

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Química

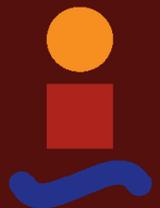
Ingeniería básica de una planta de compostaje en
túneles.

Autor: Aida M^a Garrido Ibáñez

Tutor: Antonio Morales Carrasco

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

Sevilla, 2015



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Química

Ingeniería básica de una planta de compostaje en túneles.

Autor:

Aida M^a Garrido Ibáñez

Tutor:

Antonio Morales Carrasco

Profesor asociado

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

Sevilla, 2015

Trabajo Fin de Grado: Ingeniería básica de una planta de compostaje en túneles.

Autor: Aida M^a Garrido Ibáñez

Tutor: Antonio Morales Carrasco

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a mi tutor por guiarme, darme las herramientas adecuadas para desarrollar este trabajo y por su tiempo invertido en él. Este agradecimiento también va dirigido a todos los profesores que me han enseñado los conocimientos y valores necesarios para su realización.

A toda mi familia se lo quiero agradecer por su interés y apoyo incondicional. En especial a mis padres y a mi hermana quienes siempre han tenido las palabras adecuadas para darme fuerzas en los momentos de estrés, se han volcado conmigo en este proyecto y han confiado en mí durante toda la carrera. Estoy totalmente segura que sin ellos la realización de este trabajo me hubiese resultado mucho más difícil.

Por último agradeceré a todos y cada uno de mis compañeros que me han hecho más llevaderos mis años de universidad por prestarme su ayuda cada vez que la he necesitado. Ellos también forman parte de este proyecto.

Resumen

La generación de residuos domésticos en estas últimas décadas se ha visto incrementada por el estilo consumista de ésta nuestra sociedad. Por este motivo se ha llegado a la necesidad de tratarlos y gestionarlos de una manera más eficiente, ya que hasta ahora el proceso más utilizado era su deposición en vertederos controlados. Esta práctica implica varios problemas como son el uso de grandes superficies de terreno, la imposibilidad de aprovecharlos una vez depositados o el desconocimiento de la evolución de los residuos una vez enterrados.

El presente trabajo tiene como objetivo el profundizar en el proceso de compostaje como una alternativa al tratamiento de los residuos orgánicos, permitiendo el reciclaje de la materia orgánica y su valoración como compost.

En él se desarrolla la ingeniería básica de una planta de compostaje en túnel para una población de 160.000 habitantes. Esta técnica de producción de compost proporciona un material de mayor calidad en un tiempo menor a través de un control constante de las variables determinantes del proceso como son la temperatura, la humedad y la aireación.

A su vez, se ha realizado un análisis de costes de la planta, incluyendo tanto los relativos a la inversión como a los de operación.

Abstract

The generation of household waste in the last decades has increased by the consumerist way of life. For this reason it appeared the need of a more efficient waste treatment and management, and so far, the most widely used process was deposition in landfills. This practice involves some problems such as the use of large areas of land, the impossibility of use them once they are deposited or the ignorance about the evolution of the waste once they are buried.

The aim of this work is to get deep in the composting process as an alternative to the organic waste treatment, allowing the recycling of organic matter and its assessment as compost.

It describes the development of a basic engineering of a tunnel composting plant for a town of 160,000 inhabitants. This compost production technique provides a higher quality material in less time through a continual control of the main process variables such as temperature, humidity and aeration.

In turn, an analysis of plant costs has been made, including those related to the investment and the operation.

Índice

Agradecimientos	viii
Resumen	x
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xvii
Lista de acrónimos	xix
Notación	xx
PARTE 1	1
INTRODUCCIÓN	1
LOS RESIDUOS ORGÁNICOS Y SU GESTIÓN	1
1 RESIDUOS DOMÉSTICOS	2
1.1 <i>Origen</i>	2
1.2 <i>Composición de los residuos domésticos</i>	4
1.3 <i>Características de los residuos domésticos</i>	5
1.3.1 Densidad o peso específico (Kg/m ³)	5
1.3.2 Humedad	5
1.3.3 Capacidad de campo	6
1.3.4 Relación C/N	6
2 RESIDUOS ORGÁNICOS	7
2.1 <i>Definición y propiedades</i>	7
2.2 <i>Legislación aplicable</i>	7
2.2.1 Ley 22/2011 de Residuos y Suelos Contaminados	7
2.2.2 Real Decreto 1481/2001: Depósito en vertedero.	8
2.2.3 Reglamento de Residuos de Andalucía	9
2.3 <i>Recogida de los residuos orgánicos</i>	9
3 DIGESTIÓN ANAEROBIA	12
3.1 <i>Descripción del proceso</i>	12
3.2 <i>Tipos de reactores</i>	13
3.2.1 Sistemas de una etapa vía húmeda	14
3.2.2 Sistema de una etapa vía seca	14
3.3 <i>Aprovechamiento</i>	15
3.4 <i>Ventajas e inconvenientes</i>	16
4 COMPOSTAJE	17
4.1 <i>Legislación sobre la calidad del compost</i>	17
4.1.1 Legislación europea	17
4.1.2 Legislación española	18

4.2	<i>Etapas en el proceso del compostaje</i>	20
4.2.1	Preparación	21
4.2.2	Etapa de fermentación	22
4.2.3	Maduración	22
4.2.4	Afino del compost	22
4.3	<i>Etapa de fermentación</i>	22
4.3.1	Sistemas abiertos	23
4.3.2	Sistemas cerrados:	24
4.4	<i>Parámetros de control del proceso de compostaje</i>	27
4.5	<i>Control de olores.</i>	28
5	obtención de bioetanol	29
PARTE 2. MEMORIA DESCRIPTIVA		31
1	Descripción del proceso y límites de batería	32
1.1	<i>Datos de partida</i>	33
1.2	<i>Regimen de triaje</i>	34
2	recepción de residuos y preparación	35
2.1	<i>Faso y Puente grúa</i>	35
2.1.1	<i>Puente Grúa/pulpos</i>	36
2.2	<i>Triage primario de voluminosos</i>	37
2.3	<i>Trómel</i>	37
2.4	<i>Separador magnético</i>	39
3	Almacenamiento intermedio	41
3.1	<i>Carga y descarga del túnel</i>	41
4	FERMENTACIÓN EN TÚNEL	43
4.1	<i>Ventilación</i>	44
4.2	<i>Riego periódico y extracción de los lixiviados.</i>	46
4.2.1	<i>Recogida de lixiviados</i>	47
4.3	<i>Control del proceso e instrumentación básica</i>	48
4.4	<i>Balance de materia en el túnel</i>	50
5	MADURACIÓN	51
6	AFINO	53
6.1	<i>Trómel</i>	53
6.2	<i>Mesa densimétrica</i>	54
7	GESTIÓN DE OLORES	56
7.1	<i>Extracción de los gases en el túnel</i>	56
7.2	<i>Ventilador y tuberías</i>	57
7.3	<i>Humidificador</i>	57
7.4	<i>Biofiltro</i>	58
8	Resumen	60
8.1	<i>Balance de materia de la planta</i>	60
8.2	<i>Usos del material bioestabilizado</i>	60
Parte 3. Estudio económico		62
1	INVERSIÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA	63
2	COSTES DE OPERACIÓN.	65
2.1	<i>Amortización</i>	65
2.2	<i>Personal</i>	66
2.3	<i>Electricidad y combustibles</i>	68
2.4	<i>Mantenimiento, reparaciones y repuestos</i>	68

2.5	<i>Rechazo a vertedero</i>	69
2.6	<i>Gastos generales y beneficio industrial.</i>	69
2.7	<i>Beneficio por la venta de subproductos</i>	69
2.8	<i>Resumen</i>	70
PARTE 4. MEMORIA DE CÁLCULOS		72
1	ZONA DE RECEPCIÓN Y CONTROL DE LOS RSU	73
1.1	<i>Puente Grúa/pulpos</i>	73
1.2	<i>Triage primario manual</i>	74
1.3	<i>Trómel</i>	74
1.4	<i>Separación magnética en los finos del trómel</i>	75
2	PROCESO DE FERMENTACIÓN	76
2.1	<i>Túneles de fermentación</i>	76
2.2	<i>Sistema de ventilación de los túneles</i>	76
2.2.1	<i>Pérdidas de carga en el lecho</i>	77
2.2.2	<i>Pérdidas de carga en las tuberías del suelo aireado</i>	78
2.2.3	<i>Pérdida de carga en la sección de entrada</i>	79
2.2.4	<i>Resumen</i>	79
2.3	<i>Sistema de rociado</i>	80
2.3.1	<i>Balance de agua</i>	80
2.3.2	<i>Balance de materia.</i>	81
2.3.3	<i>Balance de energía</i>	83
2.3.4	<i>Boquillas</i>	84
3	Control de olores. Biofiltro	86
3.1	<i>Ventilador.</i>	86
3.1.1	<i>Pérdidas de carga</i>	86
3.2	<i>Humidificador</i>	90
3.2.1	<i>Cantidad de agua</i>	90
3.2.2	<i>Dimensiones del humidificador</i>	91
3.3	<i>Biofiltro</i>	93
4	Balance de material en el túnel	94
5	PROCESO DE MADURACIÓN	95
6	AFINO DEL COMPOST	97
Referencias		99

Tabla 1. Código LER de los residuos orgánicos.	7
Tabla 2. Tipos de recogida selectiva.	10
Tabla 3. Contenido máximo de metales. Etiqueta ecológica del compost.	18
Tabla 4. Enmienda orgánica de FORS, RD 506/2013.	19
Tabla 5. Contenido máximo de metales. Real Decreto 506/2013.	20
Tabla 6. Composición media de los RD.	34
Tabla 7. Distribución de los residuos en el trómel.	38
Tabla 8. Composición a la salida del túnel de fermentación.	50
Tabla 9. Composición de la corriente de salida de la etapa de afino.	55
Tabla 10. Inversión necesaria construcción planta	63
Tabla 11. Desglose de Costes de inversión.	65
Tabla 12. Trabajadores contratados.	66
Tabla 13. Tabla salarial	67
Tabla 14. Costes del personal	67
Tabla 15. Costes de operación.	70
Tabla 16. Caudales máxicos.	73
Tabla 17. Distribución de los residuos tras el triaje de voluminosos.	74
Tabla 18. Distribución de los residuos en el trómel.	75
Tabla 19. Distribución de los residuos tras el separador magnético.	75
Tabla 20. Caudal de Aire entrada al túnel.	82
Tabla 21. Aire de salida.	83
Tabla 22. Residuos de salida.	83
Tabla 23. Balance de materia en el túnel.	94
Tabla 24. Distribución de los residuos a la salida del trómel de afino.	97
Tabla 25. Compost a la salida de la mesa densimétrica.	97

Ilustración 1. Evolución de la generación de residuos urbanos.	3
Ilustración 2. Evolución de la generación de residuos en Andalucía.	3
Ilustración 3. Composición media de los residuos domésticos.	4
Ilustración 4. Gestión de los RD en Andalucía.	11
Ilustración 5. Etapas de la digestión anaerobia.	13
Ilustración 6. Sistema de una etapa vía húmeda.	14
Ilustración 7. Sistema de una etapa vía seca.	15
Ilustración 8. Proceso de compostaje.	17
Ilustración 9. Esquema de la planta de compostaje.	20
Ilustración 11. Esquema de compostaje en pila estática aireada.	24
Ilustración 12. Compostaje en tambor.	25
Ilustración 13. Compostaje en contenedor.	26
Ilustración 14. Compostaje en túnel (11)	26
Ilustración 15. Proceso de obtención de bioetanol.	29
Ilustración 16. Diagrama de bloque del proceso	32
Ilustración 17. Foso y puente grúa	35
Ilustración 18. Puente grúa.	36
Ilustración 20. Separador magnético.	39
Ilustración 24. Esquema del túnel de fermentación	44
Ilustración 25. Aireación a través de boquillas del túnel de fermentación	45
Ilustración 26. Vista en planta del sistema de rociado del túnel	47
Ilustración 27. Distribución de los sensores en el túnel	48
Ilustración 28. Era de maduración.	52
Ilustración 29. Mesa densimétrica.	54
Ilustración 30. Sistema de biofiltración.	56
Ilustración 31. Tuberías de extracción de gases de los túneles.	57
Ilustración 32. Biofiltro.	59
Ilustración 33. Balance de masas de la planta	60
Ilustración 35. Reparto de los costes de operación.	70
Ilustración 37. Sistema de aireación de los túneles.	78
Ilustración 38. Curva característica del ventilador.	79
Ilustración 40. Sistema de biofiltración.	86
Ilustración 41. Ábaco de Moody	87

Ilustración 42. Rugosidad relativa en función del diámetro, para tubos de diversos materiales.	88
Ilustración 43. Curva característica del ventilador del biofiltro.	89
Ilustración 44. Diagrama psicométrico.	90

Lista de acrónimos

RSU	Residuos sólidos urbanos
RD	Residuos domésticos
FORS	Fracción orgánica recogida selectiva
PVC	Policloruro de vinilo
PE	Polietileno
PET	Polietileno tereftalato
LER	Lista Europea de Residuos
DA	Digestión Anaerobia
PEAB	Polietileno de baja densidad

Notación

ρ	Densidad
μ	Viscosidad
\cong	Aproximadamente
Re	Número de Reynolds
ε	Rugosidad de la tubería
D	Diámetro de la tubería
h_f	Pérdida de carga
Y	Humedad absoluta
Q	Caudal
L	Longitud

PARTE 1

INTRODUCCIÓN

LOS RESIDUOS ORGÁNICOS Y SU GESTIÓN

1 RESIDUOS DOMÉSTICOS

1.1 Origen

El vago concepto de “residuo” queda delimitado y definido por nuestras actuales leyes en vigor. La **Ley 22/2011 de 28 de julio de residuos y suelos contaminados** se encarga, entre otras cosas, de establecer una clara definición del concepto y su posterior clasificación en grupos generales. El término *residuo* es definido según dicha ley como: *“cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la obligación de desprenderse en virtud de las disposiciones nacionales vigentes”*.

Dentro de los *residuos*, existe el gran grupo de los llamados *residuos domésticos* (RD). Según la Ley 22/2011 quedan definidos como *“los generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. Se consideran también residuos domésticos los similares a los anteriores generados en servicios e industrias. Se incluyen también en esta categoría los residuos que se generan en los hogares de aparatos eléctricos y electrónicos, ropa, pilas, acumuladores, muebles y enseres así como los residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria. Tendrán la consideración de residuos domésticos los residuos procedentes de limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas, los animales domésticos muertos y los vehículos abandonados”*.

En nuestro país, la generación de residuos domésticos ha ido creciendo año tras año durante estas últimas décadas, debido principalmente a los hábitos consumistas que caracterizan a nuestra sociedad. Sin embargo, en los últimos años, la producción se ha estabilizado. Actualmente, como puede observarse en la Ilustración 1, en España se produce una media de 1,35 Kg/hab día.

Este valor de 1,35 es un valor promedio, pues la naturaleza y el volumen de residuos domésticos se ven afectados por diversas variables temporales, demográficas y sociológicas:

- Época del año.
- Nivel y modo de vida de la población y núcleo de población (Áreas rurales, áreas urbanas, grandes ciudades...).
- Movilidad de la población (Ciudades turísticas).

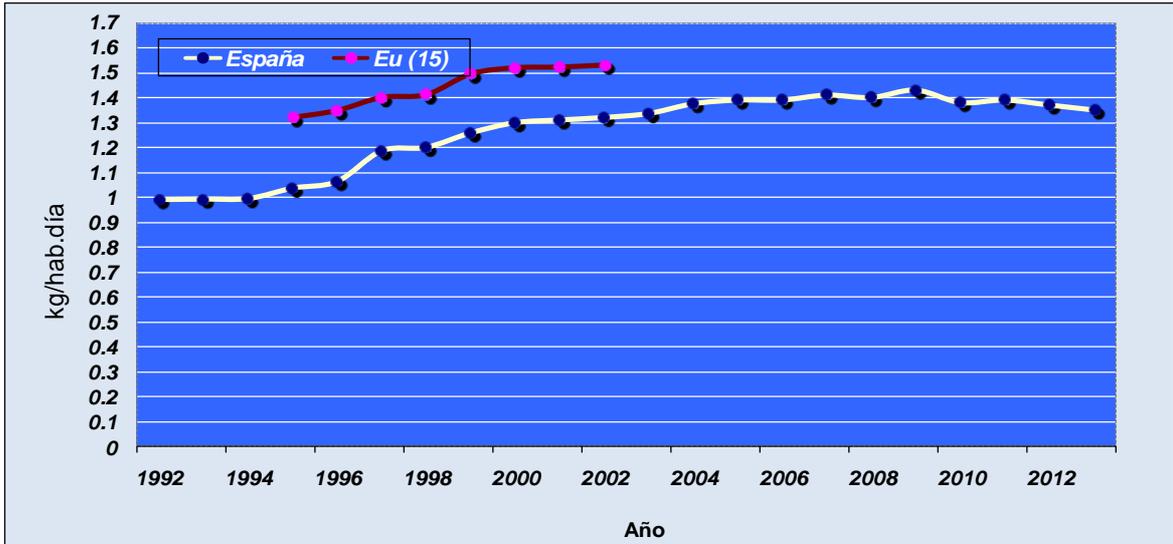


Ilustración 1. Evolución de la generación de residuos urbanos.

Elaboración propia. Fuente (Instituto Nacional de Estadística)

En Andalucía, la generación de residuos domiciliarios ha sido en el año 2013 de 580 Kg/hab.año (1), equivalente a 1,59 Kg/hab.día. Se puede observar en la Ilustración 2 que la generación de residuos en Andalucía se ha mantenido estable, en los últimos años, en torno a la cifra media de 1,55. Restando de la cifra anterior los residuos recogidos selectivamente (papel, vidrio y envases: 30 kg/hab.año) y los residuos voluminosos (20 kg/hab.año), se tiene que la producción andaluza de residuos domésticos en masa es de **1,45 kg/hab.día**.

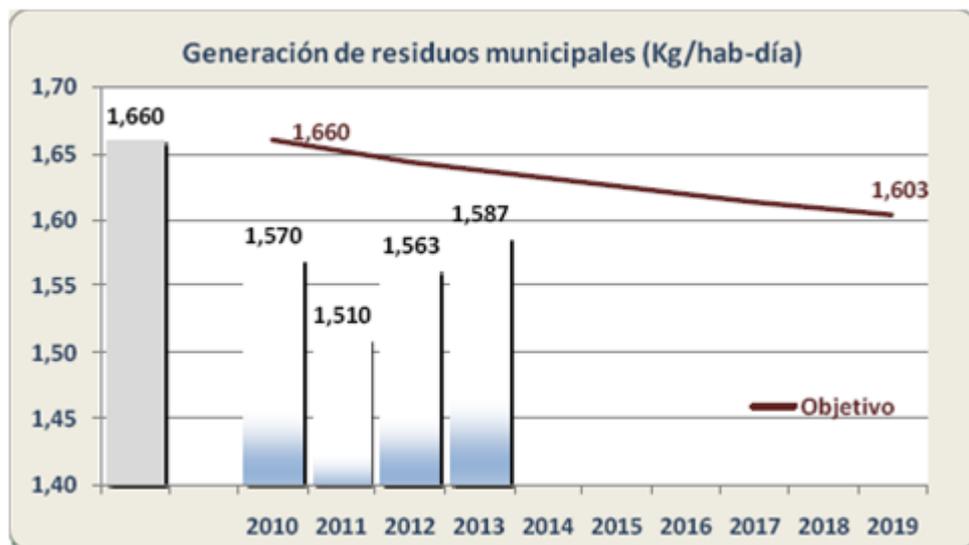


Ilustración 2. Evolución de la generación de residuos en Andalucía.

