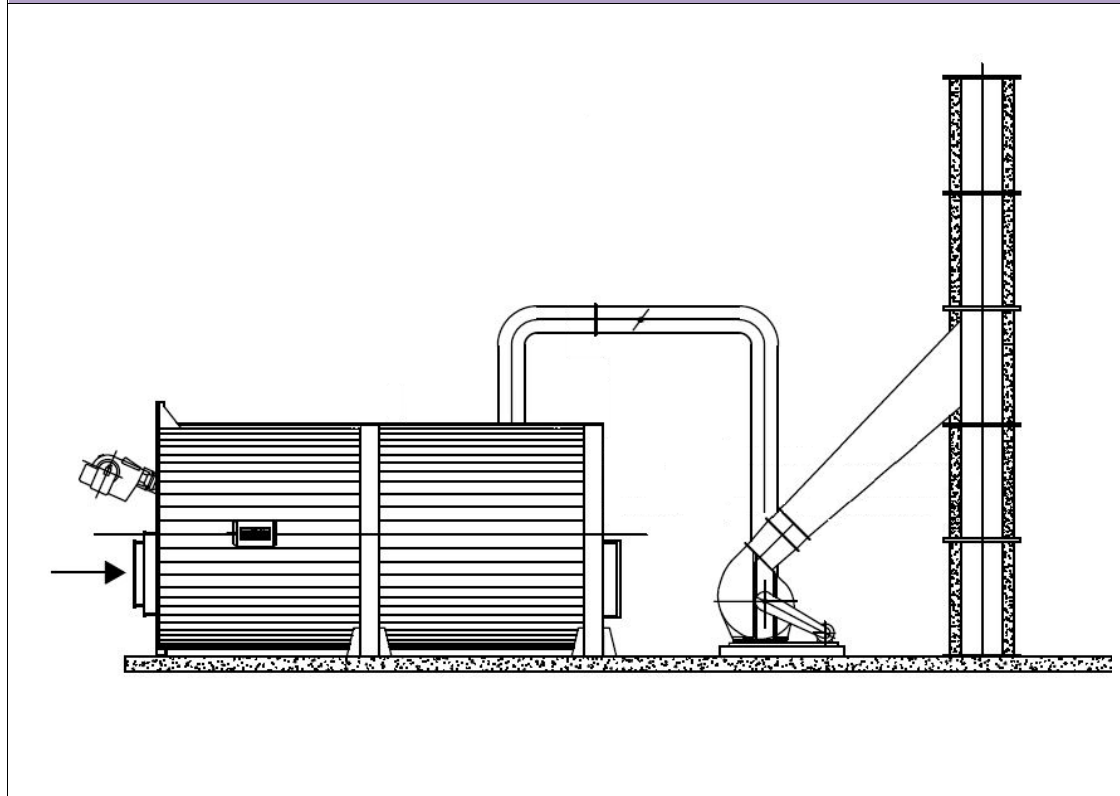
Vistas de la rosca de alimentación de la secadora

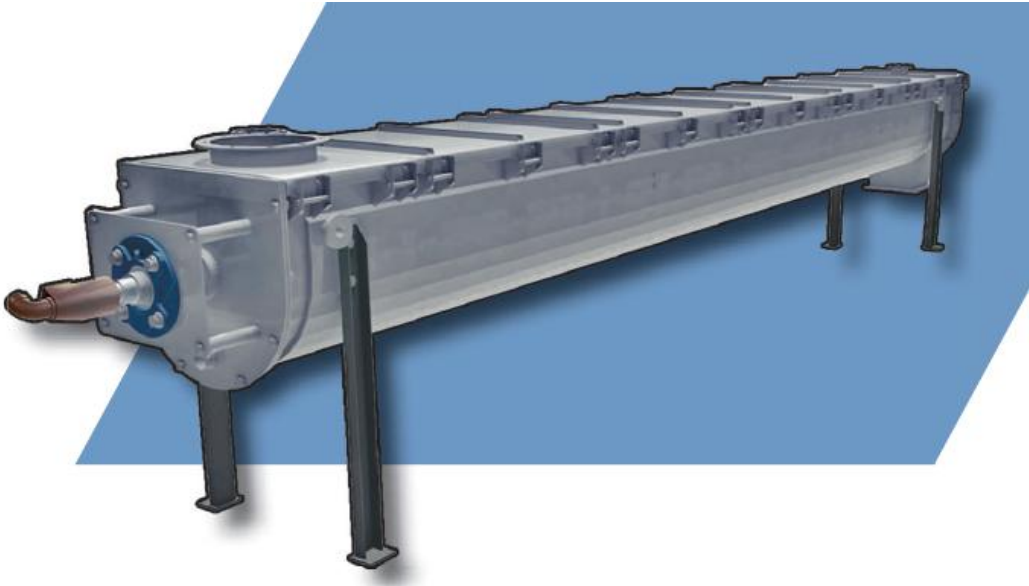
SILO DE ALMACENAMIENTO EN SECO	
PROYECTO	Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa
SERVICIO	Almacenar la biomasa procedente del secado antes del proceso de torrefacción
MARCA	TAMA GROUP
ESPECIFICACIONES	
VOLUMEN	535 m ³
ALTURA	25 m
DIÁMETRO	5.2 m
ACCESORIOS	Sistema de transporte neumático, cámara de filtración, cobertura con barandilla, puerta de acceso a la cámara de filtración y depósito de sólido, compuertas antiexplosión, cristales plexiglass para controles de nivel, escala externa con protecciones, predisposiciones para admisión y expulsión de gases, extractor de ballestas y válvula rotativa
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
SILO	Acero inoxidable AISI 304
ESTRUCTURA	Acero inoxidable AISI 409
IMAGEN	




TORREFACTOR	
PROYECTO	Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa
SERVICIO	Llevar a cabo el proceso de torrefacción
ESPECIFICACIONES	
VOLUMEN	95.523 m ³
FORMA	Cilíndrica
LONGITUD	13.51 m
DIÁMETRO	3 m
INCLINACIÓN	10°
TEMPERATURA	280°C
TIEMPO DE RESIDENCIA	3 h
PRESIÓN	1 atm
VELOCIDAD DE GIRO	5 rpm
ACCESORIOS	Camisa de refrigeración, esclusas a la entrada y la salida, motor reductor y sistema de limpieza y mantenimiento
MATERIAL A TORREFACTAR	Restos y astillas de madera con un 10 % de humedad
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
REACTOR	Acero inoxidable AISI 310
CROQUIS	


OXIDADOR TÉRMICO	
PROYECTO	Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa
SERVICIO	Eliminar los componentes volátiles orgánicos producidos en la torrefacción para emitirlos a la atmósfera
ESPECIFICACIONES	
VOLUMEN	19.68 m ³
FORMA	Cilíndrica
LONGITUD	8 m
DIÁMETRO	1.77 m
TEMPERATURA	700-1200°C
TIEMPO DE RESIDENCIA	0.6-2 s
PRESIÓN	1 atm
ACCESORIOS	Mezclador de inducción atmosférica con quemador de corona
COMBUSTIBLE	Gases de torrefacción
COMBURENTE	Aire
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
PARED EXTERIOR	Acero inoxidable AISI 310
PARED INTERIOR	Material refractario
CROQUIS	




TORNILLO SINFÍN REFRIGERADOR	
PROYECTO	Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa
SERVICIO	Transportar la biomasa torrefactada hasta la peletizadora y disminuir su temperatura hasta por debajo de los 100°C
MARCA	ETiA
MODELO	UPK-C600
ESPECIFICACIONES	
MATERIAL A ENFRIAR	Biomasa torrefactada
FLUIDO REFRIGERADOR	Agua
TIPO	Matriz Anular
LONGITUD	9 m
ÁREA DE INTERCAMBIO	27.20 m ²
COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR	50 W/m ² °C
POTENCIA	204.9 kW
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
TORNILLO	Acero inoxidable AISI 316
IMAGEN	
	

PELETIZADORA	
PROYECTO	Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa
SERVICIO	Producir pelets de biomasa torrefactada
MARCA	KMEC
MODELO	KMPM508
ESPECIFICACIONES	
CAUDAL A PROCESAR	1500-2000 kg/h
DENSIDAD DE LOS PELETS	800 kg/m ³
LONGITUD	2990 mm
ALTURA	2410 mm
ANCHURA	1200 mm
POTENCIA	136.5 kW
PESO	4500 kg
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
TORNILLO	Acero inoxidable AISI 316
IMAGEN	
 <p>The image shows a large, industrial-grade biomass pellet mill. The machine is primarily painted in a bright green color. It features a long, horizontal hopper at the top for feeding biomass. Below the hopper is the main processing chamber, which is cylindrical and has a red protective cover on its front. To the right of the processing chamber is a large blue electric motor. The entire unit is mounted on a sturdy, four-legged green metal frame. There are various pipes, valves, and electrical connections visible on the machine's surface.</p>	

SUPERFICIE CUBIERTA DE ALMACENAMIENTO DE PRODUCTO FINAL	
PROYECTO	Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa
SERVICIO	Almacenar los pelets de biomasa torrefactada producidos en la planta
ESPECIFICACIONES	
SUPERFICIE	2000 m ² (32 x 62.5 m)
MODO DE ALMACENAMIENTO	A granel en montones con forma de prisma triangular colocado horizontalmente
Nº DE MONTONES	4
ALTURA DE MONTÓN	2.5 m
ANCHURA DE MONTÓN	5 m
LONGITUD DE MONTÓN	56.2 m
Nº DE PASILLOS	5
ANCHURA DE PASILLO	1.5 m
LONGITUD DE PASILLO	56.2
ALTURA DE CUBIERTA	8 m
TIEMPO MÁX. DE ALMACENAMIENTO	2 semanas
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
SUPERFICIE	Hormigón
ESTRUCTURA	Acero laminado A-42b
CUBIERTA	Chapa de acero recubierta de lana de vidrio
CROQUIS	
<p>Vista aérea de la disposición de los montones en caso de ocupar toda la superficie</p>	

TORNILLO SIN FÍN TRANSPORTADOR	
PROYECTO	Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa
SERVICIO	Transportar la biomasa desde el silo hasta el reactor
ESPECIFICACIONES	
CAUDAL A PROCESAR	4776.15 kg/h
LONGITUD	9.08 m
INCLINACIÓN	15°
POTENCIA	434 kW
ALTURA ALCANZADA	2.35 m
REDUCCIÓN DE CAPACIDAD	26%
MATERIAL A TRANSPORTAR	Restos y astillas de madera
FACTOR DE FRICCIÓN	2,5
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
TORNILLO	Acero inoxidable
IMAGEN	
	

INTERCAMBIADOR DE CALOR	
PROYECTO	Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa
SERVICIO	Precalentar el aire de secado
ESPECIFICACIONES	
FLUIDO FRÍO	Aire (De 25° a 83.15°C)
FLUIDO CALIENTE	Agua (De 95°C a 30°C)
ÁREA DE TRANSFERENCIA	223.6 m ²
TIPO DE INTERCAMBIADOR	Carcasa y tubos
COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR	150 W/m ² °C
DTLM	7.91°C
CALOR INTERCAMBIADO	266.27 kW
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
INTERCAMBIADOR	Acero al carbono
CROQUIS	

BOMBA	
PROYECTO	Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa
SERVICIO	Impulsar el agua en el circuito de agua existente entre el intercambiador y el tornillo sinfín refrigerador
MARCA	Salvador Escoda, S.A.
MODELO	U3-100/5T (Serie Ultra)
ESPECIFICACIONES	
FLUIDO A PROCESAR	Agua
CAUDAL A PROCESAR	3.53 m ³ /h
POTENCIA	0.74 kW
ALTURA MÁXIMA	25 m.c.a.
PRESIÓN MÁXIMA ADMITIBLE	10 bar
DNA	1"
DNI	1"
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
BOMBA	Acero inoxidable AISI 304
IMAGEN	
	

SOPLANTE 1	
PROYECTO	Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa
SERVICIO	Impulsar aire para el secado
MARCA	Atlas Copco
MODELO	ZM-143
ESPECIFICACIONES	
FLUIDO A PROCESAR	Aire
CAUDAL A PROCESAR	14890.9 m ³ /h
POTENCIA	299 kW
NÚMERO DE ETAPAS	1 a 8
BRIDA DE ENTRADA	DN450/ 18"
BRIDA DE DESCARGA	DN450 / 14"
RANGO DE FLUJO	5946 - 22936 m ³ /h
PRESIÓN MÁXIMA	1380 mbar
VACÍO MÁXIMO	576 mbar
RANGO DE POTENCIA	30 - 522 kW
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
CARCASA	Hierro fundido
PALETAS GUIA	Acero inoxidable
EJE	Acero al carbono

SOPLANTE 2	
PROYECTO	Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa
SERVICIO	Recircula parte de los gases de torrefacción al reactor
MARCA	Atlas Copco
MODELO	ZM-61
ESPECIFICACIONES	
FLUIDO A PROCESAR	Gases de torrefacción
CAUDAL A PROCESAR	998.82 m ³ /h
POTENCIA	21.13 kW
NÚMERO DE ETAPAS	1 a 9
BRIDA DE ENTRADA	DN175/ 6"
BRIDA DE DESCARGA	DN175 / 6"
RANGO DE FLUJO	680 - 3378 m ³ /h
PRESIÓN MÁXIMA	760 mbar
VACÍO MÁXIMO	339 mbar
RANGO DE POTENCIA	4 - 149 kW
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
CARCASA	Hierro fundido
PALETAS GUIA	Acero inoxidable
EJE	Acero al carbono

SOPLANTE 3	
PROYECTO	Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa
SERVICIO	Introducir aire en el oxidador térmico
MARCA	Atlas Copco
MODELO	ZM-126
ESPECIFICACIONES	
FLUIDO A PROCESAR	Aire
CAUDAL A PROCESAR	7755 m ³ /h
POTENCIA	174 kW
NÚMERO DE ETAPAS	1 a 9
BRIDA DE ENTRADA	DN300/ 12"
BRIDA DE DESCARGA	DN300 / 12"
RANGO DE FLUJO	1699 - 14017 m ³ /h
PRESIÓN MÁXIMA	970 mbar
VACÍO MÁXIMO	475 mbar
RANGO DE POTENCIA	19 - 373 kW
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
CARCASA	Hierro fundido
PALETAS GUIA	Acero inoxidable
EJE	Acero al carbono

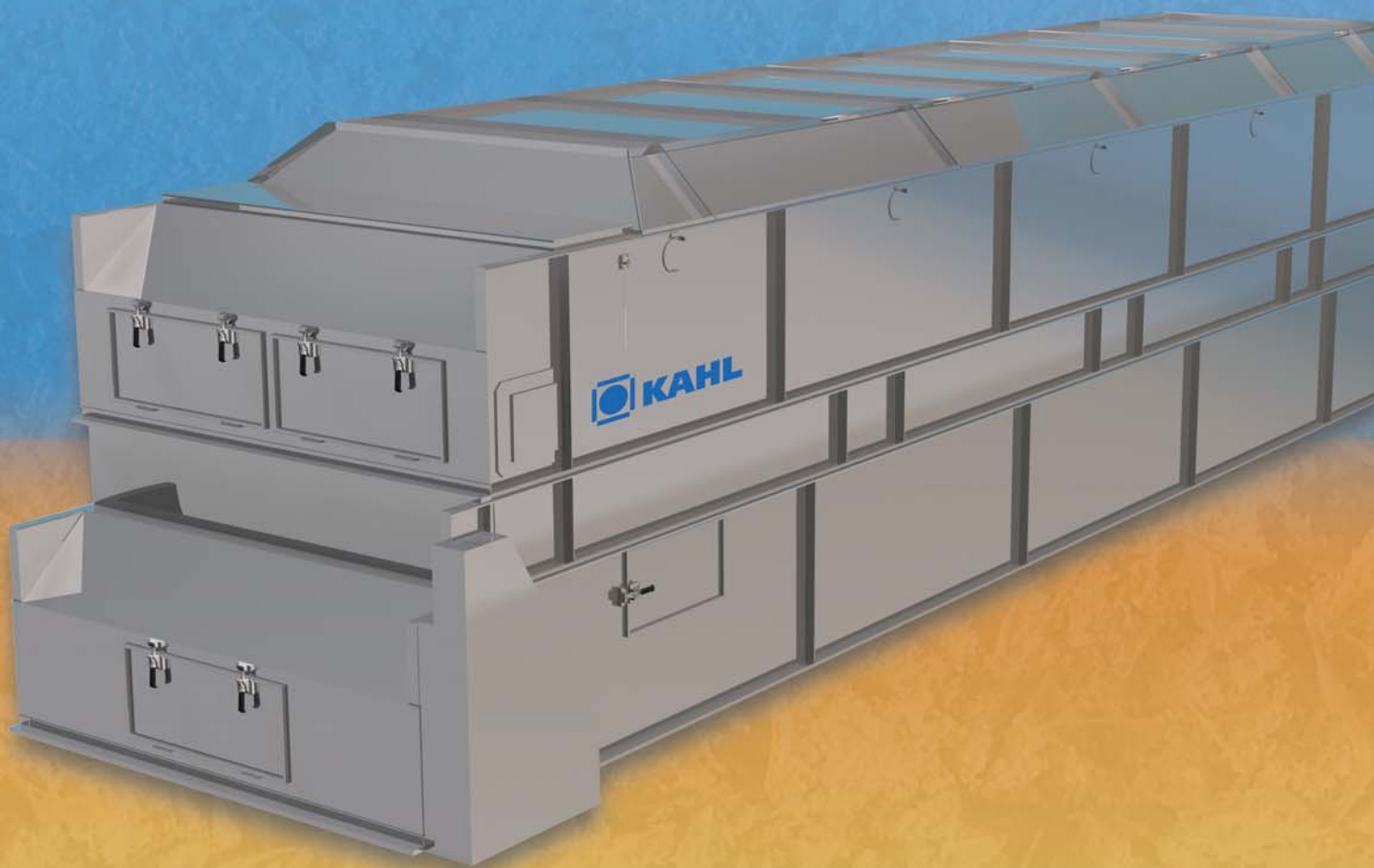
SOPLANTE 4	
PROYECTO	Ingeniería básica de una planta de torrefacción de biomasa
SERVICIO	Impulsar los gases de combustión hacia la chimenea
MARCA	Atlas Copco
MODELO	ZM-187
ESPECIFICACIONES	
FLUIDO A PROCESAR	Gases de combustión
CAUDAL A PROCESAR	35585.7 m ³ /h
POTENCIA	1242 kW
NÚMERO DE ETAPAS	1 a 8
BRIDA DE ENTRADA	DN500/ 20"
BRIDA DE DESCARGA	DN500 / 18"
RANGO DE FLUJO	3398 - 37378 m ³ /h
PRESIÓN MÁXIMA	1240 mbar
VACÍO MÁXIMO	576 mbar
RANGO DE POTENCIA	112 - 1305 kW
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
CARCASA	Hierro fundido
PALETAS GUIA	Acero inoxidable
EJE	Acero al carbono

ANEXO III: CATÁLOGOS

En este anexo se adjuntan los catálogos utilizados para el diseño de algunos de los equipos de la planta.

Secadores/enfriadores de cinta

diseñados para altas cargas permanentes



Diseño de los secadores

Unidades de cinta de KAHL para secar y enfriar

AMANDUS KAHL tiene muchos años de experiencia en el dimensionamiento, planificación, diseño y puesta en marcha de secadores y enfriadores de cinta.

Un secador de cinta y un simulador de secador de cinta están disponibles en nuestra planta piloto para hacer ensayos.

Si las unidades de cinta de KAHL son utilizadas para enfriar, el enfriamiento se realiza en dos procedimientos físicos:

- Enfriamiento por convección = cambio de calor entre producto y aire
- Enfriamiento por evaporación = extracción de agua del producto

El enfriamiento/secado se realiza según el principio de corriente transversal y de contracorriente, en dependencia del número de cintas.

Al secar, el aire caliente fluye por el producto desde abajo o arriba transversalmente al sentido de marcha de las cintas transportadoras. Durante su paso, el aire absorbe más y más humedad asegurando un secado cuidadoso del producto.

Debido a su diseño modular, las unidades se pueden componer de manera óptima para cada tamaño de planta requerido.



Formas de producto:

- Migajas
- Gránulos (pellets)
- Briquetas
- Productos en trozos
- Productos polvorosos
- Productos expandidos
- Productos pastosos
- Productos extruidos
- Productos a granel

Sectores industriales:

- Piensos compuestos
- Azúcar
- Alimentos
- Reciclaje
- Eliminación
- Química
- Cerveceros
- Industria de energía
- Agricultura
- Biomasa

Polipropileno

Salvado de avena

Polvo de boletos comestibles

Virutas de madera, gránulos de madera

2 m² – 350 m² de superficie de proceso en diseño modular, alturas de capa de 30 a 300 mm

En sistema de construcción modular, los secadores/enfriadores de cinta(s) son compuestos en pequeñas y grandes unidades.

- Existe la posibilidad de una extensión posterior por prolongación o nuevos pisos, dependiendo del diseño.
- Varias anchuras estándares están disponibles.
- Suministramos también anchuras especiales.

Los parámetros para el diseño son por ejemplo el tipo de producto, cantidad, temperatura, humedad inicial, extracción de humedad, estado del aire de proceso, tipo de calentamiento.

El tiempo de retención del producto es determinado por la longitud de las cintas y la gama de regulación del accionamiento de cinta.

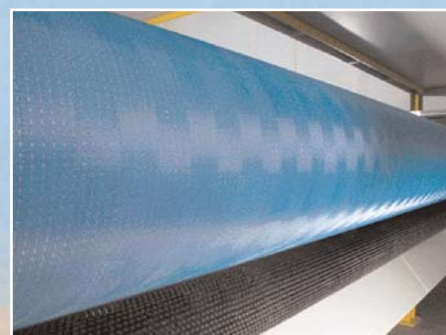
La cinta transportadora puede componerse de parrillas con agujeros oblongos fijadas con tornillos sobre las cadenas laterales de transporte. Estas parrillas son fácilmente cambiables. Los finos cayendo a través de los agujeros oblongos de las parrillas son transportados por cepillos hacia una salida separada y se descargan. Placas de lámina también están disponibles.

Secador de cinta textil

Otra posibilidad es utilizar una cinta de tejido plástico con mallas finas, que no sólo transporta el producto a secar a través del secador, sino también filtra el aire de salida.

Con este método, por ejemplo, se cumplen los límites legales de polvo en el aire de salida al secar virutas de madera.