Fuente (1)

1.2 Composición de los residuos domésticos

Para una correcta gestión de los residuos domésticos, es fundamental conocer su composición, que es muy variable y heterogénea.

La composición depende de diversos factores, como el clima, el nivel de vida, el tamaño de la población o la época del año. Por ejemplo, si se tiene en cuenta el tipo de población, predominan unos tipos de residuos sobre otros.

- Población rural: predomina la materia orgánica.
- Núcleos urbanos: aumenta la cantidad de envases y embalajes, aunque sigue predominando la materia orgánica.
- Zonas de servicios: predominio de envases y embalajes.
- Zonas industriales: predominan los residuos industriales.

En la siguiente ilustración, se muestra la composición promedio de los residuos domésticos en España. Los componentes principales de los residuos domésticos son:

- **Materia orgánica.**
Restos de comidas, de jardinería y otros materiales fermentables. Es el componente mayoritario en los RD, aunque en la actualidad, en las sociedades más desarrolladas, está disminuyendo.

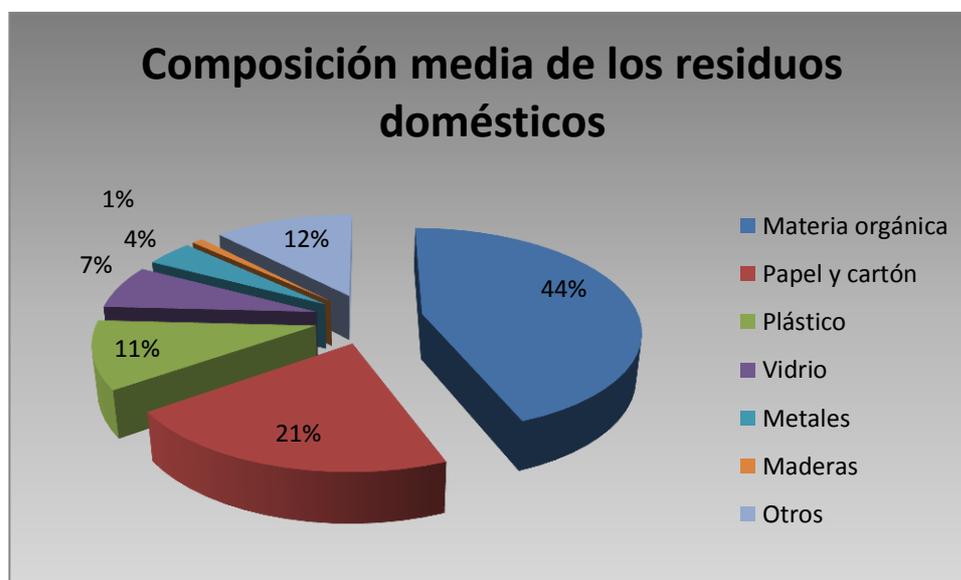


Ilustración 3. Composición media de los residuos domésticos.

Elaboración propia. Fuente (INE)

- **Papel y cartón.**
Periódicos, papel en general, cajas y envases. Esta fracción ha experimentado un importante incremento en los últimos años, y su recogida en origen está en expansión.

- **Plásticos.**
Botellas y envases para líquidos, envases y embalajes. Bajo este nombre se agrupan diferentes polímeros como: PVC, PET, PE, etc.
- **Vidrio.**
Botellas y envases de alimentos. La recogida diferenciada de esta fracción está cada vez más extendida.
- **Maderas.**
Este material suele presentarse en forma de mueble, aunque también pueden ser restos de podas.
- **Metales.**
La hojalata y el aluminio son los materiales más encontrados, básicamente en envases de bebidas y latas de conservas.
- **Otros componentes.**
Cenizas, textiles, gomas, latas metálicas no envases, etc.

1.3 Características de los residuos domésticos

Las características de los residuos (2) más importantes son:

1.3.1 Densidad o peso específico (Kg/m³)

Este parámetro determina el volumen ocupado por una masa de residuos, por lo que es importante para calcular las dimensiones de los contenedores de prerrecogida, así como para estimar los volúmenes de los equipos de recogida y transporte o la capacidad de los vertederos.

La densidad, en el contenedor, de los residuos domésticos en España varía entre 150 y 250 Kg/m³, dependiendo de la composición y humedad.

1.3.2 Humedad

La humedad media de los residuos domésticos suele estar comprendida entre 35-65% en peso. La máxima aportación de humedad proviene de la materia orgánica y la mínima de los plásticos y metales, aunque la humedad tiende a homogeneizarse en los contenedores, puesto que unos residuos se la traspasan a otros. Este parámetro tiene una gran influencia en la transformación biológica de las materias fermentables en las plantas de compostaje. La humedad también da lugar a la producción de **lixiviados**, principalmente en los vertederos.

1.3.3 Capacidad de campo

Es la cantidad total de humedad que puede ser retenida por una muestra de residuo sometida a la acción de la gravedad. Este parámetro es importante a la hora de determinar la formación de lixiviados en los vertederos y en las plantas de compostaje, ya que todo el exceso de agua sobre la capacidad de campo se emitirá en forma de lixiviado. La capacidad de campo varía con el grado de presión aplicada y el estado de descomposición del residuo. La capacidad de campo de los residuos no seleccionados y no compactados de origen doméstico y comercial está en la gama del 50-60 %.

1.3.4 Relación C/N

La relación C/N expresa la fracción del porcentaje de carbono orgánico frente al porcentaje de nitrógeno. En los procesos biológicos (compostaje o digestión anaerobia), los microorganismos obtienen la energía para sus procesos metabólicos del carbono, y sintetizan su material celular a partir del nitrógeno. Para que los procesos biológicos se realicen correctamente, el valor de C/N debe encontrarse en el rango de 20-25.

Con una relación C/N mayor de 30, el proceso se ralentiza, puesto que las bacterias no pueden duplicarse a la velocidad normal. Por otro lado, si la relación C/N fuera menor de 15, el exceso de nitrógeno se transformaría en amoníaco, que es un compuesto tóxico y que además produce un mal olor.

La relación C/N de la fracción orgánica de los residuos domésticos mezclados oscila entre 20-25 %, por lo que no tiene problemas para ser tratada por métodos biológicos.

2 RESIDUOS ORGÁNICOS

2.1 Definición y propiedades

Se define como residuo orgánico todo desecho de origen biológico, que alguna vez estuvo vivo o fue parte de un ser vivo. Son los restos biodegradables de plantas y animales, restos de frutas y verduras y restos procedentes de la poda de plantas. Tienen la característica de degradarse rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica.

Los residuos orgánicos pueden recuperarse y utilizarse para la fabricación de un fertilizante eficaz (“compost”) y beneficioso para el medio ambiente.

2.2 Legislación aplicable

2.2.1 Ley 22/2011 de Residuos y Suelos Contaminados

Los residuos orgánicos, también conocidos como biorresiduos, están regulados por la *ley 22/2011*, considerándose aquellos incluidos en la siguiente Tabla:

Código Lista Europea Residuos	Descripción	Observaciones
20 01 08	Residuos de cocinas y restaurantes	Residuos domésticos así como residuos asimilables de comercios, industrias, etc., recogidos selectivamente
20 01 25	Aceites y grasas comestibles	Estado sólido
20 01 38	Madera	No debe contener sustancias peligrosas
20 03 02	Residuos biodegradables de mercados	Similares a 20 01 08
20 03 03	Limpieza Viaria	Biodegradables

Tabla 1. Código LER de los residuos orgánicos.

La tercera sección de la Ley 22/2011 hace referencia expresa a estos residuos, y aconseja que los planes y programas de residuos incluyan medidas para impulsar su **recogida separada**, para destinarlos al tratamiento biológico y obtener enmiendas orgánicas de calidad.

Las medidas que se las Autoridades Medioambientales deben impulsar son:

“a) La recogida separada de biorresiduos para destinarlos al compostaje o a la digestión anaerobia en particular de la fracción vegetal, los biorresiduos de grandes generadores y los biorresiduos generados en los hogares.

b) El compostaje doméstico y comunitario.

c) El tratamiento de biorresiduos recogidos separadamente de forma que se logre un alto grado de protección del medio ambiente llevado a cabo en instalaciones específicas sin que se produzca la mezcla con residuos mezclados a lo largo del proceso. En su caso, la autorización de este tipo de instalaciones deberá incluir las prescripciones técnicas para el correcto tratamiento de los biorresiduos y la calidad de los materiales obtenidos.

d) El uso del compost producido a partir de biorresiduos y ambientalmente seguro en el sector agrícola, la jardinería o la regeneración de áreas degradadas, en sustitución de otras enmiendas orgánicas y fertilizantes minerales.”

Por otro lado establece que *“Antes de 2020, la cantidad de residuos domésticos y comerciales destinados a la preparación para la reutilización y el reciclado para las fracciones de papel, metales, vidrio, plástico, **biorresiduos** u otras fracciones reciclables deberá alcanzar, en conjunto, como mínimo el 50% en peso.”*

La recogida selectiva tiene una gran importancia a la hora de realizar un compost de calidad, ya que si se utilizan residuos mezclados, sin separación selectiva, el material resultante no tiene categoría de compost. Según la definición de compost descrita en la Ley de residuos se denomina **material bioestabilizado**.

*“«Definición compost»: enmienda orgánica obtenida a partir del tratamiento biológico aerobio y termófilo de residuos biodegradables **recogidos separadamente**. No se considerará compost el material orgánico obtenido de las plantas de tratamiento mecánico biológico de residuos mezclados, que se denominará **material bioestabilizado**.”*

2.2.2 Real Decreto 1481/2001: Depósito en vertedero.

Los residuos orgánicos, si no se estabilizan previamente a su entrada en vertedero, en el interior de los mismos se degradan anaeróbicamente, produciendo metano (CH₄). El metano es un compuesto que contribuye al efecto invernadero, con una potencia 20 veces superior al dióxido de carbono. Aunque los modernos vertederos cuentan con un sistema de captación del biogás producido en su interior, esta captura no es totalmente efectiva, y una parte mínima del biogás producido en el vertedero escapa a la atmósfera.

Por ello, el RD 1481 de vertederos también afecta a los residuos orgánicos, puesto que limita la cantidad de estos residuos que pueden ir a vertedero, sin antes recibir un tratamiento biológico.

“A más tardar el 16 de julio de 2016, la cantidad total (en peso) de residuos urbanos

biodegradables destinados a vertedero no superará el 35 por 100 de la cantidad total de residuos urbanos biodegradables generados en 1995”.

2.2.3 Reglamento de Residuos de Andalucía

En el Decreto 73/2012 de la Junta de Andalucía se aprueba el Reglamento de Residuos de Andalucía, que en su Capítulo III, punto 2, apartado h establece:

“Se adoptarán las medidas apropiadas para establecer la recogida separada de biorresiduos con vistas al compostaje o a la digestión anaerobia de los mismos, de tal forma que antes de 2016 se recoja un 20 % de los biorresiduos al objeto de alcanzar el 40 % en el 2020.

Los objetivos anteriores se podrán conseguir mediante el compostaje doméstico, la recogida separada de la fracción vegetal, la recogida separada de grandes generadores y la recogida selectiva de la fracción orgánica de los residuos domésticos.

2.3 Recogida de los residuos orgánicos

La recogida consiste en su recolección para efectuar su traslado a las plantas de tratamiento.

Según se muestra en la siguiente tabla, en España hay implantado hasta seis sistemas diferentes para la recogida de los residuos domésticos (3). Como puede observarse, sólo los tres primeros sistemas tienen establecidos la recogida selectiva de la fracción orgánica. Sin embargo, a pesar de las recomendaciones de la Ley 22/2011 y de los objetivos establecidos en el Reglamento de Residuos de Andalucía, el sistema más extendido en España y en Andalucía es el Tipo 5, en el que la fracción orgánica se recoge **mezclada** con el resto de residuos no reciclables.

- **Contenedor verde** para el vidrio.
- **Contenedor azul** para el papel y cartón.
- **Contenedor amarillo** para los envases.
- **Contenedor gris/marrón/verde oscuro** para el resto de residuos, incluyendo los residuos orgánicos.

Tipo 1 5 Fracciones	Tipo 2 Húmedo-Seco	Tipo 3 Multi- producto	Tipo 4 4 fracciones + poda	Tipo 5 4 fracciones	Tipo 6 3 fracciones
Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio
P-C ¹	P-C	P-C + Envases	P-C	P-C	P-C
Envases	Resto+Envases		Envases	Envases	-
Resto		Resto	Resto	Resto (incluye MO)	Resto (incluye MO + envases)
FORS ²	FORS	FORS	Poda	-	-

Tabla 2. Tipos de recogida selectiva.

Fuente (3)

La recogida selectiva de la materia orgánica sólo está relativamente implantada en ciertas regiones españolas como Galicia, País Vasco y, principalmente, Cataluña (4).

En Andalucía, sólo la ciudad de Córdoba tiene establecida la recogida selectiva de la fracción orgánica.

Los contenedores de la fracción resto deben estar situados a una distancia menor de 50-100 metros del ciudadano. El resto de contenedores generalmente se colocan a no más de 300 metros del ciudadano. El contenedor destinado a la fracción orgánica tiene la salvedad que sólo está autorizado el depósito de los residuos en determinado horario, generalmente nocturno, para evitar molestias y malos olores al vecindario. En el caso de las comunidades de vecinos, los contenedores de la fracción orgánica han de permanecer en la vía pública por un periodo de tiempo limitado.

Por lo que respecta a la recogida en sí existen dos métodos:

- Recogida por medio de camiones compactadores.
- Recogida neumática.

La recogida más habitual de la fracción orgánica (contenedor gris) se realiza por medio de camiones especialmente preparados y dotados de una tolva en la que se compactan los residuos.

¹ P-C : Papel y cartón

² FORS : Fracción orgánica de los residuos recogida selectivamente

La recogida neumática exige una gran inversión inicial en la construcción de las instalaciones que han de ir bajo tierra. A cambio exige un menor desembolso en costes de personal y genera muy pocas molestias a los ciudadanos. Mediante un sistema de conducciones neumáticas subterráneas se conduce los residuos hasta la central de recogida, desde donde se procede a su traslado a la planta de tratamiento.

Por último, se realiza el transporte de los residuos hacia las estaciones de transferencia o a las plantas de tratamiento.

2.2. Gestión

La política de gestión de residuos en Andalucía (1) se basa en la utilización de métodos biológicos:

- Digestión anaerobia.
- Descomposición aerobia (compostaje).

que permiten reducir el volumen de la parte biodegradable de los RD, antes de enviar la parte no degradable restante al vertedero. Además, la digestión anaerobia produce como subproducto biogás, que puede usarse para generar electricidad, mientras que el compostaje produce una enmienda orgánica de suelos. En Andalucía, casi el 70 % de los residuos domésticos mezclados se tratan con métodos biológicos.

En la siguiente ilustración, se muestra un mapa en el que se representa la ubicación de las plantas de tratamiento de residuos de Andalucía. Sólo se ha construido una planta de digestión anaerobia, situada en Jaén.



Ilustración 4. Gestión de los RD en Andalucía.

Elaboración propia. Fuente CMA de Andalucía

3 DIGESTIÓN ANAEROBIA

3.1 Descripción del proceso

La digestión anaeróbica (5) DA consiste en la descomposición de material biodegradable, en ausencia de oxígeno, para obtener dos productos principales: **biogás**, compuesto mayoritariamente por metano, y el lodo estabilizado, conocido como **digestato**. El metano es valorizado posteriormente para la obtención de energía y el digestato puede ser eliminado en vertedero o compostado.

Esta tecnología utiliza **reactores** (digestores) cerrados donde se controlan los parámetros para favorecer el proceso de fermentación anaeróbica.

A continuación se describen las distintas etapas que tienen lugar en una planta de digestión anaerobia de RD:

- **Pretratamiento**

El pretratamiento es un proceso crítico en estas plantas cuando trabajan con RD mezclados y consiste en:

- El ajuste del tamaño de partícula, facilitando la hidrólisis.
- La retirada de los materiales (piedras, metales, etc.) que no son productores de biogás.
- El ajuste de la humedad.

- **Proceso biológico**

La digestión anaerobia es un proceso muy complejo, tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar, como por la cantidad de grupo de bacterias involucradas en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea.

El proceso de degradación de la materia orgánica se divide en cuatro etapas:

a) **Hidrólisis**

Consiste en la transformación controlada por enzimas extracelulares, de las moléculas orgánicas complejas y no disueltas que se rompen en compuestos que se emplean como fuente de materia y energía por las células de los microorganismos.

b) **Etapas fermentativa o acidogénica**

En la segunda etapa, controlada por bacterias, se transforman los compuestos formados en la primera etapa en otros compuestos de peso molecular intermedio como ácidos grasos, alcoholes alifáticos, y en menor medida, amoníaco y sulfhídrico.

c) **Etapas acetogénica**

Los ácidos y alcoholes que provienen de la *acidogénesis* se transforman por la acción de otro grupo de bacterias en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

d) Etapa metanogénica

La última etapa consiste en la transformación bacteriana del ácido acético y del ácido fórmico en dióxido de carbono y metano y la formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno. El biogás está compuesto por un 60% de metano (CH₄), un 38% de dióxido de carbono (CO₂) aproximadamente y trazas de otros gases.

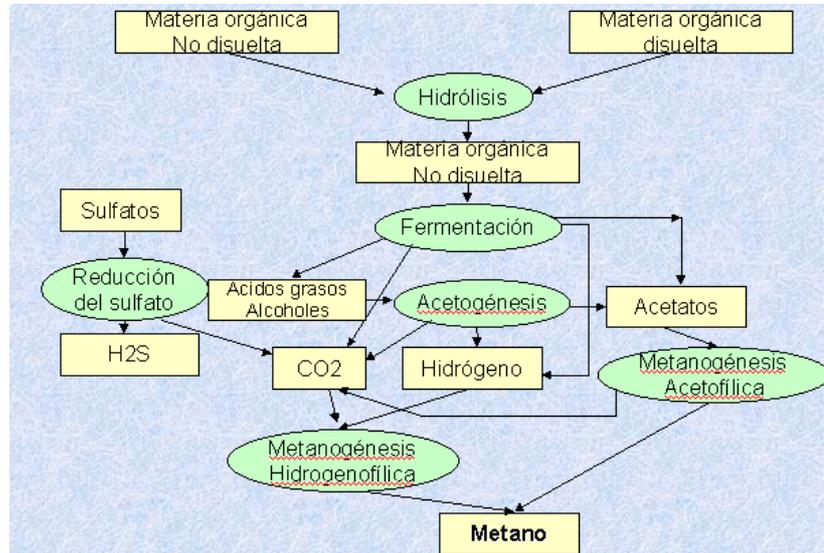


Ilustración 5. Etapas de la digestión anaerobia.

Elaboración propia. Fuente (5).

- **Aprovechamiento energético**

El biogás producido, como se indica en el apartado 3.3, se suele utilizar dentro de la misma planta para producir electricidad y vapor.

En la digestión anaerobia se produce del orden de 100-200 m³ de biogás por t de RD.

3.2 Tipos de reactores

El 100 % de las plantas de digestión anaerobia construidas en España para la gestión de RD son plantas de una sola etapa (4). En este caso, todas las reacciones (hidrólisis, acidogénesis, etc.) que se producen en la descomposición anaerobia tienen lugar de forma simultánea en un único reactor. Este método tiene la ventaja de ser un diseño sencillo y barato, además de conseguir una eficiencia tan alta como los multietapas. Este sistema se divide en dos:

- Reactores húmedos.
- Reactores secos.