El accionamiento se efectúa por motor-reductor-variador, que permite ajustar la altura de capa y el tiempo de retención.



Ejemplos de productos:

- | | | | |
|---|--------------------------------------|--|-------------------------------|
| ■ Piensos compuestos en gránulo o expandido | ■ Gránulos y pulpa seca de remolacha | ■ Acepilladuras | ■ Productos de carbón |
| ■ Piensos para mascotas | ■ Alfalfa | ■ Gránulos de lodos de depuración | ■ Briquetas de carbón vegetal |
| ■ Piensos para peces | ■ Cereales | ■ Gránulos de yeso de desulfuración de gas de humo | ■ Carbón activo |
| ■ Biomasa | ■ Umbelas de lúpulo | | ■ Productos reciclados |
| ■ Hierba picada | ■ Virutas de madera | | ■ etc. |

Mezcla expandida de sémola de trigo y de centeno



Basura doméstica



Piensos para ponedoras



Catalizador



Tecnología KAHL para enfriar y secar

Secar

Aire de proceso (por calentamiento directo o indirecto) pasa a través de una o más capas de producto. Temperatura del aire de proceso: hasta 200 °C.

Enfriar

Aire ambiente (o aire de proceso enfriado) pasa a través de una o más capas de producto.

Secar y enfriar

Ambos procesos se realizan en una sola máquina subdividida en secciones independientes de secado y de enfriamiento, equipada con los grupos de calentamiento y de enfriamiento correspondientes.

Secar y enfriar con aire de circulación

Debido a las cantidades inferiores de aire de salida del proceso de enfriamiento, de secado y del proceso combinado, los sistemas de circulación de aire causan una reducción de las emisiones y de las pérdidas de calor.

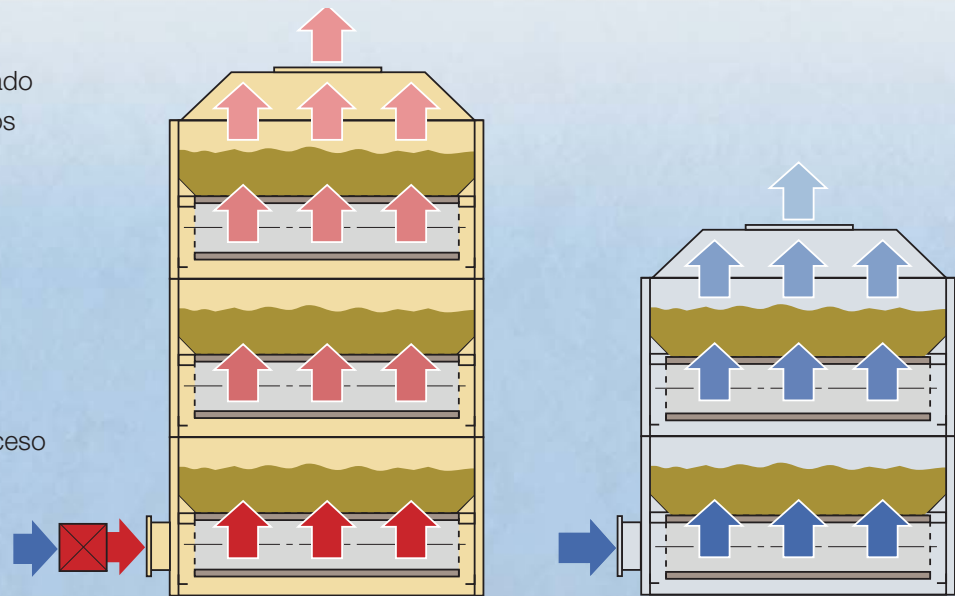
La cantidad proporcional de aire de circulación es ajustable. Por la disminución de la velocidad del proceso, los productos sensibles son tratados con cuidado.

Secar

El secado con aire de proceso de hasta 200 °C es apropiado para productos con alta humedad, que permiten una descarga a temperatura elevada, como por ej. cama de gatos, briquetas de carbón vegetal, fango de filtros, óxidos metálicos, etc.

Enfriar

El enfriamiento con aire ambiente es apropiado para todos los productos con humedad limitada a enfriar a bajas temperaturas de almacenamiento, como por ej. gránulos de piensos compuestos, productos expandidos, gránulos de pulpa seca de remolacha así como residuos plásticos, grafito, etc.



Subproducto de maíz

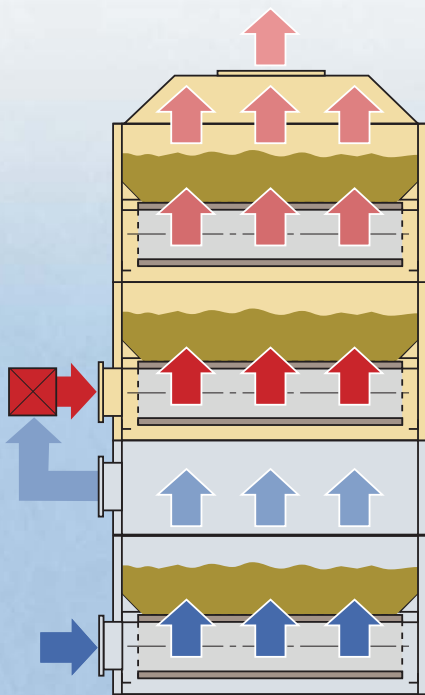
Pienso para mascotas

Expandido®

Grafito

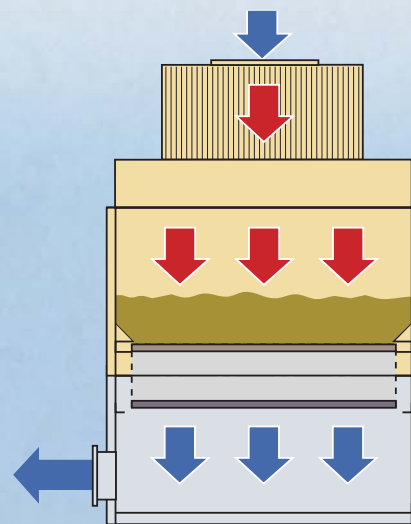
Secar y enfriar

El secado y enfriamiento son apropiados para productos con alta humedad a enfriar a bajas temperaturas de almacenamiento, como por ej. productos expandidos y extrusionados, productos tratados hidrotérmicamente, yeso de desulfuración de gas de humo, etc.



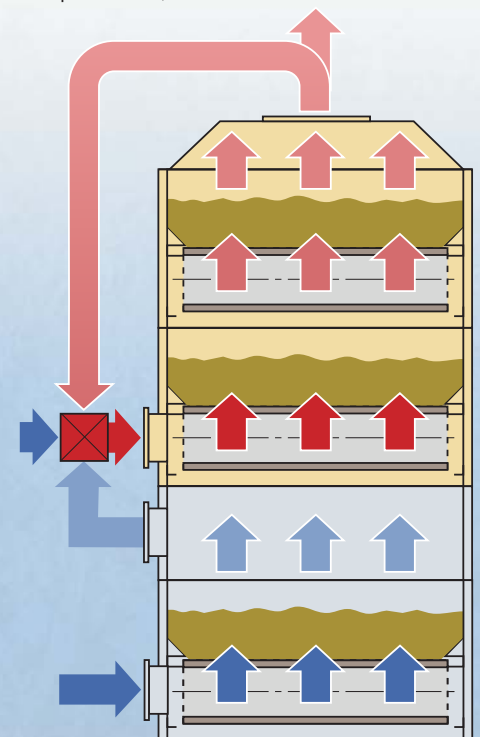
Secar con filtrado integrado del aire de salida

Ya que el aire caliente fluye desde arriba a través del producto a secar, se puede realizar una mayor velocidad de flujo. Además, la cinta de tejido plástico con mallas finas filtra el aire de salida. Un sistema de limpieza para esta cinta está integrado en el secador.



Secar/enfriar con aire de circulación

El secado y enfriamiento con aire de circulación son apropiados para el tratamiento cuidadoso con reducción simultánea de las emisiones de productos sensibles con baja temperatura final, como por ej. piensos para camarones, lodo de depuración, etc.