3.2.1 Sistemas de una etapa vía húmeda

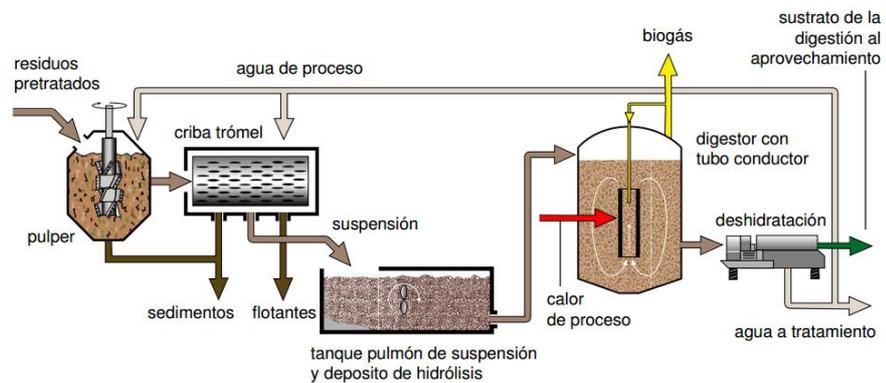


Ilustración 6. Sistema de una etapa vía húmeda.

Fuente (4)

Los residuos necesitan un pretratamiento donde se trituran y mezclan con agua fresca y agua reciclada, para que adquieran la consistencia óptima. La mezcla y la trituración se consigue en un único equipo denominado “pulper” mediante el trabajo de un agitador vertical. Mientras se está realizando la mezcla, la fracción pesada (latas, piedras, etc.) se acumula en el fondo del “pulper”, mientras que en la parte superior se acumulan los residuos ligeros (plásticos, maderas, etc.). Tanto la fracción pesada como la ligera se retiran periódicamente, con la consiguiente pérdida de materia orgánica arrastrada.

El contenido en sólidos totales a la entrada del reactor es menor del 15%, por lo que se puede utilizar un reactor de mezcla perfecta. Este tipo de reactor tiene la desventaja de la posible aparición de cortocircuitos, lo que disminuye el rendimiento en la obtención de biogás.

3.2.2 Sistema de una etapa vía seca

Este sistema también necesita un pretratamiento aunque es mucho menor que el de los sistemas húmedos, pues sólo es necesario eliminar las impurezas mayores de 60 mm. La adición de agua fresca también es mucho menor que en los sistemas húmedos. La mezcla del residuo, agua fresca y agua reciclada se produce en un mezclador de tornillo. El contenido en sólido queda comprendido entre el 20 y 40%, por lo que para bombearlo al reactor se necesitan bombas de pistón.

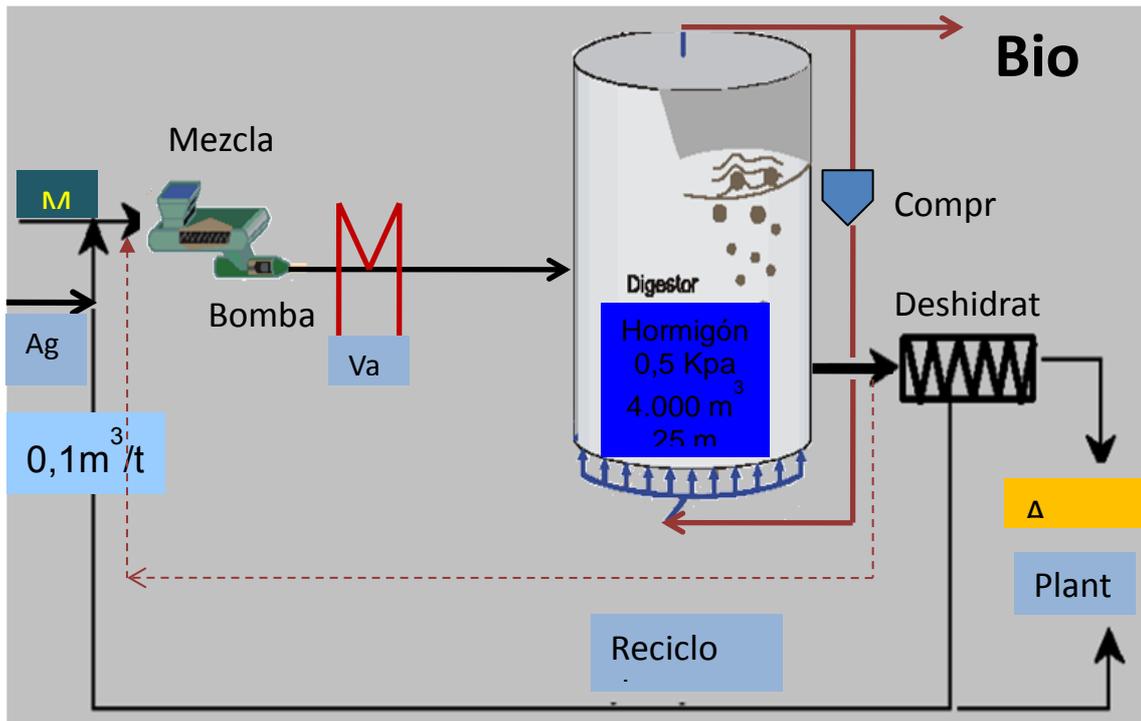


Ilustración 7. Sistema de una etapa vía seca.

Fuente (5). Elaboración propia

El reactor es del tipo de flujo en pistón, y en los diseños modernos no cuentan con partes móviles dentro del mismo. Sin embargo, para conseguir una cierta mezcla del residuo en el reactor, se suele inyectar parte del biogás producido a alta presión, después de pasar por un compresor.

3.3 Aprovechamiento

El biogás es el principal producto obtenido de la DA y sus aplicaciones más comunes (4) son la combustión directa dentro de la propia planta para la producción de calor y energía eléctrica. También existe un gran interés en la depuración del biogás para su utilización como combustible de automoción y/o su inyección en la red de gas natural.

Los elementos de los que dispone el aprovechamiento del biogás son los siguientes:

- Antorcha, para la eliminación controlada del biogás en caso de necesidad.
- Tanque pulmón, para absorber los posibles picos de producción y tener margen de maniobra.
- Una caldera para producir vapor, que se utiliza dentro de la misma planta para la higienización de los residuos y para mantener la temperatura dentro de los digestores.
- Un compresor para comprimir el biogás, en el caso de que se éste se utilice para realizar la mezcla en el digestor.
- Grupo de motogeneradores para la producción de electricidad.

Por otro lado, el digestato, residuo pastoso que sale del reactor, después de pasar por una

etapa de estabilización aeróbica (compostaje), se puede utilizar como enmienda orgánica.

3.4 Ventajas e inconvenientes

Ventajas:

- El biogás producido, con un alto poder calorífico, puede ser utilizado en la propia instalación para generación de electricidad y/o calor, con el consiguiente beneficio económico.
- El biogás es un biocombustible (energía renovable) favoreciendo el cumplimiento de los objetivos del protocolo de Kyoto, y los objetivos europeos de producción de energía renovable.
- Reducción de la cantidad de restos a gestionar.
- Reducción de la emisión de metano en los vertederos.

Inconvenientes:

- Inversión inicial elevada, en comparación con las plantas de compostaje.
- Requiere de una etapa de eliminación de impropios exhaustiva, si se utiliza para la digestión de residuos domésticos.
- Es difícil mantener la estabilidad del proceso.
- Es necesaria una planta de tratamiento de aguas.
- El arranque del digestor necesita largos periodos.

Confiando en las ventajas enumeradas, en la mitad del decenio pasado se construyeron grandes plantas de DA en España, pero los problemas de operación que han surgido, sobre todo por no realizar un pretratamiento adecuado, ha frenado el avance de esta tecnología. En Andalucía, como ya se ha comentado, solo se ha construido una planta de DA.

El **compostaje** descompone los compuestos orgánicos degradables en presencia de oxígeno, obteniéndose, además de dióxido de carbono, agua, calor y un producto estabilizado y libre de sustancias fitotóxicas, que puede ser utilizado como enmienda orgánica en la agricultura o para mejorar la calidad de los suelos.



Ilustración 8. Proceso de compostaje.

4.1 Legislación sobre la calidad del compost

Dado que el compost tiene la finalidad de ser empleado como sustrato de cultivo o como enmienda orgánica de suelos agrícolas, debe cumplir unas características y/o unos criterios de calidad.

El material de partida juega un papel muy importante, pues determinará la calidad del material final. Un material con alto contenido de nutrientes, materia orgánica y un contenido bajo en metales pesados, dará como resultado un compost que cumplirá con buena parte de las necesidades nutricionales de cultivos y suelos.

También hay que asegurar que durante el proceso de compostaje se hayan dado temperaturas elevadas, durante el tiempo necesario para la eliminación de los organismos patógenos o malas hierbas y que el proceso de maduración se haya realizado correctamente, para que el compost final sea un producto estable.

El aspecto y el olor, la granulometría, la capacidad de retención de agua, la humedad y la relación C/N son otros parámetros a tener en cuenta.

4.1.1 Legislación europea

En la decisión de la comisión de 3 de noviembre de 2006, por la que se establecen los criterios ecológicos revisados y los requisitos de evaluación y comprobación para la concesión de la etiqueta ecológica comunitaria a las enmiendas del suelo (2006/799/CE), quedan establecidas las distintas características que definen un compost de buena calidad.

- Contenido de sustancias peligrosas:

Elemento	mg/Kg (en materia seca)
Zn	300
Cu	100
Ni	50
Cd	1
Pb	100
Hg	1
Cr	100
Mo	2
Se	1,5
As	10
F	200

Tabla 3. Contenido máximo de metales. Etiqueta ecológica del compost.

Nota: estos valores son valores límites, salvo en el caso de que la legislación nacional sea más estricta.

- Contaminantes físicos: En el producto final (con una granulometría menor de 2 mm), el contenido de vidrio, metal y plástico habrá de ser inferior al 0,5 %, medido en peso de materia seca.
- Contenido de nitrógeno: en el producto no deberá superar el 3% de N total (en peso), el N inorgánico no deberá superar el 20% de total.
- Características del producto: Todos los productos se presentarán en estado sólido y contendrán, como mínimo, un 25 % en peso de materia seca y un 20 % de materia orgánica en peso de materia seca (medida mediante pérdida en la calcinación).
- Los productos no deberán afectar de manera adversa a la germinación o crecimiento de las plantas.
- Seguridad y salud: Salmonella: ausente en 25g de producto elaborado.
- Escherichia coli: <1000 número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado.
- Huevos de helmintos: ausentes en 1,5 g.
- Contenido de semillas/propágulos viables: no deberá superar las dos unidades por litro.

4.1.2 Legislación española

La calidad del compost final en España está regulada en el *Real Decreto 506/2013, de 28 de junio*, sobre productos fertilizantes. Esta normativa define varios tipos de compost, así como las características que deben cumplir, bajo el epígrafe “Grupo 6. Enmiendas orgánicas”. En la Tabla siguiente, que es un resumen de la Tabla del Real Decreto, solo se incluye la fila correspondiente al compost obtenido a partir de materia orgánica de RD.

Grupo 6. ENMIENDAS ORGÁNICAS					
N.º	Denominación del Tipo	Informaciones sobre la forma de obtención y los componentes esenciales	Contenido mínimo en nutrientes (porcentaje en masa) Información sobre la evaluación de los nutrientes Otros requisitos	Otras informaciones sobre la denominación del tipo o del etiquetado	Contenido en nutrientes que debe declararse y garantizarse. Formas y solubilidad de los nutrientes. Otros criterios
02	Enmienda orgánica Compost	Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), bajo condiciones controladas, de materiales orgánicos biodegradables del Anexo IV, recogidos separadamente	<ul style="list-style-type: none"> - Materia orgánica total: 35% - Humedad máxima: 40% - C/N < 20 No podrá contener impurezas ni inertes de ningún tipo tales como piedras, gravas, metales, vidrios o plásticos El 90% de las partículas pasarán por la malla de 25 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> - pH - Conductividad eléctrica - Relación C/N - Humedad mínima y máxima - Materias primas utilizadas - Tratamiento o proceso de elaboración, según la descripción indicada en la columna 3 	<ul style="list-style-type: none"> - Materia orgánica total - C orgánico - N total (si supera el 1%) - N orgánico (si supera el 1%) - N amoniacal (si supera el 1%) - P₂O₅ total (si supera el 1%) - K₂O total (si supera el 1%) - Ácidos húmicos - Granulometría

Tabla 4. Enmienda orgánica de FORS, RD 506/2013.

El *anexo V* del citado Real Decreto delimita los rangos de calidad considerando los siguientes parámetros:

- **Nivel de nitrógeno orgánico:** en los abonos orgánicos el Nitrógeno orgánico debe ser al menos un 85% del nitrógeno total.
- **Límite máximo de microorganismos:** los productos fertilizantes de origen orgánico no superarán los siguientes niveles máximos de microorganismos.
 - Salmonella: ausente en 25g de producto elaborado
 - Escherichia coli: <1000 número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado.
- **Límite máximo de metales pesados:** no podrán superar el contenido de metales pesados indicado en la siguiente tabla.

Metal pesado	Límites de concentración		
	Sólidos: mg/kg de materia seca		
	Líquidos: mg/kg		
	Clase A	Clase B	Clase C
Cadmio	0,7	2	3
Cobre	70	300	400
Níquel	25	90	100
Plomo	45	150	200
Cinc	200	500	1000
Mercurio	0,4	1,5	2,5
Cromo (total)	70	250	300
Cromo (VI)	No detectable según método oficial	No detectable según método oficial	No detectable según método oficial

Tabla 5. Contenido máximo de metales. Real Decreto 506/2013.

El Real Decreto es consecuente con la Ley 22/2011, y solo denomina compost al producto obtenido si la materia prima de partida es biorresiduo recogido selectivamente. El “producto” que se obtiene en las plantas de “compostaje” que trabajan utilizando como materia de entrada la fracción resto de residuos mezclados se ha de denominar material bioestabilizado.

4.2 Etapas en el proceso del compostaje

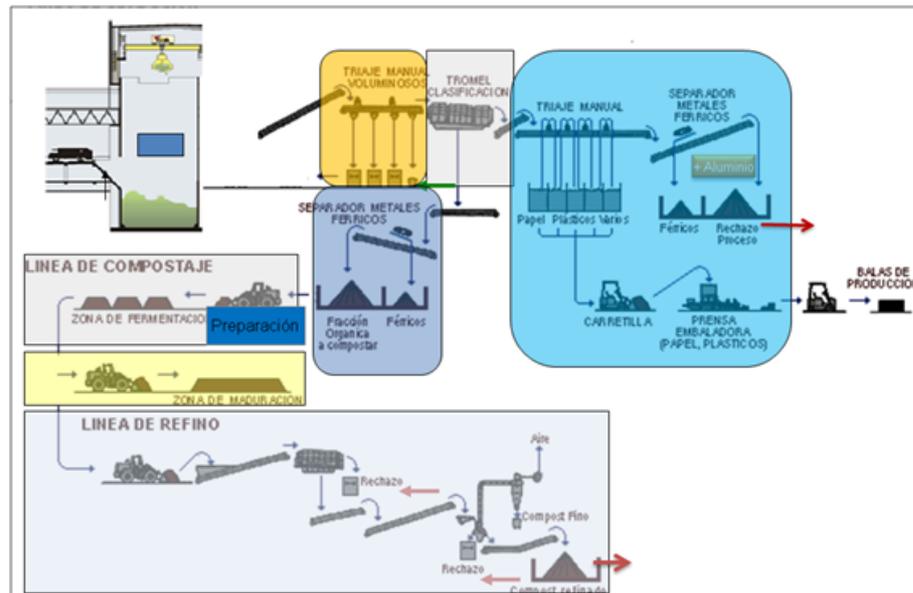


Ilustración 9. Esquema de la planta de compostaje.

Fuente (6)

Las etapas principales en una planta de compostaje son (7) :

- Preparación.
- Fermentación.
- Maduración.
- Afino.

Además, las modernas plantas de compostaje también disponen de una etapa de control de olores.

4.2.1 Preparación

Los residuos domésticos, cuando llegan a la planta, no cumplen con todos los requisitos necesarios para el compostaje óptimo, por lo que se realizan una serie de operaciones de preparación:

- **Triaje** de separación de voluminosos.
- **Clasificación** mediante un trómel que separa la fracción orgánica del resto de residuos.
- **Separación** magnética en la fracción orgánica a la salida del trómel, para recuperar los materiales metálicos.

Antes de pasar a la posterior etapa del proceso de compostaje, se tiene que comprobar que los residuos cumplen:

- **Tamaño de partículas:**

Si las partículas son demasiado grandes se generan abundantes espacios por los que puede haber una pérdida significativa de humedad, y por tanto, una disminución de la actividad microbiológica.

Por otra parte, un tamaño excesivamente pequeño hace que los residuos se compacten, lo que lleva a un descenso en la entrada de aire y oxigenación, que provocaría la disminución de la actividad microbiana.

El tamaño de partícula óptimo es entre 5 y 6 cm.

- **Relación C/N:**

La relación C/N es un factor indispensable para que el proceso de compostaje se dé correctamente. El rango óptimo para compostar los residuos orgánicos está entre 20 y 25.

Cuando la relación C/N es elevada, el nitrógeno se convierte en un factor limitante y el proceso se ralentiza, ya que los microorganismos deben oxidar el exceso de carbono, debido a la baja disponibilidad de nitrógeno para la síntesis proteica.

Si la relación C/N es baja, el compostaje será más rápido, pero el exceso de nitrógeno se perderá en forma de amoníaco, el cual es muy oloroso y supone un problema para el medio ambiente.

- **Humedad**

La presencia de agua en los residuos resulta imprescindible en el proceso de compostaje, pues las bacterias viven en la agua y obtienen su alimento (materia orgánica) disuelta en agua.

Sin embargo, un exceso de humedad impediría la presencia de oxígeno en la pila y dificultaría la circulación del aire a través del residuo, por lo que podría provocar condiciones anaeróbicas..

El porcentaje (% peso) de humedad óptimo se sitúa entre el 40 a 60 %.

El residuo que sale del trómel debe cumplir con todos los anteriores parámetros.

4.2.2 Etapa de fermentación

Esta etapa consiste en la degradación de la materia orgánica fácilmente degradable mediante la acción de diversos microorganismos presentes en los propios residuos.

Los distintos métodos por los que se lleva a cabo esta etapa y los parámetros que la controlan se explican con más detalle en el siguiente apartado 4.3.

4.2.3 Maduración

Una vez que se ha agotado la materia fácilmente fermentable, la actividad bacteriana y la temperatura disminuye, pero esto no significa que el compost esté maduro, ya que si este se añadiera al suelo se causarían más daños que beneficios.

Para llevar a cabo la maduración, se coloca el material fermentado en pilas estáticas, es decir sin que se volteen, durante unas 4 o 6 semanas.

La determinación de la madurez del compost no es una tarea fácil, y en muchas ocasiones es la experiencia del operador la que decide si el compost ha finalizado su maduración.

4.2.4 Afino del compost

Esta es una etapa opcional, que solo se realiza si se va a comercializar el compost, cumpliendo con la legislación vigente: granulometría, contenido en metales pesados y porcentaje de impurezas.

La etapa de afino consiste en un cribado del compost en un trómel para eliminar la fracción superior a 25 mm y en la eliminación de impurezas pesadas mediante una mesa densimétrica.

4.3 Etapa de fermentación

A continuación se van a describir y comparar los distintos métodos de producción de la etapa de fermentación (8):

4.3.1 Sistemas abiertos

Los sistemas abiertos tienen un menor coste de inversión y operación y, además, tienen un manejo e instalación sencillos. Según sea la aireación dentro de la pila, forzada o con volteo, se pueden dividir en:

- **Compostaje en hilera.**

Es el sistema original y uno de los métodos más antiguos y sencillos de compostaje. Consiste en construir hileras del material orgánico al aire libre y dejarlas fermentar durante unas 8 semanas.

Las dimensiones típicas de las hileras son de 2 a 2,3 m de altura por 4 a 5 m de anchura de la base, siendo la longitud variable. Las dimensiones de la base las suele fijar la volteadora que se encarga de airear la pila. En las primeras semanas se voltea dos veces por semana y se mantiene la temperatura en 55°C. Los volteos favorecen la renovación de la mezcla y del oxígeno en las hileras.

La circulación de aire dentro de la pila está limitada a la convección natural: salida del aire caliente de la pila y entrada de aire frío.

El principal problema de este método de fermentación es la liberación de compuestos olorosos durante el proceso de volteo, lo que puede producir molestias en las zonas cercanas a la planta. Además, al estar al aire libre, si las pilas no están a cubierto, la lluvia puede producir lixiviados.



Ilustración 10. Compostaje en hilera y volteadora.

Fuente (3)

- **Compostaje en pila estática aireada.**

Este método de compostaje consiste en colocar la masa de residuos sobre una red de tuberías perforadas conectadas a un ventilador que aspira o inyecta aire a través de ellas. El control de la temperatura y del oxígeno dentro de la pila se realiza mediante la regulación del caudal del ventilador.

Las dimensiones óptimas son de 2 a 2,5 m de altura. En este caso, no hace falta una anchura específica, ya que no se va a voltear.

Se suele colocar encima de la pila de residuos una capa de compost ya maduro para el control de olores. Este sistema permite una transformación de residuos orgánicos en compost más rápida que el método de hileras.

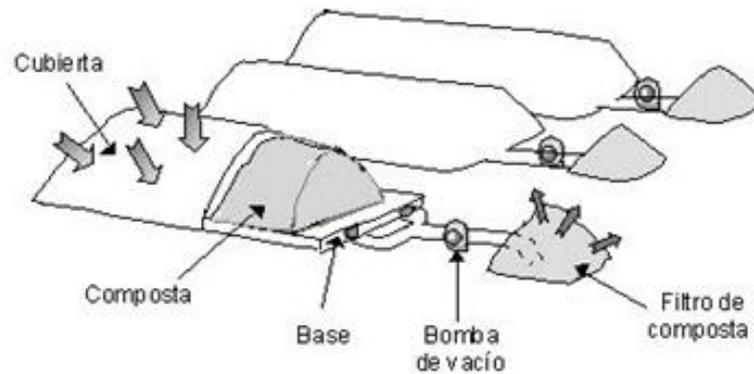


Ilustración 11. Esquema de compostaje en pila estática aireada.

Fuente (8)

4.3.2 Sistemas cerrados:

Los sistemas cerrados necesitan una infraestructura más complicada y costosa, al tener que realizarse la fermentación en una instalación cerrada y emplear maquinaria más compleja. Estos sistemas permiten:

- un mejor control de los distintos parámetros del proceso, controlando la cantidad de aire que entra al sistema impulsado por los ventiladores.
- la posibilidad de realizar un proceso continuo.
- la recogida y gestión de los posibles lixiviados.
- La recogida y tratamiento de los gases a la salida del reactor, por lo que se reduce en gran medida el problema de molestias por olores a las poblaciones vecinas.

Dado el control que se ejerce, el proceso de fermentación es bastante rápido, pudiendo completarse la fermentación en un plazo menor de 2-3 semanas.

Su principal inconveniente, como se ha comentado anteriormente, es el elevado coste de inversión y de operación de las instalaciones.

- **Compostaje en tambor**

La fermentación tiene lugar en un tambor de rotación lenta, que puede trabajar en continuo o por cargas. El residuo orgánico se deposita directamente al alimentador de los tambores de compostaje.

La principal ventaja de este sistema en tambor (9) es que consigue un cierto grado de mezcla y homogeniza los residuos, lo que se traduce en menor tiempo de fermentación comparado con otros tipos de reactores.



Ilustración 12. Compostaje en tambor.

Fuente (9)

Las principales desventajas del compostaje en tambor son:

- Elevado consumo eléctrico necesario para hacer girar el tambor.
- La gran superficie ocupada.

- **Compostaje en contenedor**

Es una técnica muy similar a la fermentación en túnel, pero con la diferencia de que, en este sistema, el compostaje se realiza en contenedores de acero, generalmente de menor tamaño que los túneles de hormigón. A menudo, es un proceso en continuo, con carga del material a compostar en la parte anterior y descarga por la parte posterior.

La principal ventaja de este tipo de reactor es su bajo coste, comparado con el compostaje en túneles, pero como desventajas se pueden citar su elevado coste de mantenimiento (corrosión) y su baja capacidad.



Ilustración 13. Compostaje en contenedor.

Fuente (10)

- **Compostaje en túnel**

El diseño de la planta objeto de este proyecto utilizará el compostaje en túnel. El proceso tiene lugar en un túnel cerrado construido en hormigón. A diferencia del reactor en tambor, los residuos se mantienen estáticos durante todo el proceso.

El túnel tiene un falso suelo (10) donde está instalada una red de tuberías de ventilación a lo largo de cada túnel. El aire es impulsado por un ventilador a través del material que se va a compostar. La regulación del caudal de aire permite el control de la temperatura y el valor medio de oxígeno en la pila.

En el techo del túnel, se encuentra un sistema de rociado que se encarga de regar la pila, para que se mantenga el porcentaje adecuado de humedad.



Ilustración 14. Compostaje en túnel (11)

4.4 Parámetros de control del proceso de compostaje

Aunque son muchos los factores que intervienen en el proceso de fermentación, cabe destacar la **temperatura, humedad, oxígeno** (7).

- **Temperatura**

La degradación aeróbica es un proceso altamente exotérmico y el calor que se produce resulta en un incremento de temperatura en la masa que se está compostando. El aumento en la temperatura de la masa de residuos es una confirmación de que el proceso se está desarrollando correctamente.

Cada especie microbiana tiene un rango de temperatura óptimo en el que su actividad y crecimiento son más efectivos. En los primeros días, el régimen de temperatura es mesofílico (30 a 38 °C), pero la subida de temperatura, debido a las reacciones exotérmicas en los residuos, hace que el proceso se desarrolle en el régimen termofílico (55-60 °C). En los últimos días, cuando ya casi se ha agotado la fracción fácilmente biodegradable, la temperatura vuelve a bajar y se vuelve al régimen mesofílico. Por lo tanto, la estabilización de temperatura final significa que la etapa de fermentación ha terminado y se puede comenzar con la maduración.

La temperatura en la pila se regula con la aireación. En los sistemas de aireación forzada se actúa sobre la corriente de aire que se inyecta y en el compostaje en hilera se controla la temperatura variando la frecuencia de volteo.

Otro de los motivos por el cual hay que controlar la temperatura es para conseguir la destrucción de los elementos patógenos, ya que la tasa de mortalidad de éstos es función del tiempo y la temperatura: cuanto más alta sea la temperatura, menos tiempo se necesita para destruirlos. Un valor orientativo para conseguir un compost aceptable es mantener la temperatura a 55°C durante una semana en compostaje en hileras o a 65°C durante tres días, si el compostaje se realiza en reactor.

- **Humedad**

Hay que mantener el porcentaje (% peso) de humedad en su rango óptimo: 40 a 60 %.

- **Aireación (Oxígeno)**

Al tratarse de un proceso aeróbico, el oxígeno es indispensable para que los microorganismos puedan realizar la degradación correctamente. Durante el proceso de fermentación se consume oxígeno y, si no se renueva el aire, el contenido de oxígeno va disminuyendo, sobre todo en el interior de la pila. Si no se airea la pila, los microorganismos anaeróbicos sustituyen a los microorganismos aeróbicos, la velocidad de descomposición disminuye y aparecen los malos olores y gases nocivos. Para un correcto funcionamiento, es necesario mantener en todos los puntos de la masa de fermentación al menos un 10% (v/v) de oxígeno.

En los sistemas cerrados y en las pilas aireadas, el nivel de oxígeno en la pila se regula actuando sobre el ventilador. Sin embargo, una excesiva aireación puede producir el enfriamiento de la pila y reducir la actividad metabólica del proceso.

En el sistema de hileras, solo se puede modificar el nivel de oxígeno dentro de la pila durante los volteos.

4.5 Control de olores.

El control del olor es una de las principales preocupaciones en la gestión de las instalaciones de tratamientos de residuos orgánicos, especialmente si se ubican cerca de áreas residenciales.

Cuando se está compostando, las principales causas de la generación de olores son (12):

- **Baja relación carbono-nitrógeno (C/N)** en la materia a compostar, por lo que en el residuo hay gran cantidad de nitrógeno que los microorganismos no pueden metabolizar y es liberada como NH_3 , compuesto tóxico y muy oloroso.
- **Condiciones anaerobias en algún lugar de la pila**, bien por un exceso de humedad que impide la circulación del aire o bien por un bajo contenido en O_2 por insuficiencia de aireación en la pila.

Si se realiza una buena gestión del proceso de compostaje, controlando los valores de C/N, humedad y aireación, se puede minimizar la producción de olores, pero todavía se requerirá de algún tratamiento de los gases, antes de emitirlos a la atmósfera. Por ejemplo:

- en las pilas aireadas se añade una capa de compost maduro por encima de la pila de residuos, para que absorba los gases que se emiten e impida que lleguen al exterior.
- En los procesos de fermentación cerrados se aspira el aire contaminado a la salida del reactor, y se lleva a equipos de control de olores, como torres de absorción, filtros de carbón activo o biofiltros.

El método más utilizado en las plantas de compostaje es la instalación de un **biofiltro**, que usa materiales orgánicos donde viven determinados microorganismos. Cuando el gas pasa a través del biofiltro, los microorganismos absorben y/o destruyen los compuestos olorosos. El material orgánico suele ser una mezcla de compost maduro con otro material estructurante como corteza de árboles. El aire impulsado a través del biofiltro sale al exterior con una cantidad de compuestos olorosos aceptable y no producirá molestias.

5 OBTENCIÓN DE BIOETANOL

A partir de la fracción orgánica de los residuos domésticos también se puede obtener bioetanol de 2ª generación (13). Este proceso no cuenta con ninguna planta comercial funcionando en el mundo y su estado actual es del desarrollo en planta piloto. En concreto, Abengoa dispone de una planta piloto, con una capacidad de 15.000 t/año, en la población salmantina de Babilafuente.

Como se puede observar en la Ilustración 15, la planta propuesta utiliza los residuos orgánicos en “masa” para producir principalmente bioetanol, pero también obtendría energía, materiales reciclables, combustible derivado de residuos (CDR) y combustibles líquidos.

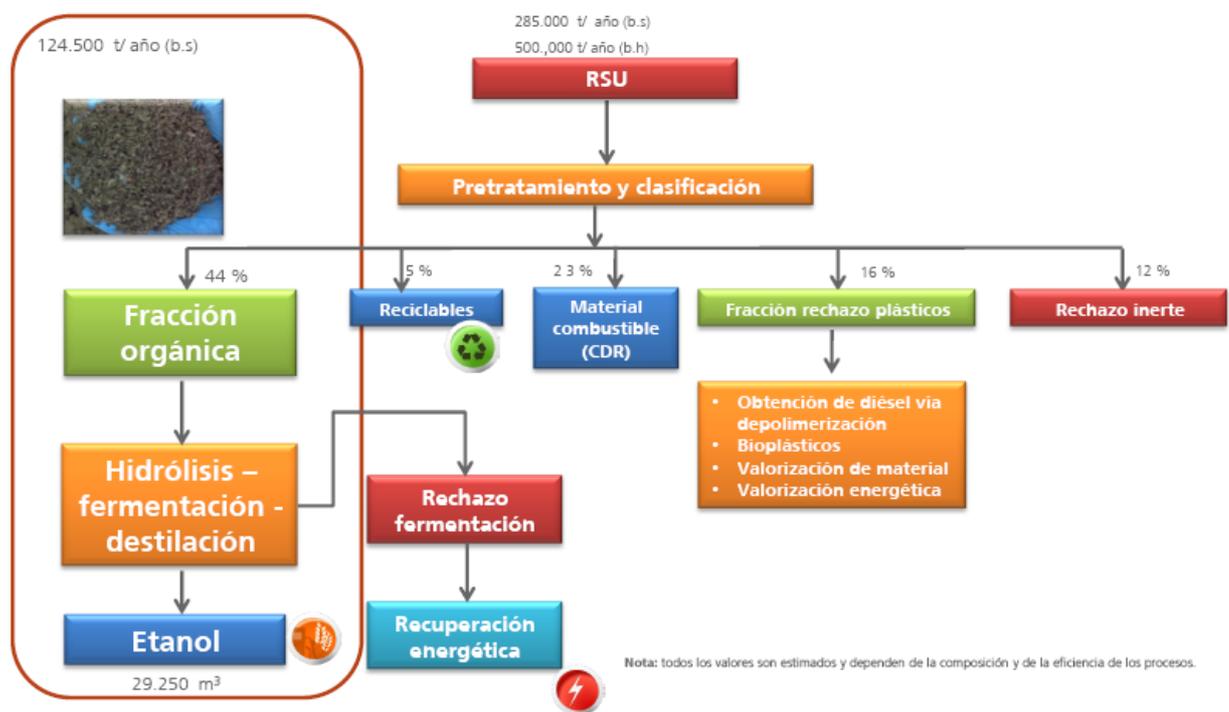


Ilustración 15. Proceso de obtención de bioetanol.

Fuente Abengoa

El proceso consta de las siguientes etapas:

- hidrólisis enzimática: la celulosa y la hemicelulosa de los residuos se rompen enzimáticamente, para producir azúcares libres.
- Fermentación de los azúcares: microorganismos convierten en etanol los azúcares (hexosas y pentosas) producidos en el paso anterior.
- El bioetanol se separa del resto de sustancias por destilación, hasta conseguir una concentración del 99,5 % peso.

- La fracción de los residuos no fermentada, básicamente lignina, se utiliza como combustible en una caldera para producir energía y vapor, que se utiliza dentro del propio proceso.

Según los datos de la referencia, se pueden obtener 60 litros de etanol/t de residuos.

PARTE 2. MEMORIA DESCRIPTIVA

1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y LÍMITES DE BATERÍA

El proceso de compostaje requiere de varias etapas para su realización. A continuación se realiza una descripción general del proceso completo que quedará desarrollada con mayor detalle en los siguientes apartados de esta Memoria descriptiva. Los cálculos necesarios para el diseño de los equipos principales se encuentran en la parte 4 del proyecto: Memoria de cálculo.

Las etapas incluidas en el diseño técnico de este proyecto se han rodeado de una línea azul. Sin embargo, en el apartado del estudio económico se ha incluido toda la planta, rodeada de la línea roja.

Para la descripción del proceso se va a seguir el siguiente diagrama de bloque adjunto:

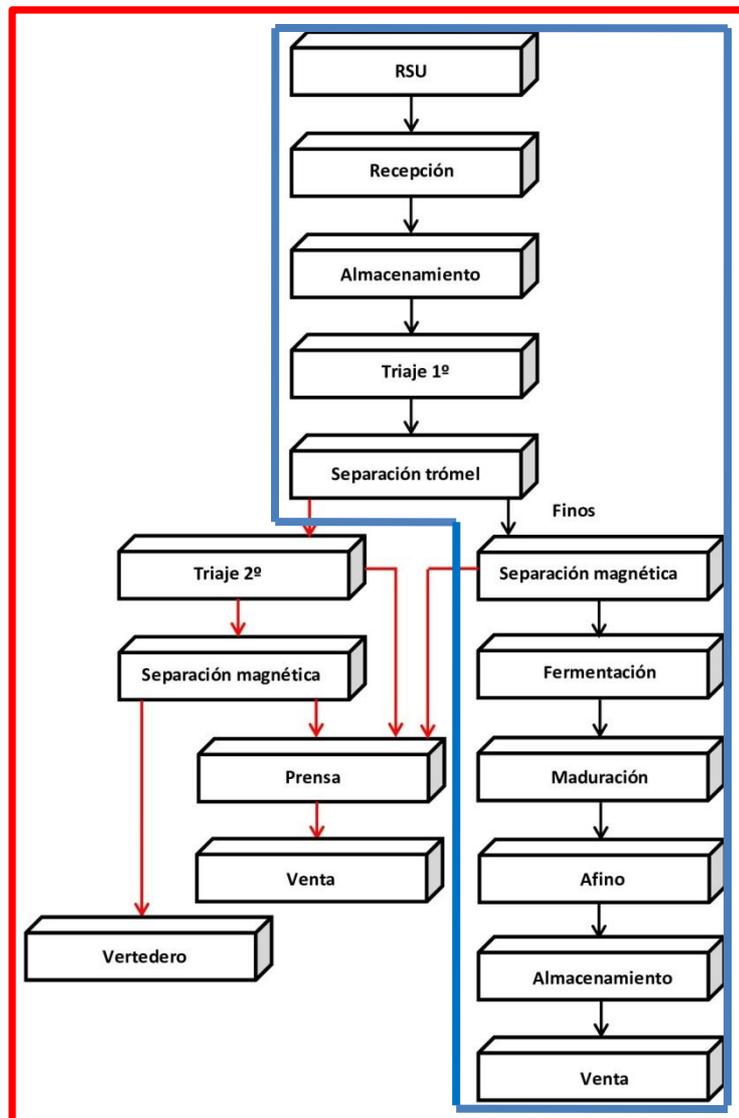


Ilustración 16. Diagrama de bloque del proceso.

- Los residuos llegan a la planta mediante camiones, que son pesados y descargan los residuos en un foso de almacenamiento.

- Un puente grúa con su correspondiente pulpo recoge los residuos del foso y los descarga en la cinta de triaje primario.
- En el triaje primario se retiran manualmente las fracciones voluminosas (reciclables o no) que pueden provocar atascos en las siguientes etapas, especialmente en el trómel de separación.
- En el trómel, que es una criba rotatoria, los residuos se separan en dos fracciones: Los finos que contienen la mayor parte de la materia orgánica y los gruesos, constituidos básicamente por envases. Esta fracción de “rebose” se trata mediante un nuevo triaje manual y una separación magnética, para recuperar una pequeña fracción de plásticos, papel/cartón y metales. El material recuperado se prensa y se vende. La fracción de “rebose” no recuperada se destina al vertedero.
- La fracción fina que sale del trómel pasa por un separador magnético, que recupera los productos férricos no deseados en la fracción orgánica que se envían a la etapa de fermentación.
- En la fermentación se logra, mediante la descomposición aerobia de la fracción orgánica fácilmente degradable, la higienización del residuo y una reducción sustancial en volumen.
- En la siguiente etapa, la maduración, a través de reacciones bioquímicas se consigue un material estabilizado con las propiedades adecuadas para su uso como enmienda orgánica.
- En la etapa opcional de afino, que solo se realiza si el material se va a comercializar, se logra la granulometría apropiada y la separación de vidrios, piedras, etc. , quedando un producto listo para su uso.

1.1 Datos de partida

El diseño se ha realizado en base a los siguientes datos:

- Población de 160.000 habitantes.
- Producción media de residuos de 1,45 kg por habitantes al día.
- Zona no turística. La variación de la producción de residuos de cualquier mes con respecto a la media anual es inferior al 10 %.
- Capacidad anual : $160000 \text{ hab} * 1,45 \text{ kg/hab.día} * 365 \text{ días} \cong 85000 \text{ t/año}$

- Composición de los residuos:

Composición de los Residuos (% p/p)	
Materia orgánica	44,06
Papel y cartón	21,18
Plástico	10,59
Vidrio	6,93
Metales	4,11
Maderas	0,96
Otros	12,17

Tabla 6. Composición media de los RD.

1.2 Regimen de triaje

La planta permite la recepción de residuos durante los siete días de la semana. Sin embargo, la sección de pretratamiento de los residuos (foso, grúa y trómel), así como la sección de recuperación de materiales reciclables, sólo trabajará de lunes a viernes (260 días al año), en dos turnos de 8 horas. Se ha estimado que en cada turno se pierden dos horas por paradas imprevistas, limpieza, mantenimiento, etc.