Gránulos de piensos especiales



Harina de maíz expandida



Piensos para ponedoras

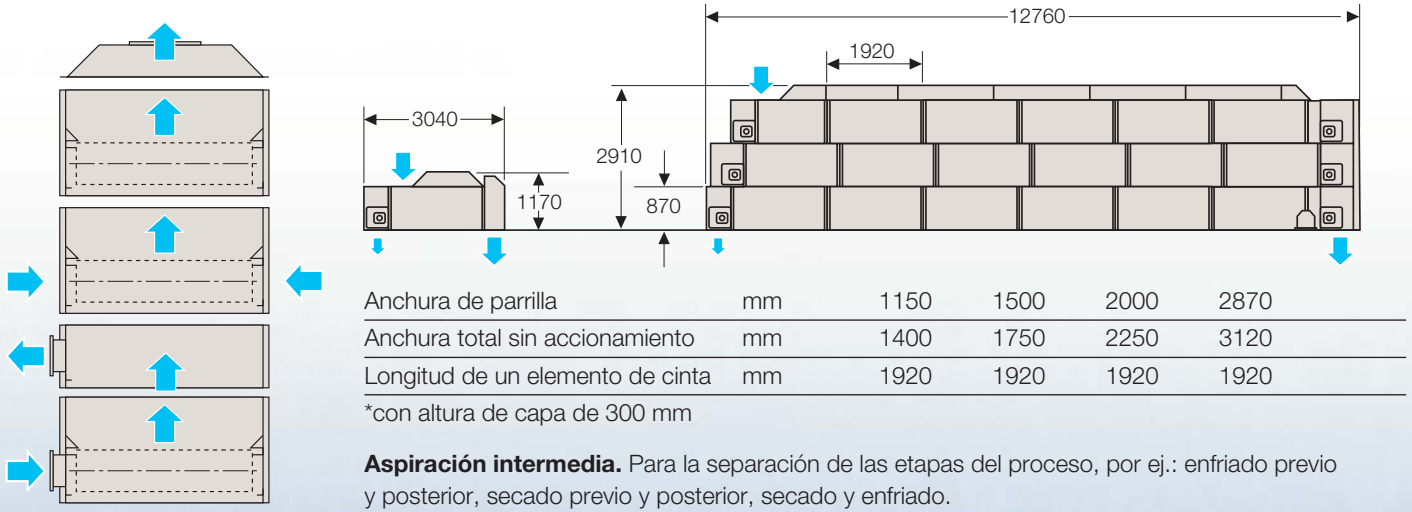


Gránulos de piensos para peces

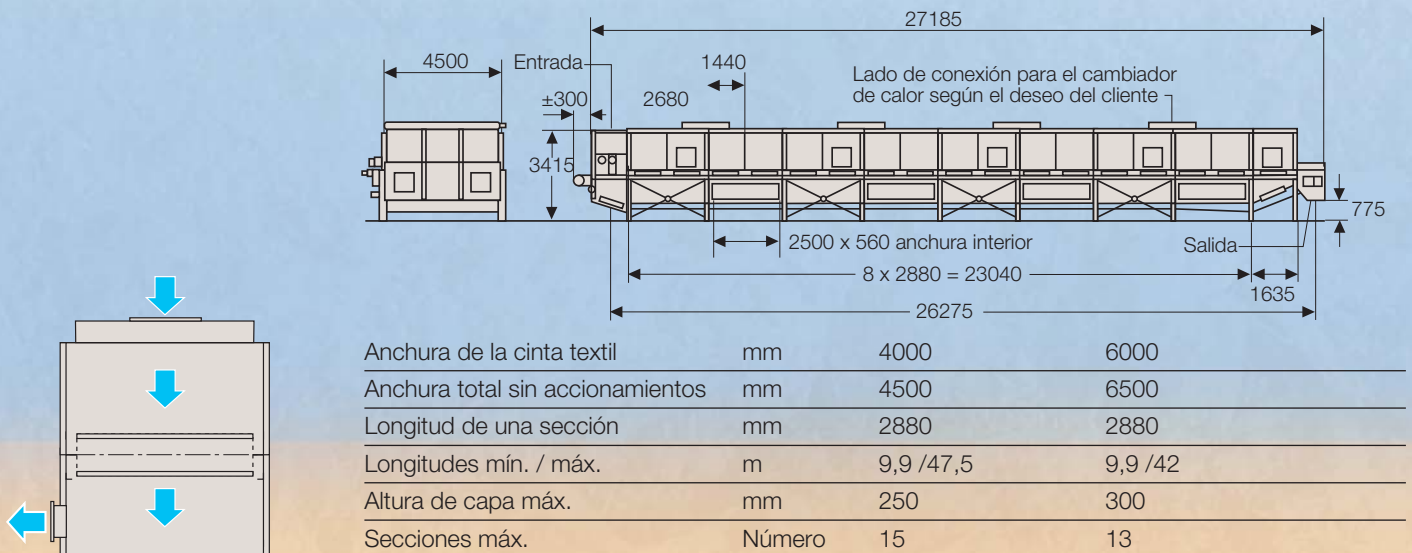


Variantes de equipo

Secadores/enfriadores de cinta para productos a granel con parrillas guiadas por cadena



Secadores/enfriadores con cintas de tejido plástico



Cinta de tejido plástico



Parrillas con agujeros oblongos



Cámara para secar y enfriar

Generación de aire caliente

- Calentamiento directo del aire
- Calentamiento indirecto del aire

Portadores de calor

- Calefacción
- Vapor
- Agua caliente
- Aceite térmico

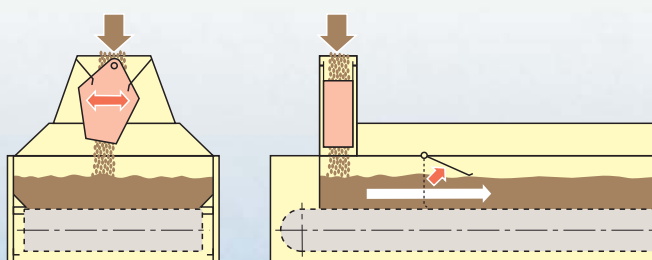
Accesorios y regulación

- Productos en contacto directo con el producto hechas de acero inoxidable
- Rastrillos de revolvimiento
- Trituradora de pedazos
- Caja de salida con indicador de acumulación
- Rosca de descarga de finos
- Indicador de altura de capa
- Teleindicador de altura de capa
- Regulador de temperatura para el aire de salida y/o el producto
- Monitor de velocidad / parada
- Mando de la velocidad de cinta
- Regulación de la altura de capa
- Mediciones en línea de la humedad del producto a la entrada y salida del secador así como mediciones de las temperaturas y - si fuera necesario - de la humedad del aire de salida en las secciones individuales proporcionan los parámetros requeridos para los posibles conceptos de mando y regulación
- Sistema de limpieza automática de las cintas
- Medición de la presión diferencial
- Sistema de extinción de incendios

Dispositivos de alimentación

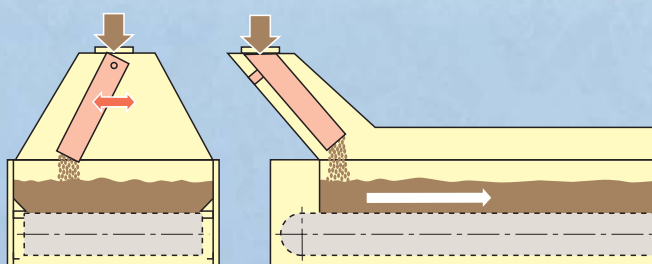
Caja giratoria

Para productos insensibles con altas alturas de capa.



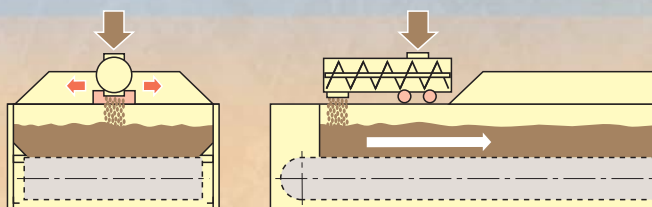
Resbaladera giratoria

Para productos sensibles con diferentes alturas de capa.



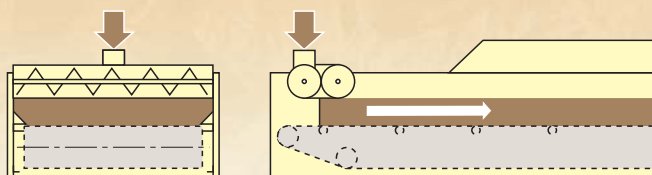
Rosca giratoria

Para productos insensibles con efecto de aflojamiento y de disolución de pedazos.



Sistema de roscas distribuidoras (secador de cinta textil)

Para los productos polvorientos, fibrosos para alturas de capa muy uniformes, sobre todo en el secador de cinta textil.

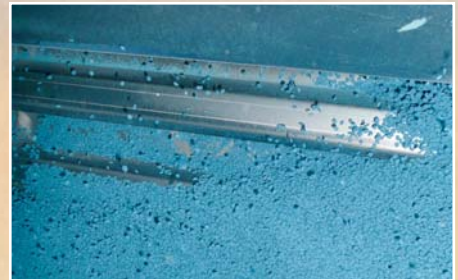
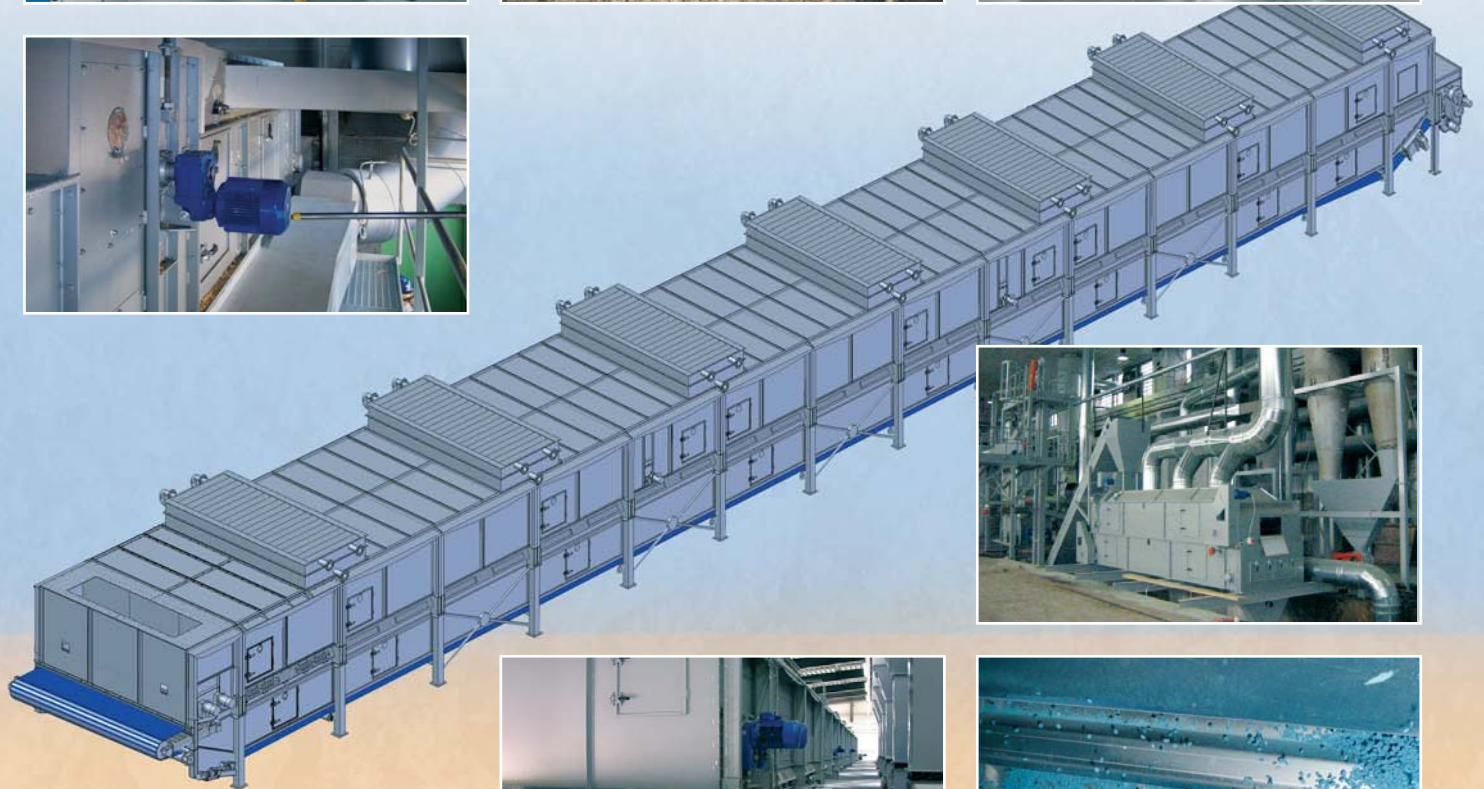
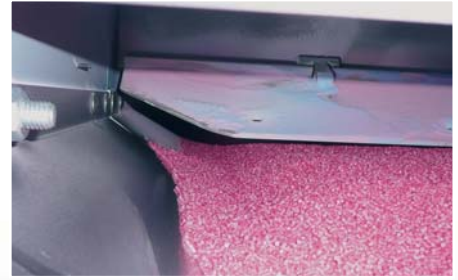


Diseños especiales

- Secadores/enfriadores hechos integralmente de acero inoxidable
- CARRY OVER (los finos son descargados juntos con los gránulos)
- Grandes puertas de inspección laterales y frontales
- Cinta textil

Más de 1.000 secadores/enfriadores de cinta KAHL trabajan en diversas aplicaciones técnicas en el mundo entero

Los secadores/enfriadores de KAHL son apropiados para una gran variedad de productos. Por ejemplo: gránulos, productos extruidos, Expandido®, aglomerados, productos pastosos, virutas de madera, biomasa y productos químicos.



AMANDUS KAHL GmbH & Co. KG
Dieselstrasse 5-9
D-21465 Reinbek / Hamburgo
Teléfono: +49 (0)40 727 71 - 0
Fax: +49(0)40 727 71 - 100

info@amandus-kaahl-group.de
www.akahl.de

DESCRIPTION

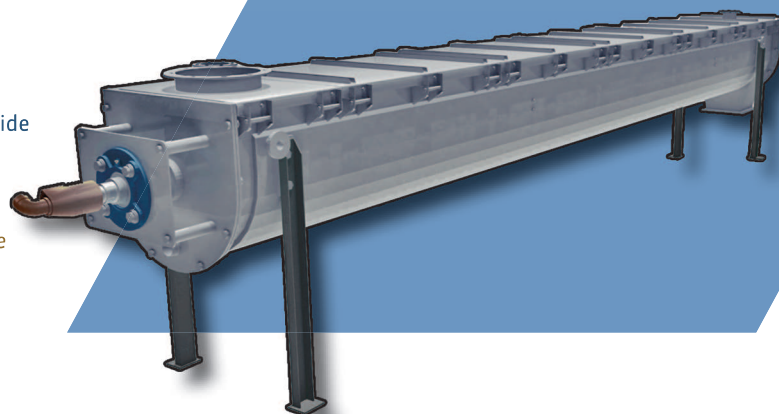
UPK-C® est une vis de refroidissement en continu des produits fibreux, en grains, pulvérulents, pâteux ou boueux... Elle assure une fonction de refroidissement par passage d'eau froide dans les vis et les doubles parois.

UPK-C® is a continuous cooling screw conveyor for bulks, powders, granulates, pasty or muddy products... The cooling function is accomplished through chilled water into the screw and double jacket.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES TECHNICAL FEATURES

Jusqu'à 6 m³/H
Longueur variable jusqu'à 9 000 mm
Coefficient d'échange jusqu'à 50 W/m²/°C
Température de refroidissement jusqu'à 4°C

*Up to 6 m³/H
Variable length up to 9 000 mm
Exchange coefficient up to 50 W/m²/°C
Cooling treatment temperature up to 4°C*



AVANTAGES

Refroidissement ultra-rapide
Nettoyage facile
Brassage parfait et traitement homogène garantis par pales

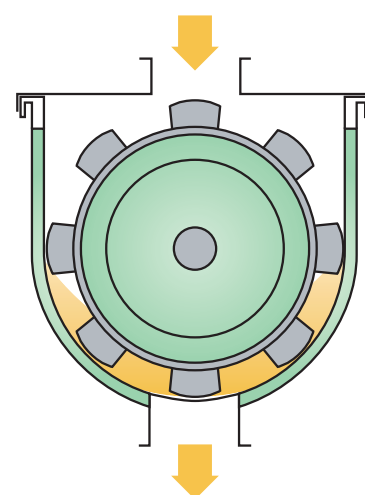
*Flash cooling
Easy cleaning
Perfect mixing and homogeneous treatment guaranteed by paddles*

MODÈLES MODELS	LONGUEUR LENGTH	SURFACE D'ÉCHANGE EXCHANGE SURFACE
UPK-C 300	3 000 mm	4,25 m²
UPK-C 300	4 000 mm	5,65 m²
UPK-C 300	5 000 mm	7,05 m²
UPK-C 400	4 000 mm	7,80 m²
UPK-C 400	5 000 mm	9,75 m²
UPK-C 400	6 000 mm	11,70 m²
UPK-C 400	7 000 mm	13,65 m²
UPK-C 600	6 000 mm	18,15 m²
UPK-C 600	7 000 mm	21,15 m²
UPK-C 600	8 000 mm	24,18 m²
UPK-C 600	9 000 mm	27,20 m²

OPTIONS

Calorifuge
Boîtier électrique
Nettoyage avec process CIP
Inox 316
Norme UL
Générateur d'eau glacée
Existe aussi en acier

*Heat-insulating
Electrical outlet
CIP cleaning process
Inox 316
UL Norm
Iced water generator
Also available in steel*



- Entrée/sortie du produit
Product inlet/outlet
- Fluide frigoporteur
Cold fluid
- Produit traité
Treated product
- Vis
Screw



Carrefour Jean Monnet
BP 20101 - 60201 Compiègne cedex
France

Tel. +33 3 44 86 44 20
Fax +33 3 44 86 27 86
Email contact@etia.fr

WWW.ETIA.fr

10 CENTRÍFUGA MULTICELULAR “Serie MS”



Código	Artículo	CV	Int (A)	Tensión (V)	€
	<ul style="list-style-type: none"> Cuerpo bomba y tapa cierre fabricado en acero inox AISI-304 y eje inox AISI-420 Protector termoamperimétrico incorporado Máxima aspiración 7 m.c.a Adecuado para grupos de presión hidroneumáticos, riegos de jardinería, transvases, chalets, viviendas 				
EB 10 002	MS 07	0,7	3,2	1x230	243,16
EB 10 004	MS 08	0,85	3,9	1x230	271,18

Tipo	Caudal m³/h									DNA	DNI
	0	0,6	1,2	1,8	2,4	3	3,6	4,2	4,8		
	Altura m.c.a										
MS-07	38	35	32	29	25	20	15	10		1"	1"
MS-08	50	47	42	38	35	29	22	15	10		

20 CENTRÍFUGAS EN ACERO INOX “Serie ULTRA”



Código	Artículo	A 1x230V	A 3x400V	CV	€
	<ul style="list-style-type: none"> Presión máx. admisible: 10 bar. Máx. aspiración 7 m.c.a. Cuerpo de bomba en acero AISI-304 (cromo-níquel) Adecuado para aguas limpias, fluidos no agresivos, presurización de viviendas, riego, servicios auxiliares de industria 				
EB 20 002	U3-100/5	4,8	-	1	307,97
EB 20 004	U3-120/6	5,6	-	1,2	364,80
EB 20 006	U3-150/7	7,1	-	1,5	508,04
EB 20 042	U3-100/5T	-	1,9	1	307,97
EB 20 044	U3-120/6T	-	2,6	1,2	356,71
EB 20 046	U3-150/7T	-	2,9	1,5	463,50
EB 20 062	U5-180/6T	-	3	1,8	457,32
EB 20 064	U5-200/7T	-	3,4	2	557,02
EB 20 082	U9-200/4	8,4	-	2	445,78
EB 20 084	U9-250/5	10,6	-	2,5	477,61
EB 20 092	U7-300/6T	-	5	3	469,68
EB 20 094	U9-200/4T	-	3,3	2	438,78
EB 20 096	U9-250/5T	-	4,3	2,5	474,83

Tipo		Caudal m³/h											DNA	DNI
1-	3-	0	0,6	1,2	1,8	2,4	3,6	4,8	6	7,2	8,4			
		Altura m.c.a.												
U3-100/5	U3-100/5T	52	49	45	41	36	25	14					1"	1"
U3-120/6	U3-120/6T	62	59	54	50	44	32	18						
U3-150/7	U3-150/7T	75	71	67	61	55	41	25						
U5-180/6	U5-180/6T	69	-	66	64,5	62	56	48	40	30	12			
U5-200/7	U5-200/7T	80	-	75	74	71	64	56	46	33,4	12	1 1/4"	1"	

Tipo		Caudal m³/h											DNA	DNI
1-	3-	0	2,4	3,6	4,8	6	7,2	8,4	9,6	11	14			
		Altura m.c.a.												
-	U7-300/6T	74	71	68	64	58,4	51	42	27				1"	1"
U9-200/4	U9-200/4T	47	44	43	42	40	38	36	32,4	28,4	13			
U9-250/5	U9-250/5T	59	56	55	52,4	50,4	48	45	40,5	35,5	16			

Atlas Copco

ZM Oil-free multistage centrifugal pressure and vacuum blowers



100 - 40,000 cfm / 2 - 24 psi / 5 - 3,600 hp
3 - 1160 m³/m / 100 - 1700 mbar / 4 - 2600 kW



Sustainable Productivity



A ZM for every application

Atlas Copco's ZM oil-free multistage centrifugal blowers are working successfully in thousands of installations around the world. These reliable blowers are ideal for applications ranging from air to gas and pressure to vacuum. The ZM can be equipped with all the necessary accessories such as motor, valves, filters and skid as well as local or networked control panels to ensure a complete working system. Ask our group to find a ZM blower system to meet your exact requirements.



ENVIRONMENTAL

RELIABILITY ENSURED

From water and wastewater applications to landfill gas recovery systems, Atlas Copco's years of experience, backed up by a strong global service network, ensure that ZM blowers meet all your environmental application requirements including basin aeration, digester gas, soil remediation, filter backwash systems and other processes



MINING

GLOBAL SERVICE

The ZM is a worldwide proven leader in mining applications such as reclaiming heavy metals from slurry in floatation cells, a leaching process or methane extraction. Our centrifugal blowers showcase their durability and reliability in the harshest of conditions with options to handle tough environments such as temperature, dust, high altitude, or long life with limited maintenance.



POWER INDUSTRY

READY-TO-USE

These innovative centrifugal blowers are ideal for applications such as flue gas desulphurization, oxidation air, and fluidized beds. When your application absolutely requires continuous operation the ZM is your preferred choice.



PETROCHEMICAL INDUSTRY

TOTALLY DEPENDABLE

Sulfur recovery, sour gas, thermal oxidation or refinery tail gas, the ZM's high reliability and low maintenance make it the perfect centrifugal blower for vital processes. ZM blowers meet the most exacting industry standards in the testing and documentation needs.



INDUSTRIAL

EXCEEDS YOUR EXPECTATIONS

A wide variety manufacturing applications can be served by the ZM. Pulp and paper, carbon black, printing, or blow off systems are a few of many strong examples of ZM being the preferred technology that will outperform your expectations



VACUUM APPLICATIONS

CLEAN AND DUST FREE

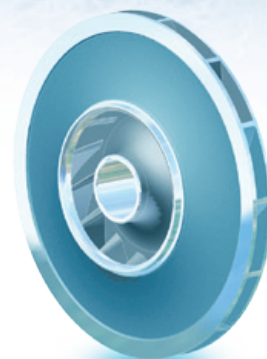
Pharmaceutical, breweries, and other food production facilities need clean and oil free environments. Central vacuum systems serve a variety of applications. ZM has the power to achieve their requirements



What makes the ZM special?

EFFICIENT

ZM oil-free multistage centrifugal blowers were developed using the most advanced technology available. Tools including 3D Modeling, Computational Fluid Dynamics and Finite Element Analysis were used at the design stage to pinpoint areas where we make improvements. The resulting modern and innovative design allows for increased efficiency, while the wide product range and configuration options ensure we can offer the best solution possible to meet your needs.



RELIABLE

The ZM blowers have earned the reputation of being “the most reliable blowers” in the industry. Even so, we still work to continually enhance the reliability of the ZM product line. In order to do this, we have made significant investments in the best people, facilities and equipment in the industry. Our commitment to Research and Development, Quality Control, and Product Testing, is driven by our desire to offer our customers the reliability they require in a variety of air and gas as well as pressure and vacuum applications.

LIMITED MAINTENANCE

You won't suffer from lengthy downtimes or process interruptions when your ZM is maintained. Service intervals are reduced to a minimum and maintenance is quick and simple. Maintenance points are easily accessible and basic repairs can be conducted with a minimum of time and materials offering you a low cost of ownership.



GLOBAL SERVICE SUPPORT

At Atlas Copco we place high value on outstanding customer service and are on call at all times to help with urgent situations. We pride ourselves in responding quickly to your requests for information and quotations. Contact your local Atlas Copco representative and find out how we can make a difference in your next project.

ZM centrifugal blowers: durability and performance

Atlas Copco's ZM centrifugal blowers are built to last. Solidly constructed out of premium components, they will run and run, with minimum maintenance requirements and unbeatable cost-effectiveness.