Por lo tanto, la capacidad horaria de diseño de la sección de pretratamiento será:

$$85000 \text{ t/año} / (260 \text{ días} * 12 \text{ horas/día}) = 27,25 \text{ t/h} \quad [1]$$

Siendo conservadores, se toma una **capacidad de diseño de los equipos de 30 t/h.**

2 RECEPCIÓN DE RESIDUOS Y PREPARACIÓN

2.1 Foso y Puente grúa

Los camiones, después de pasar por la báscula, se dirigen al foso de almacenamiento para descargar los residuos.

El foso se diseña con una capacidad de almacenamiento de los residuos de 3 días, lo que permite el almacenaje de los residuos de sábado y domingo, cuando la sección de pretratamiento de la planta no está operativa, y, además, se dispone de capacidad para un día extra, por si las circunstancias lo requieren.



Ilustración 17. Foso y puente grúa

Fuente (14)

Con una densidad media de los residuos en el foso de 300 kg/m^3 (2), esto significa que el volumen del foso debe ser:

$$160000 \text{ hab} * 1,45 \text{ kg/hab.día} * 3 \text{ días} * 1 \text{ m}^3/300 \text{ kg} = 2320 \text{ m}^3 \quad [2]$$

- Profundidad (de 6 a 12 metros)

La profundidad del foso viene fijada por el nivel freático de las aguas subterráneas, la presencia de rocas y la posible formación de zonas anaerobias en el fondo del foso. En principio, se elige una profundidad de 8 m para evitar posibles zonas anaerobias.

- Anchura

La anchura del foso se determina en función de la luz de la grúa y el pulpo. Como se verá más adelante, el puente grúa se diseña con una luz de 10 metros.

- Longitud

$$2320 \text{ m}^3 / (10 \text{ m} * 8 \text{ m}) = 29 \text{ metros} \quad [3]$$

Los puestos de descarga de los camiones tendrán una anchura de 4,5 m, por lo que con la anchura del foso de 29 m se permitirá la descarga simultánea de 6 camiones

Por lo tanto, las dimensiones del foso serán 10 x 8 x 29 m.

2.1.1 Puente Grúa/pulpos

El puente grúa y el pulpo se encargan de recoger los residuos en el foso y descargarlos en la cinta de carga de alimentación a la planta. El puente grúa se mueve longitudinalmente sobre unos carriles situados por encima del foso. Por su parte, el pulpo se mueve transversalmente sobre el puente grúa. Todo el proceso es manejado por un gruista situado en una cabina anexa al foso.

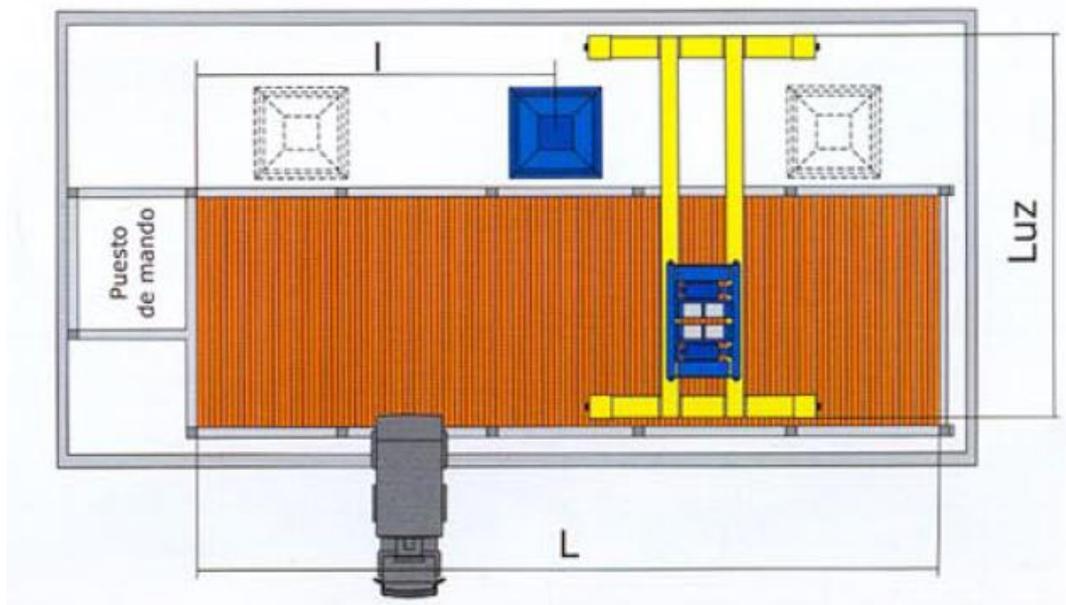


Ilustración 18. Puente grúa.

Fuente (14)

El ciclo de carga/descarga del pulpo (ver apartado 0 de la memoria de cálculo) dura 2,5 minutos, por lo que una hora se pueden hacer 20 descargas, dejando 10 minutos por hora para realizar otras tareas en el foso.

Para poder cumplir con el ritmo de trabajo de 30 t/h, es necesario que cada descarga del pulpo sea de $30 \text{ t/h} / 20 \text{ descargas/h} = 1,7 \text{ t/descarga}$.

Del catálogo, se elige el puente grúa GHF (Referencia (14)):

Modelo de grúa: GHF

Capacidad de carga de la grúa: 4 t de carga

Luz de la grúa: 10 metros

Velocidad de la grúa: 40-80 m/min

Capacidad del pulpo: 3 m³.

Velocidad de translación del carro: 40:60 m/min

Velocidad de elevación del pulpo: 16:40 m/min.

Apertura máxima del pulpo: 3,075 m.

2.2 Triaje primario de voluminosos

El pulpo descarga los residuos en un alimentador de placas con suelo móvil que transporta los residuos hasta la cinta de selección de triaje manual de voluminosos, que son residuos que, bien por su tamaño o densidad, hay que retirar de la corriente de residuos para que no se produzcan atascos en las secciones posteriores.

Las características de la cinta de selección son:

Anchura: 0,6 metros

Puestos de operadores: 2

Longitud del puesto de operador: 1,5 m

Velocidad de la cinta: regulable, máxima 0,5 m/s

Los triadores retirarán el cartón de gran tamaño, chapas de acero, botellas de vidrio enteras, maderas, electrodomésticos, etc. Los residuos se dejan caer a unos trojes de almacenamiento, desde los cuales son retirados periódicamente, para transportarlos a vertedero o a las prensas de materiales recuperados, según su valía.

Se ha estimado (15) que en este triaje manual se retira el 3 % (0,9 t/h) de los residuos que entran:

- El flujo del residuo que entra en el triaje es 30 t/h.
Los residuos resultantes después del triaje son 29,10 t/h.

2.3 Trómel

La cinta de triaje manual descarga en un trómel, que es una criba rotativa constituida por un cilindro de chapas perforadas curvadas o por paneles de malla convenientemente ensamblados que gira horizontalmente alrededor de un eje y con una ligera inclinación para facilitar el avance del material. El trómel obtiene dos corrientes: finos que caen por los orificios de las chapas y “rebose” que sale al final del trómel.

La función del trómel es separar la materia orgánica del resto de materiales que constituye el residuo. La elección de la luz de malla de trómel es crítica, siendo un valor típico el de 80 mm. Si la luz de malla fuera superior a 80 mm, el caudal de finos obtenido sería mayor, pero la materia orgánica estaría más contaminada. Por el contrario, si la luz de malla fuera inferior, se obtendría una corriente de finos (orgánica) más pura, pero se perdería una gran cantidad de materia orgánica, que saldría por la corriente de rebose, acompañando a los materiales reciclables.

El trómel posee unas cuchillas al inicio del mismo con la función de romper las bolsas de basura.



Ilustración 19. Interior del trómel.

- Residuo entrante en el trómel 29,10 t/h.
Corriente de finos tras el trómel 15,61 t/h (Ver apartado 1.3 de la memoria de cálculo)

Composición de la corriente de finos:

	Antes del trómel (t/h)	Finos (t/h)	Rechazo(t/h)
Materia orgánica	13,22	9,91	3,30
Papel y cartón	6,22	0,93	5,29
Plástico	3,04	0,30	2,74
Vidrio	2,03	1,63	0,41
Metales	1,10	0,22	0,88
Maderas	0,20	0,15	0,05
Otros	3,29	2,47	0,82
Total	29,10	15,61	13,49

Tabla 7. Distribución de los residuos en el trómel.

Como puede observarse, el trómel concentra la materia orgánica pasando de un porcentaje del 45 %

a la entrada al 63,5 % en la corriente de finos.

El trómel seleccionado (16) tiene las siguientes especificaciones:

- *Tipo: TR3/8/10*
- *Fabricante: Masías recycling*
- *Dimensiones: diámetro 3 m*
Longitud tamiz 8 m
Longitud total 10 m
- *Luz de malla: 80 mm*
- *Potencia: 15 Kw*
- *Capacidad: 150 m³/h*

2.4 Separador magnético

El separador magnético, que se compone de una cinta horizontal magnética situada encima de la cinta por la que circulan los residuos, atrae a la fracción férrica y la descarga posteriormente en un troje.

La función de este separador es doble:

- Recuperación de un material valioso (hierro), que se venderá posteriormente.
- Eliminación de un material, que en las condiciones de fermentación, contaminarán con metales el compost obtenido.



Ilustración 20. Separador magnético.

Fuente (17)

La eficacia de separación de estos equipos ((17) es del 80 %, por lo que:

- Corriente de residuos entrante en el separador magnético 15,61 t/h.
El flujo (ver apartado 1.4 de la memoria de cálculo)) tras el separador magnético es de 15,33

t/h.

Las características del separador magnético seleccionado son:

- *Modelo: ODEP de overband con electroimán.*
- *Fabricante: Drago electrónica.*
- *Dimensiones del overband 2220 x 1005 x 620 mm*
- *Potencia 2,7 Kw*
- *Eficacia de separación de férricos : 80 %*

3 ALMACENAMIENTO INTERMEDIO

Los finos del trómel (básicamente residuos orgánicos), después de pasar por el separador magnético, se almacenan temporalmente, antes de entrar en los túneles de fermentación. Este almacenamiento intermedio permite seguir trabajando a los túneles de fermentación, aunque se pare la sección de pretratamiento de la planta.

El almacenamiento se realizará en una superficie cubierta, con suelo de hormigón y con recogida de lixiviados.

La zona se diseña con una altura de almacenamiento de los residuos de 2,5 metros, para evitar posibles zonas anaerobias. Al igual que en el foso, se ha previsto una capacidad de almacenamiento de tres días, aunque sólo en casos extremos estará el residuo más de dos días. La densidad de los finos del trómel se ha considerado 450 Kg/m^3 (2).

Por lo tanto, la superficie necesaria será de:

$$160000 \text{ hab} * 1,45 \text{ kg/hab.dia} * 0,511 \text{ kg entran/kg finos} * 3 \text{ días} / 450 \text{ kg/m}^3 / 2,5 \text{ m} = 320 \text{ m}^2 \quad [4]$$

3.1 Carga y descarga del túnel

La alimentación del túnel se puede realizar por medios:

- mecánicos “manuales” mediante palas cargadoras (Ver Ilustración 21).
Este sistema se emplea en plantas de tamaño pequeño o mediano, como es el caso de la planta que se está diseñando. Además, la pala cargadora puede realizar otras funciones dentro de la planta.
- sistemas automáticos que introducen los residuos (Ver Ilustración 22), transportándolos por cintas móviles, que descargan el material desde la parte superior o frontal del túnel. Su elevado precio hace que sólo se empleen en plantas de gran tamaño y con un elevado número de túneles.

Suponiendo (2):

- una distancia desde la zona de almacenamiento temporal hasta los túneles de 120 m.
- cada una de las operaciones de carga y descarga de la pala de 4 m^3 de capacidad dura 30 s.
- velocidad de desplazamiento medio de la pala por la planta de 10 km/h.

$$\text{se tardaría : } (265 \text{ m}^3 / 4 \text{ m}^3) * (30\text{s} + 30\text{s} + 200\text{m}/10000\text{m} * 3600\text{s}) / 3600 \text{ s/h} = 2,5 \text{ h} \quad [5]$$

Por lo tanto, la pala podría cargar un túnel y descargar otro en aproximadamente 5 horas, por lo que le queda tiempo más que suficiente para otras tareas dentro de la planta.

Nota: 265 m^3 de capacidad de cada túnel.



Ilustración 21. Carga de un túnel con pala cargadora



Ilustración 22. Carga automática de los túneles (18)

4 FERMENTACIÓN EN TÚNEL

La fermentación, que es el proceso de la degradación de la materia orgánica por medio de



microorganismos aeróbicos, se desarrolla, en este proyecto, dentro de **túneles cerrados**, lo que consigue una degradación más rápida y completa, con un impacto mínimo en el entorno y un mayor control de las variables que intervienen en el proceso

La materia orgánica permanecerá en el túnel por un periodo de 14 días, durante el cual se desarrollan las reacciones bioquímicas producidas por los microorganismos, para degradar la materia prima, higienizando y estabilizando el residuo.

Ilustración 23. Interior del túnel de fermentación.

Fuente (19)

Esta zona de la planta trabajará los 7 días de la semana, llenándose un túnel por día.

$$160000 \text{ hab} * 1,45 \text{ kg/hab.día} * 15,33/30 = 119 \text{ t/día de materia a fermentación.} \quad [6]$$

$$\text{Volumen de materia a compostar} = 119 \text{ t} * 1 \text{ m}^3/0,45 \text{ t} = 265 \text{ m}^3/\text{día} \quad [7]$$

Especificaciones del túnel:

- *Dimensiones túnel:*

Altura 5m

Ancho de 5 m

Largo 15 m

La altura y la anchura son típicas de estos sistemas, variando la longitud para adaptarse a la producción de cada planta.

- Dimensiones de la pila: *Altura de 3,5 m*
 Ancho 5 m
 Largo 15 m

El túnel no se llena hasta el techo, sino que se deja un espacio vacío por encima de la pila, para colocar el sistema de rociado de agua y la captación de los gases del túnel.

- *Numero de túneles: 14 (1 por día)*
- *Periodo de fermentación: 14 días*
- *Periodo de carga/descarga del túnel: 1 túnel al día*
- *Material de construcción: hormigón.*
- *Puertas estancas y aisladas térmicamente, para no dejar salir la energía ni los gases.*

4.1 Ventilación

La función de la ventilación del túnel es doble:

- Suministro de aire a los microorganismos, dado que el proceso es aerobio.
- Mantenimiento de la temperatura dentro del túnel. Los microorganismos, al oxidar la materia orgánica, liberan calor. Para que la temperatura se mantenga estable, se inyecta aire frío y seco, que al atravesar la materia orgánica, se calienta y se satura de vapor de agua, retirando de esta manera el calor generado. En el apartado 2.3 de la memoria de cálculo se realiza el balance de materia y energía implicado.

El sistema de ventilación del túnel se compone de los siguientes elementos: el ventilador, el “plenum” o colector de distribución, la red de tuberías bajo el suelo y las boquillas de salida.

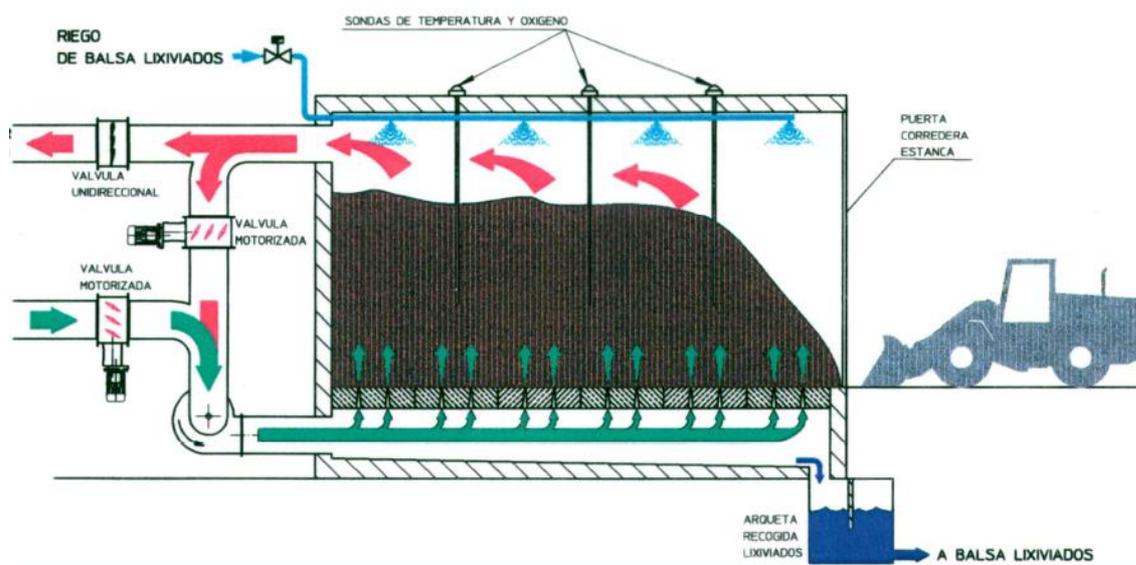


Ilustración 24. Esquema del túnel de fermentación

Fuente (10)

El aire impulsado por el ventilador se distribuye uniformemente en un colector común, desde el que entra en una serie de tuberías colocada de forma longitudinal por debajo del suelo del túnel. Las tuberías están perforadas y provistas de boquillas en cada uno de los orificios generados. El aire sale por las boquillas y se distribuye uniformemente por el residuo colocado encima del suelo. Las tuberías y boquillas son de plástico (PE o PVC) por su facilidad de colocación, mantenimiento y por su resistencia a la corrosión.

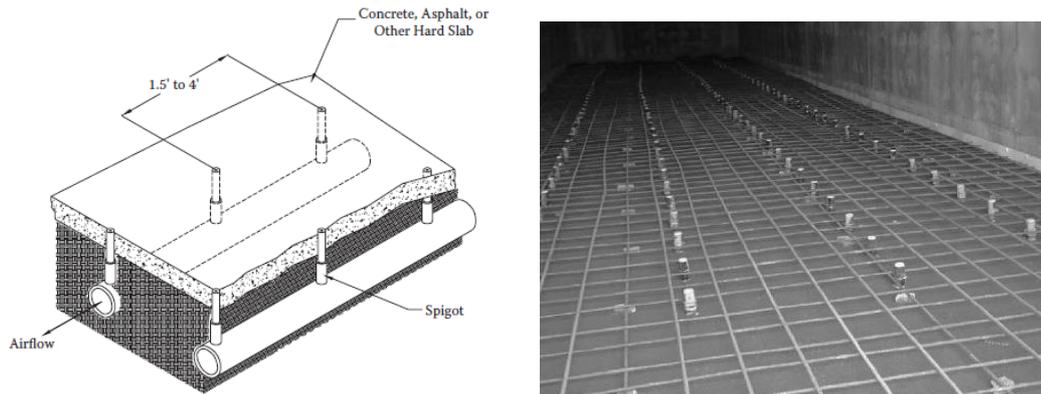


Ilustración 25. Aireación a través de boquillas del túnel de fermentación

Fuente (8)

El sistema de tuberías tiene las siguientes características (ver apartado 2.2.2 de la memoria de cálculo):

6 tuberías separadas entre sí 80 cm

6" de diámetro.

15 metros de longitud.

72 boquillas de 12 mm de diámetro

Velocidad del aire dentro de la tubería 12 m/s

El caudal de aire que debe suministrar el ventilador es diferente según el momento en el que se encuentre la fermentación. La degradación orgánica, obviamente, es mayor al inicio que al final del período de fermentación. Por ello, se ha diseñado el ventilador para suministrar el máximo caudal de aire solicitado (7): 40 m³ aire/t de residuo.

$$\text{Caudal del aire} = 119 \text{ t} * 40 \text{ m}^3/\text{h t} = 4750 \text{ m}^3/\text{h}$$

[8]

La presión que suministra el ventilador debe superar la pérdida de carga que sufre el paso del aire por los accesorios (codos/tes), tuberías de distribución de aire, boquillas y el lecho de residuos. En el interior del túnel se mantendrá una presión ligeramente negativa, pero en el diseño del ventilador se ha considerado, para ser conservadores, que la presión es la atmosférica.

Según los resultados obtenidos en el apartado 2.2 de la memoria de cálculo:

Pérdida de carga en accesorios: 500 Pa
Pérdida de carga en las tuberías: 50 Pa
Pérdida de carga en las boquillas: 400 Pa
Pérdida de carga en el lecho de residuos: 325 Pa

Presión total necesaria del ventilador= 1275 Pa

El ventilador escogido tiene las siguientes especificaciones:

- *Ventilador de carcasa cúbica con palas de reacción.*
- *Modelo: MBRC 35/11 T2 2,2Kw.*
- *Fabricante: Casals.*
- *Caudal en el punto de servicio: 4674 m³/h.*
- *Presión en el punto de servicio: 1470 Pa.*
- *Nº de ventiladores: 14 (uno para cada túnel).*
- *Regulación del caudal de ventilación: variador de frecuencia.*

4.2 Riego periódico y extracción de los lixiviados.

El proceso de fermentación requiere una humedad estable del producto. Los procesos microbianos necesitan un valor comprendido entre 40-60% para su óptimo desarrollo.

- Un valor de humedad inferior al 40% frena la actividad microbiana, reduciendo la velocidad de descomposición y ralentizando el proceso.
- Un valor de humedad >60% reduce la porosidad del material, al estar los poros ocupados por el agua, lo que impide el aporte de oxígeno a los microorganismos, que puede dar lugar a fermentación parcial anaeróbica, produciendo malos olores.

El agua se pierde dentro del túnel porque el calor generado por la actividad microbiana evapora parte del agua. El aire que atraviesa la pila, impulsado por el ventilador, arrastra este vapor de agua a exterior. Otra posible pérdida de agua dentro del túnel es la formación de lixiviados, que se mueven por gravedad depositándose en el suelo del túnel. El lixiviado formado hay que retirarlo, para que no se formen zonas anaerobias.

El sistema de rociado está ubicado en la parte superior del túnel y consta de dos tuberías provistas de boquillas que pulverizan homogéneamente el agua en el túnel para mantener constante la humedad. Una válvula situada en la entrada de cada túnel permite o no el paso del agua, que viene impulsada por una bomba común a todos los túneles.

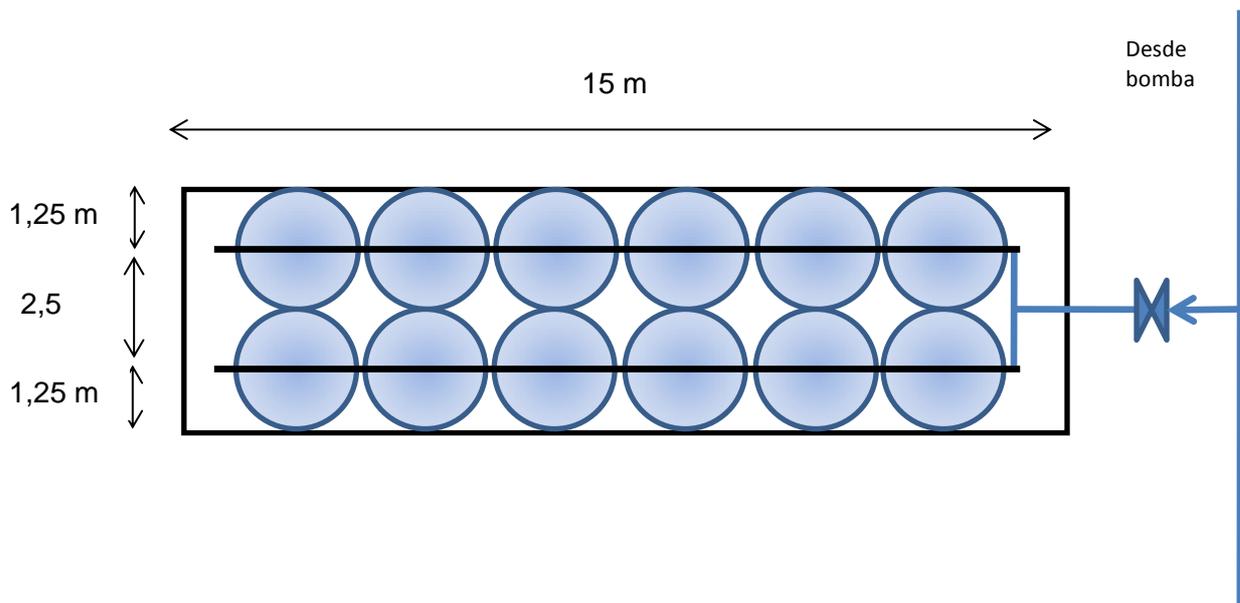


Ilustración 26. Vista en planta del sistema de rociado del túnel

Durante los 14 días que dura la fermentación se pierden (ver apartado 2.3 de la memoria de cálculo) 86 m^3 de agua, lo que significa un caudal medio de $6 \text{ m}^3/\text{día}$. Puesto que los primeros días se pierde más agua, se ha diseñado el sistema de rociado con un caudal máximo de 9 m^3 de agua/ día.

Para la selección de las boquillas se ha tenido en cuenta (Ver apartado 2.3.4 de la memoria de cálculo) que:

- El tiempo de rociado máximo va a ser de 30 minutos al día.
- El área rociada por las boquillas debe cubrir los $5 \times 15 \text{ m}$ del túnel.

Boquilla seleccionada (12 en cada túnel) (20)



- Tipo: Cono lleno de sección cuadrada $1/2 - M - B3 - 36$
- Fabricante: Nozzles division
- Caudal: 26 l/min
- Ángulo de aspersion: 80°
- Presión de trabajo: 3 bar
- Tamaño de gota: $800 \text{ a } 3000 \text{ micras}$.

4.2.1 Recogida de lixiviados

El suelo del túnel se diseña con las pendientes adecuadas para que todo el lixiviado se recoja en un punto en un extremo del túnel. Este sistema de recogida de lixiviado en el suelo del túnel canaliza

los líquidos, por gravedad, hacia una arqueta y de ahí al tanque donde queda almacenado para su posterior tratamiento o reciclado. Generalmente, el lixiviado recogido se vuelve a utilizar para rociar el túnel.

El tanque de lixiviado y el sistema de bombeo quedan fuera del alcance técnico del proyecto, porque, generalmente este lixiviado se suele mezclar con otros de vertidos acuosos, cuyo origen queda fuera del alcance del proyecto.

4.3 Control del proceso e instrumentación básica

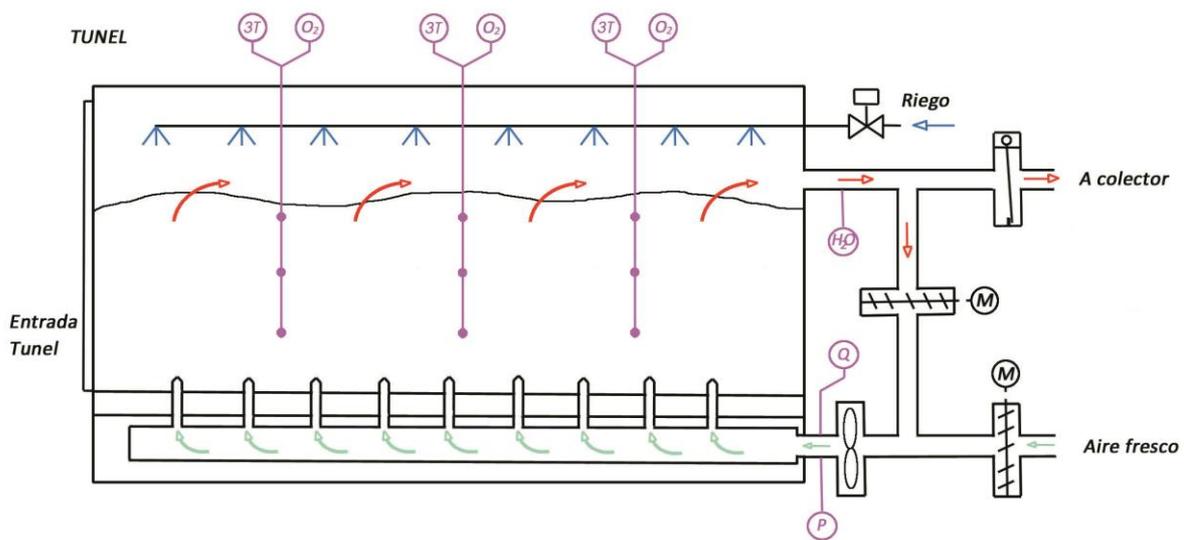


Ilustración 27. Distribución de los sensores en el túnel

Las variables **humedad, temperatura y nivel de oxígeno** son las principales variables que influyen en la actividad microbiana., por lo que requieren una monitorización y control durante el tiempo que dura la fermentación.

Dada la dificultad de medir en continuo la humedad de los residuos, ésta variable no se suele controlar en continuo. Simplemente, basándose en los cálculos matemáticos similares a los realizados en este proyecto y a la experiencia del operador, el túnel se riega en períodos determinados y fijos.

La **temperatura** es la variable más importante en la proliferación de microorganismos. Durante la biodegradación del sustrato se genera energía, como se ha comentado anteriormente, que contribuye a elevar la temperatura de la masa en fermentación, si no se regula el proceso. De todas maneras, si la temperatura se elevara por encima de 75 °-80 C, el crecimiento del número de microorganismos se detiene, por lo que el proceso, en cierta manera, está auto regulado.

El **oxígeno** es un elemento necesario para la biodegradación aeróbica y tiene que estar disponible en al menos el 10 % (v/v) en todos los puntos del túnel.

Para conseguir los valores óptimos de la temperatura y el oxígeno (ya que interaccionan entre sí) se hará una regulación directa sobre la temperatura. El porcentaje de oxígeno también se ve afectado por el control de la temperatura.

La consigna de temperatura varía a lo largo de la fase de fermentación (21) : rampa desde temperatura ambiente hasta 55 grados para la fase de calentamiento, mantenimiento de 65 grados para la fase de higienización y entre 55 y 60 grados para la fase estable.

El lazo de regulación de la temperatura tiene como elementos de lectura 9 sensores de temperatura (sondas) distribuidos homogéneamente por todo el recinto del túnel y a diferentes alturas. El control de la temperatura lo obtenemos modificando:

- el caudal del aire que impulsa el ventilador. Para ello, se actúa sobre el regulador de frecuencia del ventilador.
- y/o con la mezcla de aire limpio y aire recirculado, actuando sobre las válvulas motorizadas (“dampers”) de cada conducto.

En función de la temperatura deseada en cada momento actuaremos de la manera siguiente (21): Si la temperatura es mayor que la consigna deseada, se abrirá el paso de aire frío del exterior y se cerrará el dámper de aire de recirculación. Si la temperatura es menor que la deseada actuamos de forma simétrica y cerramos la entrada de aire exterior y abrimos la recirculación. La recirculación del aire permite también un mayor control sobre el caudal de gases que serán tratados en el biofiltro.

El aporte de aire tiene obviamente una influencia sobre el porcentaje de oxígeno. Si el valor de oxígeno medido por alguno de los sensores (3 en cada túnel) es bajo, se permite una mayor proporción de entrada de aire del exterior.

El control sobre las válvulas y el regulador de frecuencia del ventilador se realiza por medio de autómatas programables (PLC), que reciben las señales de los distintos sensores y que realizan los cálculos necesarios para que las variables alcancen los valores de consigna. Además, el PLC estará conectado a un ordenador, lo que permite a los usuarios ver toda la información en pantalla, así como actuar sobre el proceso.

El bucle del control de la presión en el interior del túnel es independiente del bucle de control de la temperatura y el oxígeno (Ver apartado 7.1 de esta memoria descriptiva). Básicamente, es el ventilador del biofiltro el que se encarga de mantener la presión, aspirando el mismo caudal de

gases que el caudal de aire fresco que se introduzca en el túnel.

4.4 Balance de materia en el túnel

En el proceso de fermentación hay una reducción (8) del 60 % de los sólidos de la materia orgánica (humedad del 50%) y una reducción del 15% de los sólidos del papel y cartón (humedad del 20%).

Según los resultados (ver apartado 0 de la memoria de cálculo), a la salida del túnel tendríamos la siguiente composición:

	Entrada a túnel (t/h)	Salida túnel (t)
Materia orgánica	76.25	53.38
Papel y cartón	6.88	6.06
Plástico	2.24	2.24
Vidrio	12.61	12.61
Metales	0.31	0.31
Maderas	1.16	1.16
Otros	19.10	19.10
Total	118.55	94.85

Tabla 8. Composición a la salida del túnel de fermentación.

5 MADURACIÓN

Cuando la materia fácilmente fermentable se agota, la actividad microbiana disminuye al igual que la temperatura. Pero todavía el compost no está maduro (poca cantidad de humus, alto contenido en N, etc.) por lo que si se añadiera al suelo causaría más daños que beneficios. Por ello, tras la fermentación, el material se traslada mediante palas cargadoras desde los túneles hacia un recinto resguardado de la lluvia. El material es dispuesto en hileras con forma trapezoidal. Esta etapa es la de mayor duración, de 6 a 8 semanas. Durante este periodo, el material se deja reposar para que la cantidad de nutrientes presentes en el compost aumente y pueda ser utilizado como enmienda. Después del proceso de maduración, el residuo está totalmente estabilizado, bien degradado y la materia prima original ya no se identifica.

La maduración se suele realizar en pilas estáticas y, en general, no se suele voltear o, en todo caso, la frecuencia de volteo es mínima.

Después de las 8 semanas, el compost supuestamente maduro se llevará al área de afino, si se va a comercializar, o al vertedero, para utilizarse como capa de cubrición diaria, si no hay mercado para el material bioestabilizado.

Si el material se va a comercializar, mensualmente, se enviará una muestra del mismo a un laboratorio externo para que realice los siguientes análisis:

1. relación C/N.

Hay que recordar que el Real Decreto de fertilizantes exige una relación C/N <20.

2. metales e impurezas

Al menos, el material bioestabilizado debe ser clasificado "C", para poder utilizarse como enmienda orgánica.

3. Fitotóxicos

La presencia de fitotoxinas (compuestos orgánicos tóxicos para algunas plantas) se evalúa utilizando ensayos de crecimiento de semillas y también realizando análisis de laboratorio de las sustancias fitotóxicas: ácidos acético, propiónico, butírico, valérico, etc.



Ilustración 28. Era de maduración.

Fuente (3)

Cantidad de materia a madurar: 94,85 t/día.

Caudal de materia a madurar: 205 m³/día.

Especificaciones de la zona de maduración (Ver apartado 5 de la memoria de cálculo)

- *Dimensiones pila:*
Altura 3,5 m
Ancho 5 m
Longitud 25 m
- *Números de pilas:* 14 pilas x 4
- *Dimensiones de la era:* 45 x 355 m

Esta es la última etapa del proceso de compostaje, y su objetivo es el de refinar el producto desde el punto de vista físico, puesto que las propiedades químicas ya quedaron consolidadas en las etapas anteriores.

Esta etapa es opcional y solo se realiza si hay un mercado para el material obtenido.

Cantidad de materia a afinar: 79,12 t/día.

Caudal de materia a afinar: 175,8 m³/día.

6.1 Trómel

Se realiza un último cribado a través de un trómel, con una luz de malla inferior a 25 mm. En consecuencia, toda partícula mayor de la luz de malla, como puede ser producto apelmazado o alguna impureza de gran tamaño, saldrá por el rebose del trómel y será rechazada. El trómel también contribuye a disgregar el material, lo que hará más eficaz su paso por la mesa densimétrica.



Figura 13: Trómel.

Fuente (16)

- Compost entrante en el trómel 79,19 t/h.
Corriente de finos tras el trómel 55,41 t/h.

El trómel seleccionado con las siguientes especificaciones:

- *Modelo: TR2055 (masías recycling)*
- *Dimensiones: diámetro 2 m
Longitud tamiz 5 m
Longitud total 7,5 m*

- Luz de malla: 20 mm
- Potencia: 5,5 Kw
- Capacidad: 35 m³/h

6.2 Mesa densimétrica

La mesa densimétrica (2) se emplea para la separación de los inertes pesados que acompañan al compost. Este equipo separa los materiales más ligeros de los materiales más pesados: piedras, metales, vidrios.

La separación densimétrica se consigue gracias a que el material entrante al equipo cae sobre una malla vibratoria inclinada, que es atravesada verticalmente por una corriente de aire regulable a través de su fondo perforado. El movimiento vibratorio transporta los materiales pesados, ya que se encuentran en contacto con el fondo rugoso de la malla vibratoria. El material menos denso se encuentra fluidizado en la corriente de aire, y por gravedad cae en sentido contrario al de los elementos pesados. La regulación de la velocidad del aire permite graduar la densidad de los elementos a rechazar.

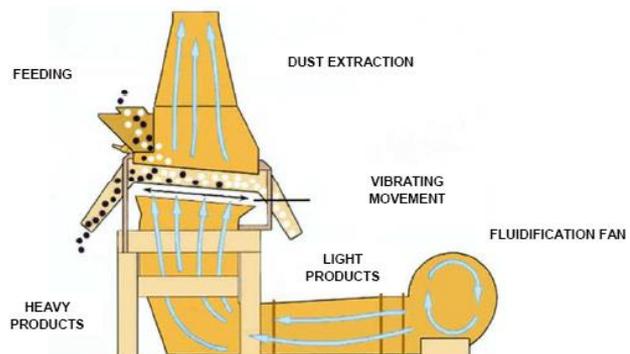


Ilustración 29. Mesa densimétrica.

Fuente ((22)

Media densimétrica seleccionada:

Modelo : GOSAB FM 150

Área: 0,91 m².

Anchura: 0,7 m

Capacidad: 10 t/h

Material: Compost

Tamaño de partícula: 0-30 mm

- Cantidad de compost a la entrada de la mesa densimétrica: 55,41 t/día
- Cantidad de material rechazado: gruesos en el trómel y pesados en la masa densimétrica: 19,9 t/día que se transporta a vertedero.

Cantidad de compost afinado y, por lo tanto, listo para su uso: 35,5 t/día.

Caudal de compost final: 78,8 m³/día.

Residuos	Después mesa densimétrica (t/día)
Materia orgánica	32,62
Papel y cartón	2,12
Plástico	0,01
Vidrio	0,01
Metales	0,01
Maderas	0,00
Otros	0,76
Total	35,5

Tabla 9. Composición de la corriente de salida de la etapa de afino.

Los gases que salen del túnel de fermentación siempre contendrán, en mayor o menor medida compuestos odoríferos. El sistema de control del túnel logra minimizar, pero nunca anular, la producción de olores. Por lo tanto, el tratamiento de los olores emitidos es primordial para la calidad de vida de los habitantes cercanos a la planta.

El sistema típico empleado en las plantas de compostaje o tratamiento mecánico biológico para el tratamiento de los gases, antes de emitirlos a la atmósfera, se describen a continuación y consta básicamente de: ventilador de extracción de los gases del túnel, humidificador y biofiltro.