1

Casing —

Cast iron, ductile iron available
For low vibration

2

Guide Vanes —

Stainless steel guide vanes
Improve efficiency

3

Seals —

Gas or Air Seals
To protect the environment

4

Bearings —

10 year L10 minimum life
Less maintenance

5

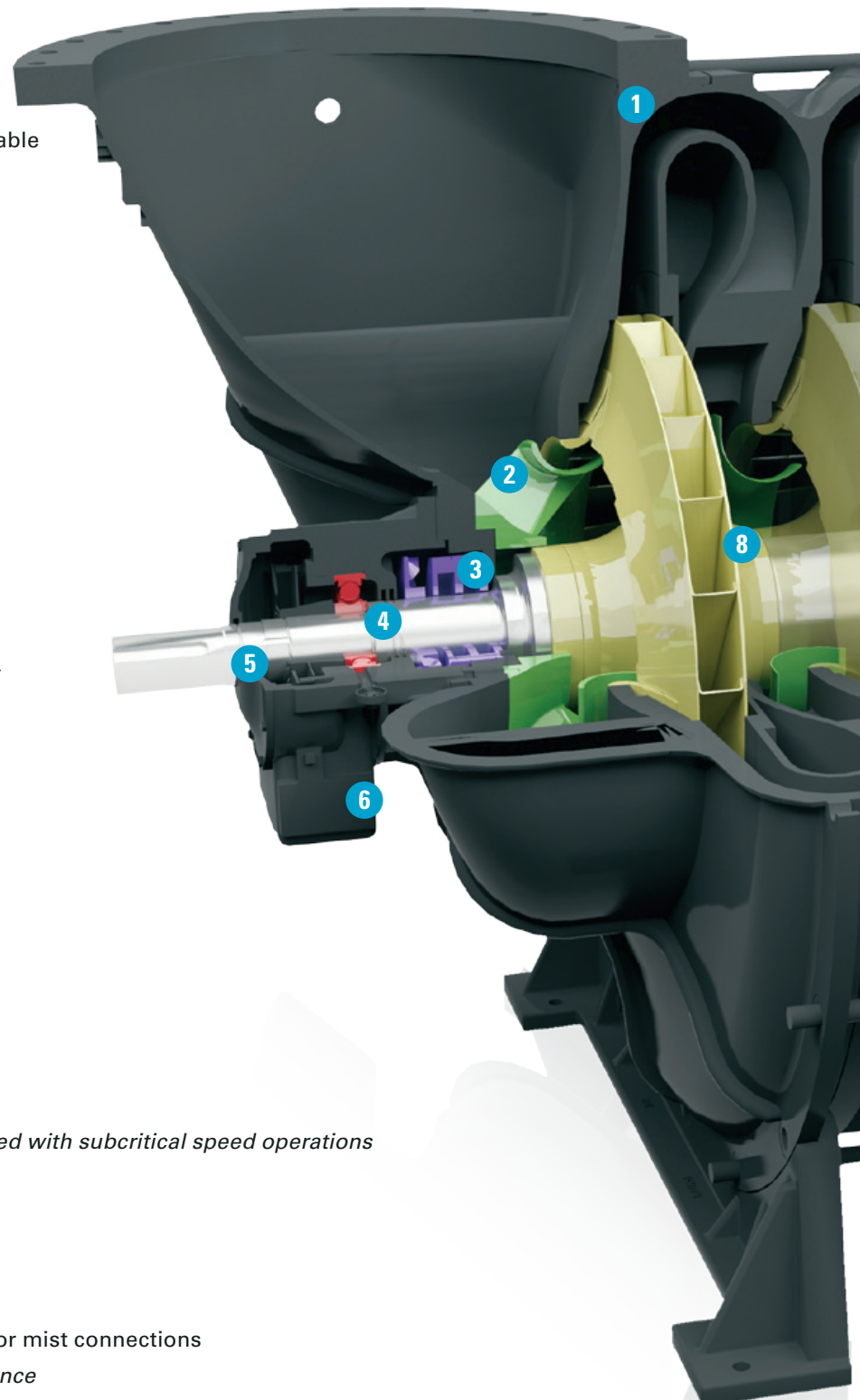
Shaft —

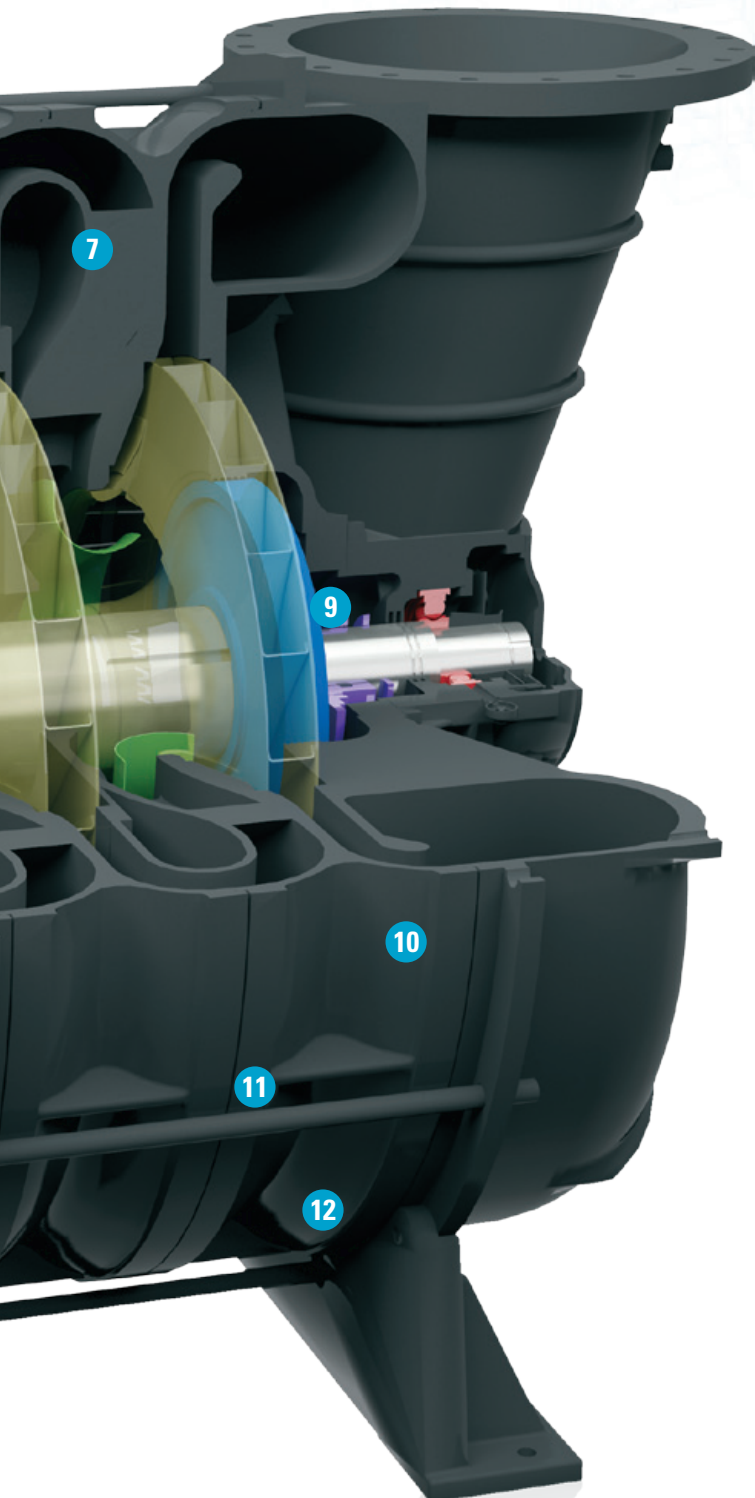
Carbon or stainless steel
Greater reliability is achieved with subcritical speed operations

6

Lubrication —

Self lubricated oil, grease, or mist connections
Low preventative maintenance





7

Turning Vanes —

Cast intermediate sections

Improved performance

8

Impellers —

Aluminum or stainless

Suitable for your application

9

Balance drum —

Improves bearing life

10

External coating —

Standard 2 coat epoxy

Custom available

Long life

11

Case Drains —

Optional

For harsh environments

12

Tie rods —

High strength steel

Engineered control solutions for all your needs

Atlas Copco understands that every application is different, which is why we offer controls that are easy to customize to your specific installation.

LOCAL CONTROL

The pre-engineered local controls for ZM blowers offer many options from standard analog controls to panels with full touch-screen interfaces. These panels protect the blower and motor from unexpected upsets in the system and can alarm or shut down the unit to prevent damage. They can also be programmed to communicate with almost any type of plant master control system.



ZM-IB 1100

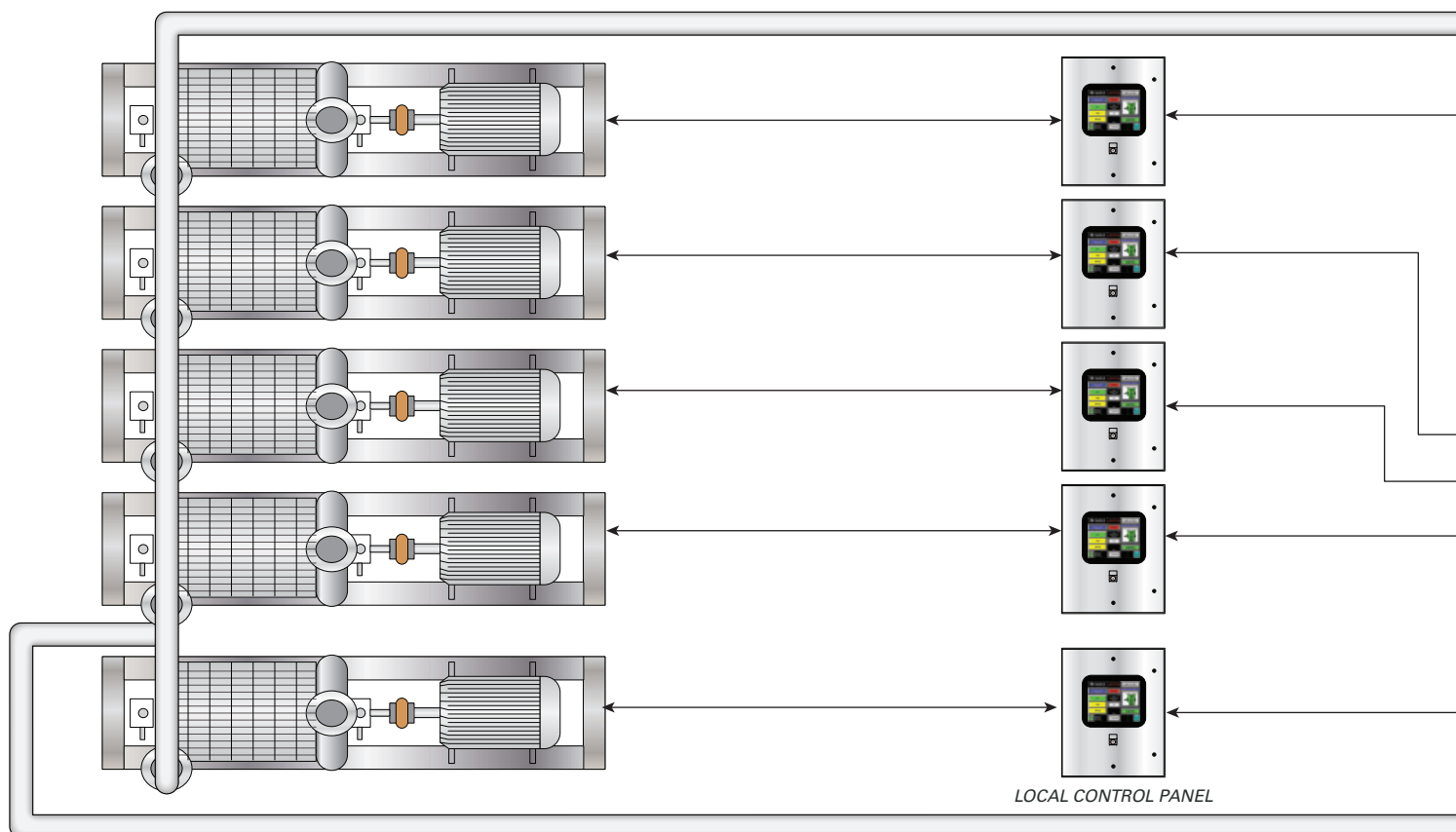
- PLC control
- Basic surge protection
- Bearing temperature and vibration monitoring

ZM-IB 2100

- PLC control with touch screen HMI
- Advanced surge protection
- Bearing temperature and vibration monitoring
- Flow regulation by:
 - inlet throttle valve
 - blow off valve
 - vacuum bleed valve
- Variable process input
 - flow/pressure
 - dissolved oxygen
 - user defined

ZM-IB 3100

- PLC control with touch screen HMI
- Advanced dynamic surge protection
- Bearing temperature and vibration monitoring
- Flow regulation by variable speed drive control
- Variable process input
 - flow/pressure
 - dissolved oxygen
 - user defined
- SCADA interface



PROCESS CONTROL

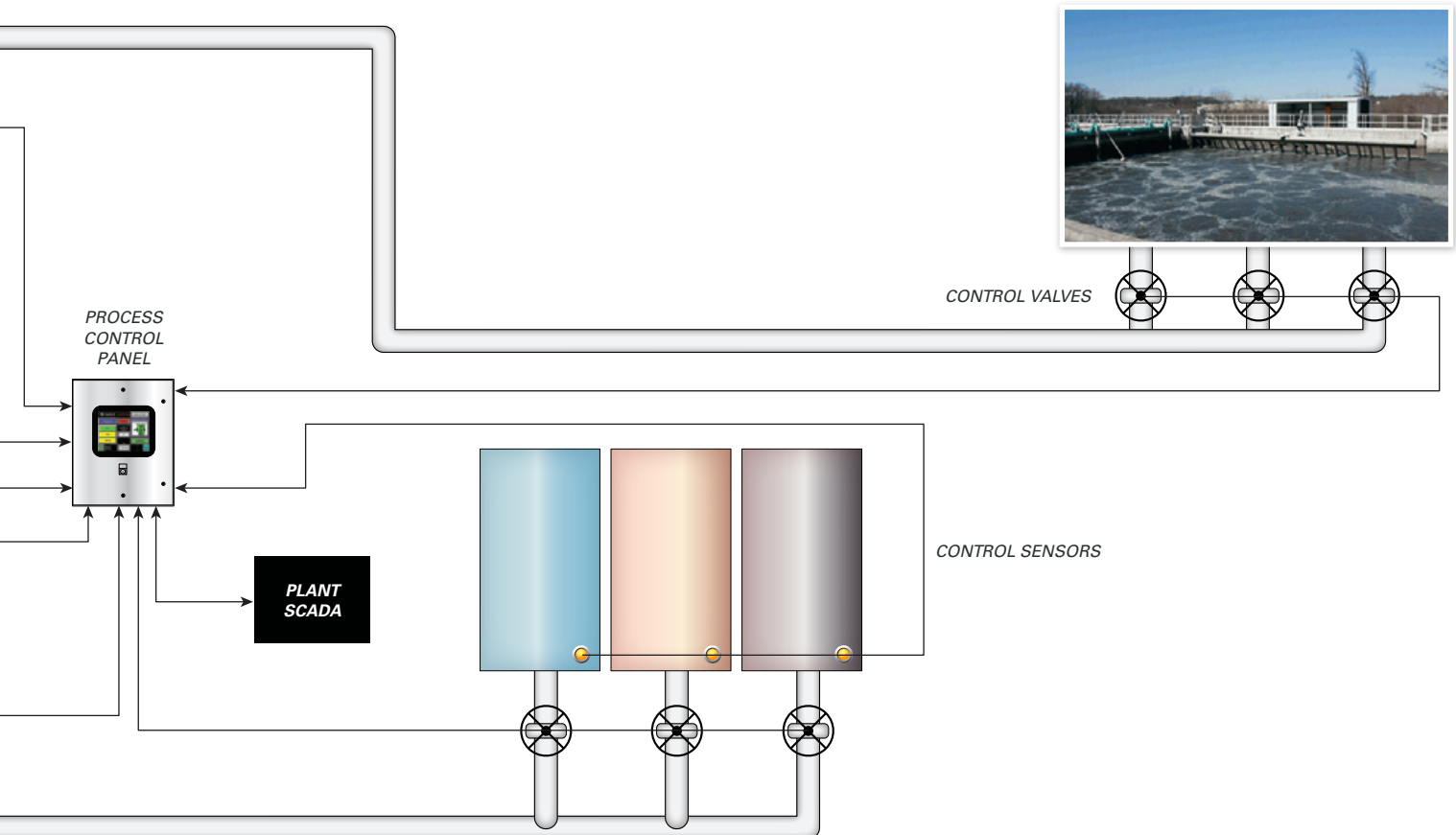
Atlas Copco has developed complete control systems to manage entire processes. Adding a smart sequencer to automate multiple units in operation will both save time in operating, but also improve the efficiency of your entire system. These smart systems are sufficiently advanced to monitor and control your entire process such as wastewater aeration, or virtually any application that requires flow to be matched to the process requirements.

ES 4100 BLOWER SEQUENCER PANEL

- Multiple blower control
- PLC control with touch screen HMI
- Optimizes efficiencies
- Variable process input
 - flow/pressure
 - dissolved oxygen
 - user defined
- Auto sequencing
- System integration
- SCADA interface

ES 5100 PROCESS CONTROL AND BLOWER SEQUENTIAL PANEL

- All ES 4100 functions
- Flow matched to process requirements
- Auxiliary equipment control
- Single point responsibility
- Direct process control
 - automated valves
 - pressure sensors
 - flow meters



ZM Design and Standards

At Atlas Copco we have made a commitment to be the technical leader in our industry. We have achieved our strong position in this area through continued investment in engineering personnel, the latest design tools, advanced inspection and testing technology, and ongoing R&D projects.

ENGINEERED SOLUTIONS

EXPERIENCE COUNTS

With a global competency center focused on research and development of centrifugal blower technology we are able to provide custom engineered solutions for the ZM product for the most demanding applications. This often includes special materials and testing to accomplish the toughest tasks

TESTING

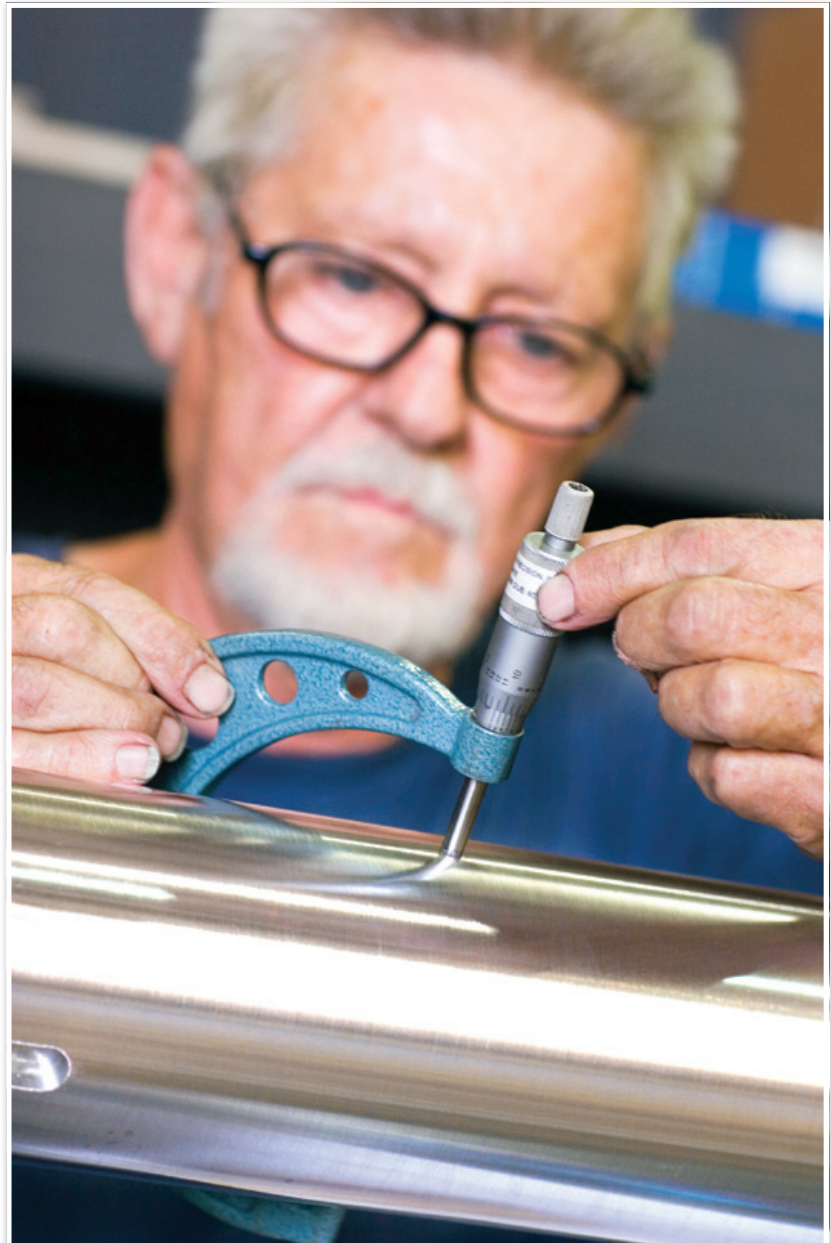
PROVING GROUNDS

With a world class test facility, we are able to offer comprehensive testing according to industry and customer standards. Every ZM is tested to ensure quality and to make way for a successful start up. We are able to simulate site conditions to ensure that the complete system is tested and ready to go.