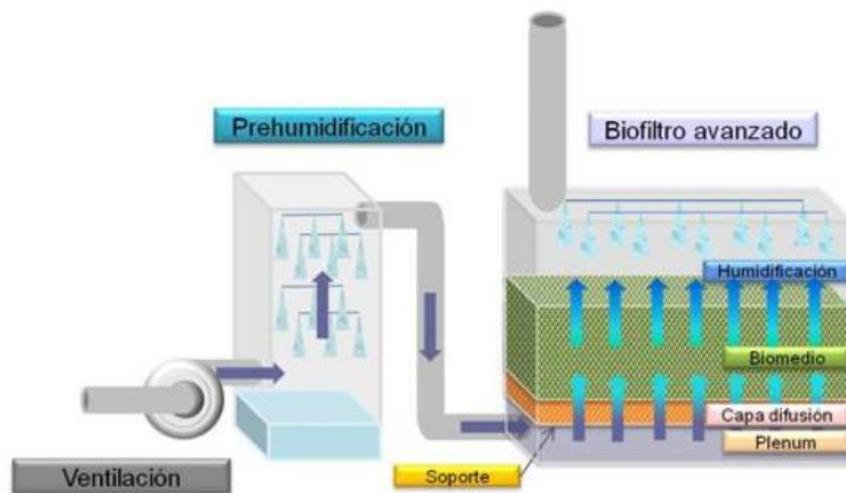


Ilustración 30. Sistema de biofiltración.

7.1 Extracción de los gases en el túnel

En el espacio cerrado del túnel es necesario mantener una presión ligeramente negativa, para evitar la salida de los gases al exterior, por lo que es necesaria una renovación del aire continua. En cada túnel hay una tubería de extracción, en la que se instala una válvula antiretorno y un “dámper” de control del caudal. Las tuberías de los 14 túneles se unen y confluyen en la aspiración del ventilador de extracción.

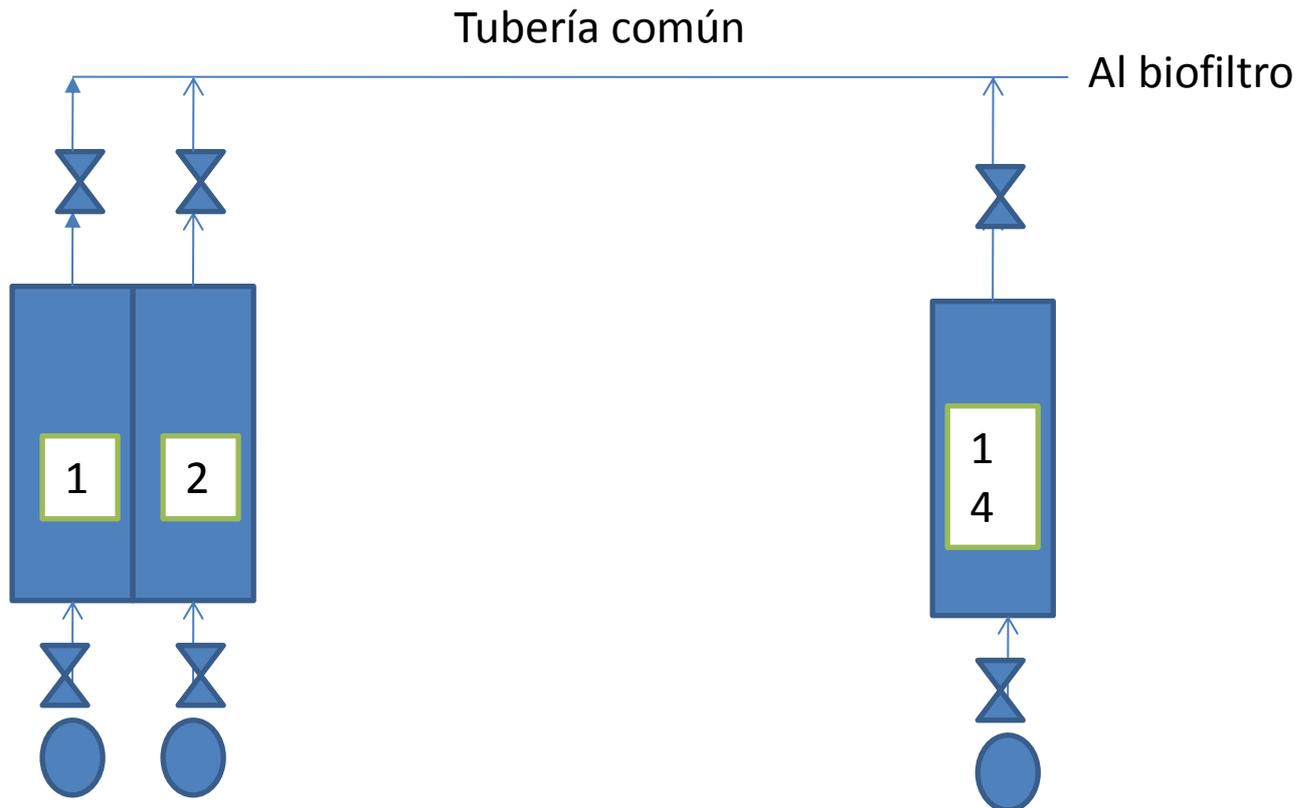


Ilustración 31. Tuberías de extracción de gases de los túneles.

7.2 Ventilador y tuberías

Según los resultados (ver apartado 3.1 de la memoria de cálculo) el ventilador de extracción tiene que extraer un caudal de gases = $48035 \text{ m}^3/\text{h}$ con una presión de 2000 Pa .

La pérdida de carga se reparte:

Pérdida de carga en las tuberías de extracción: 1500 Pa .

Pérdida de carga en el humidificador: 150 Pa .

Pérdida de carga en el biofiltro: 125 Pa .

Presión negativa en el túnel: 100 Pa .

El ventilador escogido tiene las siguientes especificaciones:

- Modelo: MTRL 900.
- Fabricante: Casals.
- Caudal en el punto de servicio: $48780 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Presión en el punto de servicio: 2060 Pa .
- Nº de ventiladores: 1.

7.3 Humidificador

El ventilador impulsa los gases extraídos del túnel hacia el humidificador, que tiene las siguientes funciones:

- Enfriar los gases y humedecerlos, antes de que entren al biofiltro. Como se verá posteriormente, en el biofiltro es muy importante mantener un nivel de humedad adecuado.

Si los gases entraran secos al biofiltro, al recorrer el mismo se irían saturando de humedad y secando el biofiltro.

- Eliminar parte de las partículas que arrastren los gases. Si no se eliminaran las partículas, cuando los gases atravesaran el biofiltro, las partículas quedarían retenidos y colmatarían los huecos.
- Absorber parte de los gases, especialmente el amoníaco. El amoníaco es tóxico, en concentraciones elevadas, para los microorganismos del biofiltro, por lo que es conveniente reducir la concentración en los gases antes de la entrada en el biofiltro.

El humidificador se diseña para cumplir la primera funcionalidad.

El humidificador es una torre cilíndrica, de plástico, en la que los gases entran por la parte inferior y circulan en sentido ascendente. En la parte superior del humidificador se instalan una serie de boquillas que pulverizan agua en contracorriente con los gases. El agua se almacena en el fondo del humidificador. Una bomba recoge el agua del fondo y la vuelve a impulsar a las boquillas. Como parte del agua pulverizada se vaporiza, hay que mantener una alimentación continua de agua fresca.

En la parte inferior del humidificador se colocará un medidor de pH. Cuando el valor del pH medido sea superior a 8,5, se vaciará el fondo del humidificador y se rellenará con agua de aportación.

Según los resultados del apartado 3.2 de la memoria de cálculo:

Caudal de agua a reponer = 150,4 Kg/h

Dimensiones del humidificador:

- *Área 6,8 m²*
- *Altura efectiva: 2,7 m*
- *Altura Total: 6 m*

7.4 Biofiltro

El biofiltro es el equipo esencial en el control de olores. El proceso de depuración biológica consiste en poner en contacto los gases contaminados con un lecho fijo de biomasa, en el que viven los microorganismos, que se encargarán de absorber y degradar los compuestos olorosos.

- El equipo es un recinto rectangular construido de hormigón.
- El paso del gas a filtrar se realiza de forma ascendente, entrando por la parte inferior y siendo emitidos a la atmósfera por la parte superior.
- La entrada del aire se realiza a través de un falso suelo o distribuidor, en cuya parte superior se coloca una rejilla para la distribución homogénea del gas. En este falso suelo también se coloca una arqueta para la recogida de los posibles lixiviados y desde la arqueta se lleva al tanque de lixiviados.

- Sobre la rejilla se coloca una capa de grava (aproximadamente unos 30 cm de altura), que tiene como función el reparto del gas, evitando los pasos preferenciales.
- La última capa, de aproximadamente un metro de altura, está formada por los componentes activos del biofiltro, que es una mezcla de 20% de compost y el 80% de “cortezas” de madera. La porosidad del material crea las condiciones adecuadas para proliferación de las cepas de organismos específicos que son capaces de alimentarse de las sustancias aportadas por la corriente de gases.

El biofiltro se designa con una capacidad de tratamiento (12) de 100 m³/h de gas por cada m² de biofiltro.



Ilustración 32. Biofiltro.

Fuente (12)

Características del biofiltro:

- *Área: 625 m²*
- *Altura del material filtrante: 1m*
- *Humedad: 50 %*
- *Porosidad > 40 %*
- *200000 kg de “cortezas” y 50000 Kg de compost*
- *Renovación: cada 2-3 años*
- *Pérdida de carga < 200 Pa*

8.1 Balance de materia de la planta

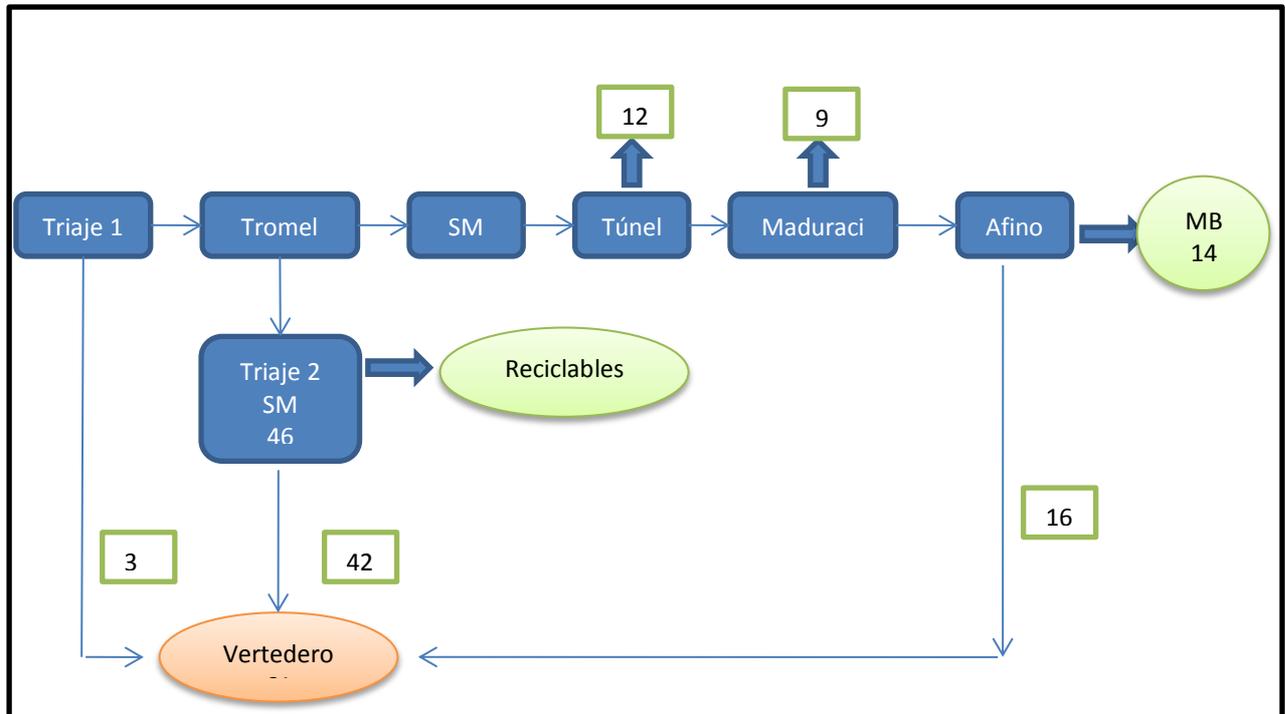


Ilustración 33. Balance de masas de la planta

En la Ilustración anterior se muestra, a modo de resumen, el balance de masas de la planta:

Productos obtenidos:

- Material bioestabilizado: 14 %
- Materiales reciclables (papel, metales, plásticos, etc.): 4 %

Salidas

- Gases : CO₂ + Vapor de agua : 21 %

Envío a vertedero: 61 %

El rendimiento de la planta, con respecto a la materia orgánica sería:

$(\text{Materia degradada} + \text{Material estabilizado}) / \text{MO entrada} = (21+14)/45 = 78 \%$

8.2 Usos del material bioestabilizado

Según la ley 22/2011, el material estabilizado no se considera un producto, sino que sigue siendo un residuo. Sus usos quedan limitados a la enmienda orgánica de terrenos degradados, cobertura diaria de vertedero, etc.

En definitiva, la ley 22/2011

- Anima a implantar la recogida selectiva de biorresiduo por limitación de las posibles salidas al producto del compostaje (material bioestabilizado) y el digesto producido a partir de residuos mezclados
- Se asume que el material bioestabilizado tiene peor calidad que un compost procedente de una recogida selectiva de biorresiduo. El material bioestabilizado sigue siendo un residuo. El compost obtenido a partir de biorresiduos es un producto.

Para la aplicación del material bioestabilizado en **agricultura** se precisa condiciones muy estrictas:

- Vender el material a un gestor autorizado para operaciones de valorización R 10 (Tratamiento de los suelos que produzca un beneficio a la agricultura o una mejora ecológica de los mismos). Es decir, el agricultor tiene que ser gestor.
- Localizar un parcela agrícola en la que poder aplicar el bioestabilizado
- Elaborar un Plan de Gestión para aplicar el material estabilizado en la parcela seleccionada
 - Conseguir la aprobación del Plan de Gestión por la administración competente de Agricultura de la CCAA donde esté situada la parcela.
- Aplicar las dosis previstas (muy bajas en relación con el compost) y los límites de calidad previstos (también menores).

Parte 3. Estudio económico

1 INVERSIÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA

En este apartado se muestra una estimación de la inversión total que es necesaria para la construcción y puesta en marcha de la planta. En los costes totales se incluyen:

- a) Obra Civil, que consta de accesos, naves, etc.
- b) Compra, instalación y puesta en marcha de los equipos de la planta, incluyendo el trómel, los túneles, el biofiltro, etc.

A estos costes directos también se le suma:

- c) Beneficio industrial.
- d) Gastos del proyecto, como licencias, tasas, ingeniería, seguros, etc.
- e) IVA.

Para el cálculo del coste total se ha utilizado datos bibliográficos de otras plantas similares que ya se encuentran en funcionamiento. Los datos se han obtenido de revistas, como Infoenviro y Retema, y de distintos anteproyectos y se han actualizado a fecha 2014.

Localización	Año	Fuente info.	T/año	Coste
Vacarisses	2010	Infoenviro (Nov 2010)	265.000	75
Monte Arraiz (Bilbao)	2013	Retema (marzo-Abril 2013)	180.000	43
Los Hornillos (Valencia)	2012	UPV (23)	400.000	104
Manises (Valencia)	2012	UPV (23)	300.000	66
Toledo	2012	Retema (Marzo-Abril 2012)	250.000	45
Osona	2007	Anteproyecto (24)	55.000	22
Guipuzcoa	2015	(25)	160.000	50
Vergara	2015	Diario Vasco 15-03-2014	19.000	8
Valles	2007	Anteproyecto (26)	245.000	68

Tabla 10. Inversión necesaria construcción planta

Elaboración propia.

A continuación se representan los datos recogidos en la tabla anterior, para poder realizar una estimación de los costes totales a partir de su recta de regresión.

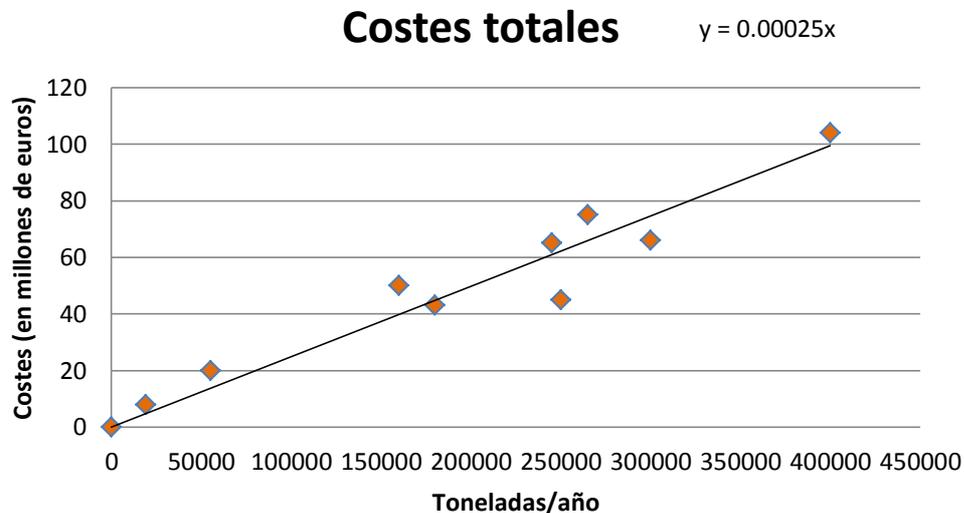


Ilustración 34. Inversión necesaria para la construcción de la planta.

Elaboración propia.

Una vez realizada la línea regresión, se ha obtenido la siguiente ecuación, con la cual se puede calcular los costes con ayuda del dato de entrada de residuos en la planta que se está diseñando.

$$Y = 0,00025 X$$

Siendo Y: Coste total de inversión expresado en millones de euros.

X: Entrada de residuos en la planta en toneladas/año.

A la planta entran 85000 toneladas/año, ya que a ésta llegan los residuos de 160.000 habitantes y cada habitante produce al día una media de 1,45 Kg de residuos domésticos.

$$160000 \text{ hab} * 1,45 \text{ Kg/hab día} * 365 \text{ día/año} = 85.000 \text{ Toneladas/años.}$$

Cuando se sustituye este dato en la ecuación anterior se obtiene:

$$\text{Costes Totales} = 21 \text{ millones de €.}$$

Los costes que constituyen el total se desarrolla de la siguiente forma (24) :

A: Obra civil.

B: Compra, instalación y puesta en marcha de los equipos.

C: Beneficio industrial (6% de A+B).

D: Gastos del proyecto (15% de A+B)

E: IVA (18% de A+B+C+D)

Como se necesita conocer A y B, para obtener después los gastos de amortización, se hace la operación inversa:

$$\text{Costes totales} = ((A+B) * (1 + 0,06 + 0,15)) * 1.18$$

$$A+B = 14,7 \text{ millones de } \text{€}$$

En la suma A+B, A es del orden del 45 % y B del 55 %.

Para concluir, se resume todos los costes en la siguiente tabla:

Costes	Millones de €
A: Obra civil	6,62
B: Equipos	8,09
C: Beneficio industrial	0,88
D: Gastos del proyecto	2,2
E: IVA	3,20
Costes Totales: A+B+C+D+E	21

Tabla 11. Desglose de Costes de inversión.

2 COSTES DE OPERACIÓN.

Los costes de operación lo forman las amortizaciones, el coste de los trabajadores, el coste de la electricidad y el combustible, las operaciones de mantenimiento, reparaciones y repuesto, el coste de llevar el rechazo al vertedero, los gastos generales y el beneficio industrial. A estos costes hay que restarle los beneficios de la venta de los subproductos.