PROJECT MANAGEMENT

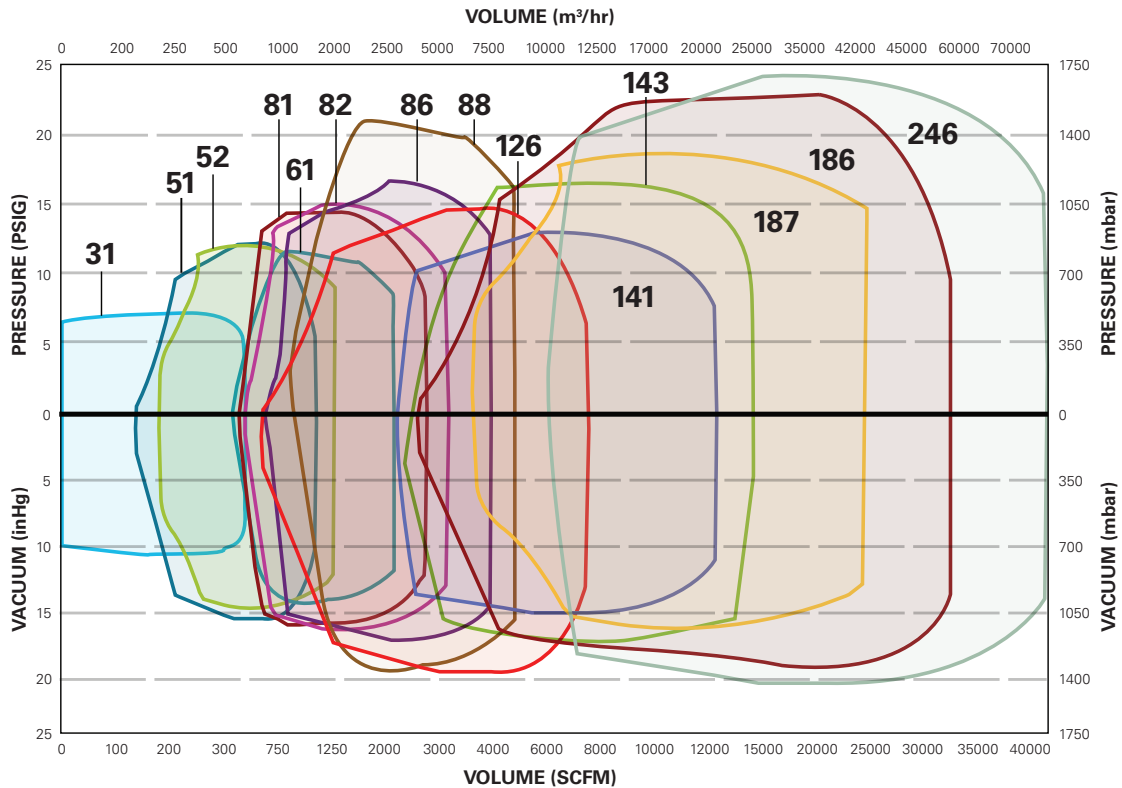
TEAMWORK

People make the difference. A project management staff is assigned to larger capital projects that require detailed documentation and testing to ensure the entire project goes smoothly and on time.





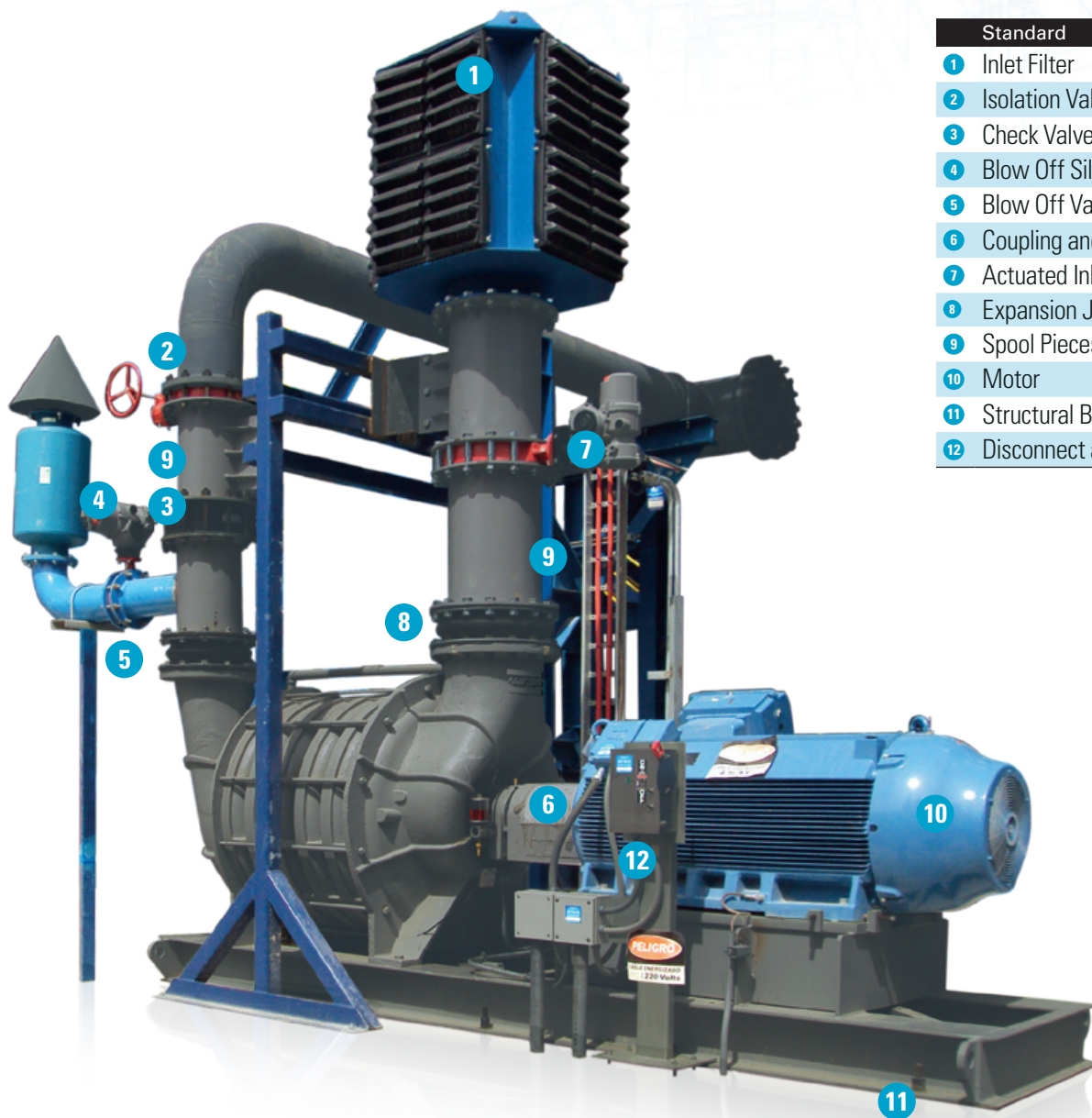
ZM complete line of centrifugal blowers and exhausters



MODEL	NUMBER OF STAGES	INLET FLANGE	DISCHARGE FLANGE	FLOW RANGE	MAXIMUM PRESSURE	MAXIMUM VACUUM	MOTOR POWER
ZM 31	1 to 11	DN80 / 3"	DN80 / 3"	0 – 300 cfm (0 – 510 m ³ /hr)	7 psi (480 mbar)	10" hg (339 mbar)	1 – 20 (1 – 15kW)
ZM 51	1 to 10	DN150 / 5"	DN150 / 5"	200-1,100 cfm (340 – 1,869 m ³ /hr)	12 psi (830 mbar)	11" hg (372 mbar)	5-100 (4 – 75 kW)
ZM 52	1 to 10	DN175 / 6"	DN175 / 5"	300-1,300 cfm (510 – 2209 m ³ /hr)	12 psi (830 mbar)	11" hg (372 mbar)	5-100 (4 – 75 kW)
ZM 61	1 to 9	DN175 / 6"	DN175 / 6"	400-2,200 cfm (680 – 3378 m ³ /hr)	11 psi (760 mbar)	10" hg (339 mbar)	5-200 (4 – 149 kW)
ZM 81	1 to 9	DN200 / 8"	DN200 / 8"	600-3,000 cfm (1,019 – 5,097 m ³ /hr)	14 psi (970 mbar)	12" hg (407 mbar)	5-250 (4 – 186 kW)
ZM 82	1 to 9	DN200 / 8"	DN200 / 8"	750-3,500 cfm (1274 – 5,946 m ³ /hr)	15 psi (1030 mbar)	19" hg (644 mbar)	5-250 (4 – 186 kW)
ZM 86	1 to 10	DN200 / 8"	DN200 / 8"	500-4,400 cfm (849 – 7,476 m ³ /hr)	16 psi (1100 mbar)	15" hg (508 mbar)	10-350 (7 – 261 kW)
ZM 88	1 to 12	DN250 / 10"	DN250 / 8"	500-4,500 cfm (849 – 7,645 m ³ /hr)	21psi (1450 mbar)	18" hg (609 mbar)	10-400 (7 – 298 kW)
ZM 126	1 to 9	DN300 / 12"	DN300 / 12"	1,000 - 8,250 cfm (1,699 – 14,017 m ³ /hr)	14 psi (970 mbar)	14" hg (475 mbar)	25-500 (19 – 373 kW)
ZM 141	1 to 9	DN450 / 18"	DN450 / 14"	3,500-12,000 cfm (5,946 – 20,388 m ³ /hr)	13 psi (900 mbar)	12" hg (407 mbar)	40 – 700 (30 – 522 kW)
ZM 143	1 to 8	DN450 / 18"	DN450 / 14"	3,500- 13,500 cfm (5,946 – 22,936 m ³ /hr)	20 psi (1380 mbar)	17" hg (576 mbar)	40 – 700 (30 – 522 kW)
ZM 186	1 to 6	DN600 / 24"	DN600 / 18"	2,500-30,000 cfm (4,247 – 50,970 m ³ /hr)	21psi (1450 mbar)	17" hg (576 mbar)	200 - 2,500 (149 – 1,864 kW)
ZM 187	1 to 8	DN500 / 20"	DN500 / 18"	2,000-22,000 cfm (3,398 – 37,378 m ³ /hr)	18 psi (1240 mbar)	17" hg (576 mbar)	150-1,750 (112 -1305 kW)
ZM 246	1 to 6	DN800 / 30"	DN800 / 24"	3,000-40,000 cfm (5,097 – 67,960 m ³ /hr)	24 psi (1650 mbar)	19" hg (644 mbar)	250-3,000 (186 – 2,237 kW)

ZM Optional Packaging and Accessories

Let Atlas Copco engineer a complete packaged option to suit your application. Below is a common air blower installation but the accessories and configurations can vary greatly depending on the type of system needed.



Standard

- 1 Inlet Filter
- 2 Isolation Valve
- 3 Check Valve
- 4 Blow Off Silencer
- 5 Blow Off Valve
- 6 Coupling and Guard
- 7 Actuated Inlet Valve
- 8 Expansion Joints
- 9 Spool Pieces
- 10 Motor
- 11 Structural Base
- 12 Disconnect and/or Motor Starter



Driven by innovation

With more than 135 years of innovation and experience, Atlas Copco will deliver the products and services to help maximize your company’s efficiency and productivity. As an industry leader, we are dedicated to offering high air quality at the lowest possible cost of ownership. Through continuous innovation, we strive to safeguard your bottom line and bring you peace of mind.



Building on interaction

As part of our long-term relationship with our customers, we have accumulated extensive knowledge of a wide diversity of processes, needs and objectives. This gives us the flexibility to adapt and efficiently produce customized compressed air solutions that meet and exceed your expectations.



A committed business partner

With a presence in over 170 countries, we will deliver high-quality customer service anywhere, anytime. Our highly skilled technicians are available 24/7 and are supported by an efficient logistics organization, ensuring fast delivery of genuine spare parts when you need them. We are committed to providing the best possible know-how and technology to help your company produce, grow, and succeed. With Atlas Copco you can rest assured that your superior productivity is our first concern!



www.atlascopco.com

E-ZM-001, REV00 01/15/2013