Se considera que la planta se ha construido utilizando fondos propios, por lo que los gastos de financiación son nulos.

2.1 Amortización

Amortizar significa considerar que cierto elemento ha perdido parte de su valor, por el simple hecho del paso del tiempo. Para reflejar contablemente este hecho, se debe anotar como una pérdida del ejercicio, es decir como un gasto, en cada uno de los años en los que se está amortizando.

La amortización (27) de la obra civil se realiza en 20 años, es decir que se desprecia en cada año: $A/20 \text{ años} = 331.000 \text{ €/año}$. En cambio, la amortización de los equipos se realiza en 10 años, despreciándose en cada año: $B/10 \text{ años} = 809.000 \text{ €/año}$.

2.2 Personal

Basándonos en los datos de plantas de tamaño similar (27) y (25), se considera tener contratados los siguientes trabajadores.

Se ha de tener en cuenta que en la planta trabaja en dos turnos, por lo que los puestos de trabajo que requieran turnos, se ha de duplicar el número de trabajadores.

Puesto de trabajo	Con turno	En los dos turnos	Sin turno
Jefe planta			1
Administrativo			2
Encargado de turno	1	2	
Operador control	1	2	
Mecánicos/electricistas	1	2	
Peones limpiezas/varios	1	2	
Gruista	1	2	
Basculista	1	2	
Compostaje/palista	2	4	
Recepción/triaje voluminosos	2	4	
Conductor (rechazos)	1	2	
Vigilante nocturno			1
Triadores	5	10	
Baja/vacaciones	1	2	
Suma	17	34	4
Total	38		

Tabla 12. Trabajadores contratados.

Puesto que la planta trabaja con residuos mezclados, no es común utilizar equipos de separación óptica, debido a que estos equipos necesitan una corriente limpia y seca para funcionar en condiciones. Por lo tanto, la recuperación de los materiales reciclables (plásticos y papel-cartón) se realiza utilizando el triaje manual: 5 operarios por turno; 1 para cada tipo de plástico (PET, Brick, PEAD y otros plásticos), y otro para papel-cartón.

Los salarios de los trabajadores se muestran en la siguiente tabla, y se han obtenido de Ecoembes (27) en el año 2012. Se ha considerado que, en los últimos años, los salarios no han subido.

Categoría profesional	Coste empresa operario (€/año)
Jefe planta	38.000
Administrativo	24.000
Jefe turno	28.500
Encargado turno	28.000
Mecánico	28.000
Peón especializado	23.000
Peón	22.000

Tabla 13. Tabla salarial

Ecoembes (Ref año:2012)

Se tiene en cuenta dentro de la categoría de peón: los triadores, los peones de limpieza y la recepción/triaje de voluminosos.

En la categoría de peón especializado se encuentran: los gruistas, los operadores de control, los basculistas, los conductores y el vigilante nocturno.

Para la categoría Baja/vacaciones se ha tomado un valor medio entre peón y mecánico.

A continuación se muestra todos los costes del personal resumidos en la siguiente tabla.

Categoría profesional	Nº total trabajadores	Coste empresa operario (€/año)	Coste total (€/año)
Jefe planta	1	38.000	38.000
Administrativo	2	24.000	48.000
Encargado turno	2	28.500	57.000
Mecánico	2	28.000	56.000
Peón especializado	13	23.000	299.000
Peón	16	22.000	352.000
Baja/Vacante	2	25.000	50.000
Total			900.000

Tabla 14. Costes del personal

2.3 Electricidad y combustibles

Este apartado recoge el coste que supone el consumo de la electricidad y el consumo de combustible. El precio de la electricidad se ha supuesto 0,12 €/Kwh y el del combustible es de 1€/litro.

a) Consumo de electricidad (28):

- En la clasificación mecánica (foso, trómel, imanes, etc.) se consume 17 KWh por cada tonelada que entra a la planta.

La planta está diseñada para 160.000 habitantes, estos producen al día una media de 1,45 Kg de residuos domésticos por habitante, así que entran 85.000 t/año.

$$17 \text{ KWh/t} * 85.000 \text{ t/año} * 0,12 \text{ €/KWh} = 173.400 \text{ €/año.}$$

- En la fase de fermentación y biofiltro se consume 33 KWh por cada tonelada que entra en esta fase.

A fermentación entra 119 toneladas al día, es decir unas 42.000 t/año.

Siguiendo el procedimiento anterior se consume.

$$33 \text{ KWh/t} * 42.000 \text{ t/año} * 0,12 \text{ €/KWh} = 166.300 \text{ €/año.}$$

- Por último en el proceso de afino se consume 10 KWh por cada tonelada que pasa a este proceso.

Entran 79 toneladas al día a esta fase, 29.000 t/año.

$$10 \text{ KWh/t} * 29.000 \text{ t/año} * 0,12 \text{ €/KWh} = 34.800 \text{ €/año.}$$

Sumando todos los costes por el consumo de la electricidad resulta: 374.500 €/año.

b) Consumo de combustible (28):

Se consumen 2,5 litros de gasoil por cada tonelada que entra en la planta, como entran 85.000 toneladas al año, el coste por el consumo de combustible es:

$$2,5 \text{ l/t} * 85.000 \text{ t/año} * 1 \text{ €/l} = 212.500 \text{ €/año.}$$

2.4 Mantenimiento, reparaciones y repuestos

Según los datos de Ecoembes estos costes suponen:

$$1,66\% \text{ sobre la inversión de la obra civil (A): } 0,0166 * 6.620.000 = 110.000 \text{ €/año.}$$

$$3,3\% \text{ sobre la inversión de los equipos (B): } 0,033 * 8.090.000 = 270.000 \text{ €/año.}$$

2.5 Rechazo a vertedero

Aquí se tiene en cuenta el coste del traslado y entrada del rechazo al vertedero. Los elementos que no forman parte del rechazo son:

- El compost (material bioestabilizado) producido: 35,5 toneladas al día, es decir 13.000 t/año.
- Lo que se puede recuperar de otros materiales reciclables, esto supone un 4% de los residuos que entra en la planta.
 $0,04 * 85.000 \text{ t/año} = 3.400 \text{ t/año}.$
- La materia orgánica que se convierte en CO₂ y H₂O en el proceso de compostaje, siendo esta un 20 % de los residuos que entra en la planta.
 $0,20 * 85.000 \text{ t/año} = 17.000 \text{ t/año}.$

Si se suman lo anterior se obtiene una cantidad 33.400 t/año de elementos que no van al vertedero.

Por lo tanto, se envían a vertedero:

$85.000 \text{ t/año que entra} - 33.400 \text{ t/año que no se traslada} = 51.600 \text{ t/año se envía al vertedero}.$

El precio del transporte y admisión de los residuos en un vertedero es muy variable entre las distintas regiones de España. Se ha cogido un valor medio de 33 € (27) por cada tonelada que se envía al vertedero.

$33 \text{ €/t} * 51.600 \text{ t/año} = 1.703.000 \text{ €/año}.$

2.6 Gastos generales y beneficio industrial.

Supone el 10% de la suma de todos los gastos anteriores.

$0,1 * (1.140.000 + 900.000 + 587.000 + 380.000 + 1.703.000) = 471.000 \text{ €/año}.$

2.7 Beneficio por la venta de subproductos

En la planta se pueden vender los siguientes subproductos:

- Material bioestabilizado: Se ha estimado un precio medio de 3€ por cada tonelada de material, ya que hay plantas que lo venden a 12 €/t y otras que lo regalan o envían a vertedero para utilizarlo como capa de cobertura.
 $13.000 \text{ t/año} * 3\text{€/t} = 39.000 \text{ €/año}.$
- Material recuperado: El valor medio que paga Ecoembes (27) es de 150€ por tonelada de material recuperado. Se recupera un 4% (29) y (15) de las toneladas que entran.
 $85.000 \text{ t/año} * 0,04 * 150 \text{ €/t} = 510.000 \text{ €/año}.$

2.8 Resumen

Para concluir, se agrupan todos los costes de operación en la siguiente tabla.

Coste de operación	€/año
Amortizaciones	1.140.00
Personal	900.000
Electricidad y combustibles	587.000
Mantenimiento, reparaciones y repuestos	380.000
Rechazo al vertedero	1.703.000
Gastos generales y beneficio industrial	471.000
Beneficio por la venta de subproducto	-549.000
Coste total de operación	4.632.000

Tabla 15. Costes de operación.

El coste de tratar una tonelada resulta:

$$4.632.000 \text{ €/año} / 85.000 \text{ t/año} = 54 \text{ € por cada tonelada.}$$

Si sólo se tienen en cuenta los costes propios de la planta, el coste por tonelada tratada resultaría 34 €/t.

Por último, se muestran todos los costes de operación en forma de grafico porcentual para ver cuál de ellos tiene un peso mayor.

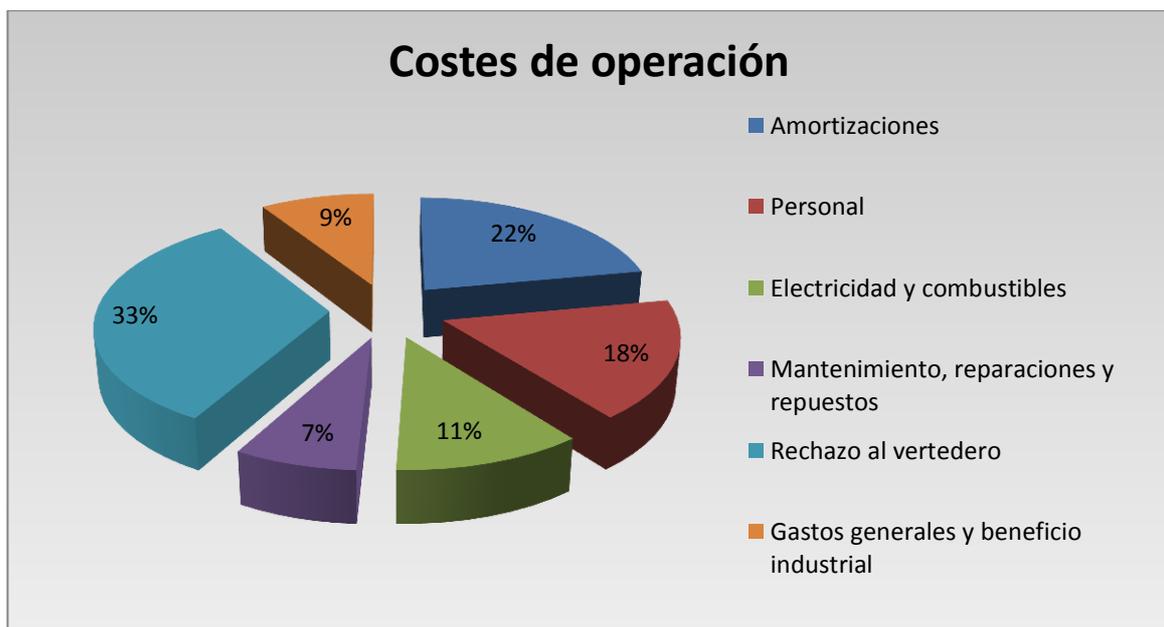


Ilustración 35. Reparto de los costes de operación.

Como puede observarse, más de un tercio del coste de operación se utiliza en pagar la admisión de los rechazos de la planta al vertedero.

PARTE 4. MEMORIA DE CÁLCULOS

1 ZONA DE RECEPCIÓN Y CONTROL DE LOS RSU

Siendo conservadores, se toma una capacidad de diseño de los equipos de 30 t/h.

Composición de los Residuos (% p/p)		t/h
Materia orgánica	44,06	13,22
Papel y cartón	21,18	6,35
Plástico	10,59	3,18
Vidrio	6,93	2,08
Metales	4,11	1,23
Maderas	0,96	0,29
Otros	12,17	3,65

Tabla 16. Caudales máxicos.

1.1 Puente Grúa/pulpos

El puente grúa y el pulpo (14) se encargan de recoger los residuos en el foso y descargarlos en la cinta de carga de alimentación a la planta. Los movimientos que hay que realizar son:

- . Bajar el pulpo (velocidad: 50 m/min) y recoger residuo (15 s), subir el pulpo (30 m/min), mover la grúa hasta la cinta de carga de la planta (50 m/min), descargar (5 s), volver a llevar el pulpo a otra posición de recogida (50 m/min) y vuelta a empezar.

Suponiendo, siendo conservadores, que la altura de la grúa al nivel medio del foso sea 20 m y que la distancia desde la cinta de carga al punto medio del foso es de 25 m, el tiempo total, sería:

$$20 \text{ m}/50\text{m}/\text{min} \cdot 60\text{s}/\text{min} +$$

$$15\text{s} +$$

$$20\text{m}/30\text{m}/\text{min} \cdot 60\text{s}/\text{min} +$$

$$2 \cdot 25\text{m}/50\text{m}/\text{min} \cdot 60\text{s}/\text{min} +$$

$$5\text{s} = 144 \text{ segundos} \approx 2,5 \text{ minutos}$$

[9]

En cada hora, se suele dejar 10 minutos del tiempo de actividad del pulpo para retirar voluminosos y uniformizar los residuos en el foso.

Por lo tanto:

$$50 \text{ minutos}/\text{hora} / 2,5 \text{ minutos}/\text{descarga} = 20 \text{ descargas}$$

[10]

Para poder cumplir con el ritmo de trabajo de 30 t/h, es necesario que cada descarga del pulpo sea de 30 t/h /20 descargas/h = 1,7 t/descarga.

La densidad media de los residuos en el pulpo es del orden de 600 kg/m³, por lo que el pulpo debe tener un volumen de: 1,7 t/0,6 t/m³ = 2,9 m³ \cong 3 m³.

Del catálogo, se elige el puente grúa GHF de 4 t de carga con un pulpo de 3 m³.

1.2 Triaje primario manual

Los operarios se encargan de separar los voluminosos con un rendimiento (15) de separación del 3% de lo que entra en planta (15% es de separación del papel y cartón, 15% del plástico, 5% del vidrio, un 15% de metales, 10 % de maderas y un 40% de otros como cuero y textiles).

	Antes del triaje (t/h)	Rechazo en el triaje (t/h)	Después del triaje (t/h)
Materia orgánica	13,22	0	13,22
Papel y cartón	6,35	0,135	6,22
Plástico	3,18	0,135	3,04
Vidrio	2,08	0,045	2,03
Metales	1,23	0,135	1,10
Maderas	0,29	0,09	0,20
Otros	3,65	0,36	3,29
Total	30,00	0,9	29,10

Tabla 17. Distribución de los residuos tras el triaje de voluminosos.

1.3 Trómel

El trómel es el encargado de separar el material no orgánico de la fracción reciclable. Al trómel llegan 29,10 t/h, es decir unos 145,5 m³/h. Se ha supuesto que la densidad de los residuos, después de pasar por la cinta de triaje, es de 200 Kg/m³.

El rendimiento de separación estimado (hundido, finos) para cada fracción (30) es el siguiente:

- 75% para materia orgánica.
- 15% para papel y cartón.
- 10% para plástico.
- 80% para vidrio.
- 20% para metales.
- 75% para madera.
- 75% para otros.

	Antes del trómel (t/h)	Finos (t/h)	Rechazo(t/h)
Materia orgánica	13,22	9,91	3,30
Papel y cartón	6,22	0,93	5,29
Plástico	3,04	0,30	2,74
Vidrio	2,03	1,63	0,41
Metales	1,10	0,22	0,88
Maderas	0,20	0,15	0,05
Otros	3,29	2,47	0,82
Total	29,10	15,61	13,49

Tabla 18. Distribución de los residuos en el trómel.

Por lo tanto, del trómel se obtiene una corriente de 15,61 t/h que se dirigen a fermentación y 13,49 t/h que se llevarán a una sección de triaje manual, cuyo diseño no entra dentro del alcance de este proyecto.

1.4 Separación magnética en los finos del trómel

Los finos separados en el trómel anterior son transportados hacia un separador magnético con el fin de retirar los elementos férricos de la corriente que se va a compostar.

Se estima un rendimiento de separación del :

- 0,5% para materia orgánica.
- 5% para papel y cartón.
- 5% para plástico.
- 0% para vidrio, madera y otros.
- 80% para metales.

Hay que tener en cuenta que los residuos metálicos, al ser atraídos por el imán, pueden arrastrar una pequeña cantidad de otros residuos.

	Antes del separador magnético (t/h)	Rechazo (t/h)	Después del separador magnético (t/h)
Materia orgánica	9,91	0,05	9,86
Papel y cartón	0,93	0,04	0,89
Plástico	0,30	0,01	0,29
Vidrio	1,63	0	1,63
Metales	0,22	0,18	0,04
Maderas	0,15	0	0,15
Otros	2,47	0	2,47
Total	15,61	0,28	15,33

Tabla 19. Distribución de los residuos tras el separador magnético.

2 PROCESO DE FERMENTACIÓN

2.1 Túneles de fermentación

Esta sección de la planta trabaja 7 días a la semana. La capacidad de cada túnel será la de un (1) día de residuos. Los residuos permanecerán dentro del túnel 14 días, por lo que son necesarios 14 túneles de fermentación.

2.2 Sistema de ventilación de los túneles

Un ventilador por cada túnel impulsa el aire por el falso suelo del túnel. Para especificar el ventilador hay que indicar el caudal de aire que debe suministrar y la presión a la que lo suministra.

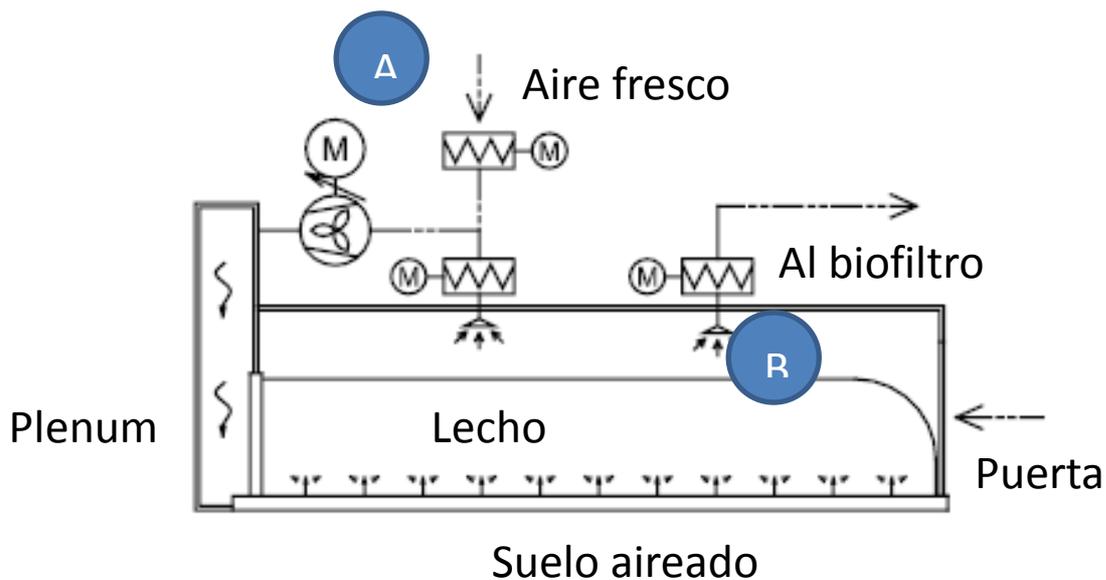


Ilustración 36. Puntos inicial y final para la ecuación de Bernouilli.

El caudal necesario para que se den las condiciones óptimas de fermentación es **40 m³/h por cada tonelada** de material a tratar.

Masa compostaje = 119 t

Caudal aire = 119 t · 40 m³/h = 4750 m³/h

Para el cálculo de la presión del ventilador se usa la ecuación de conservación de energía:

$$P_A + \frac{\rho V_A^2}{2} + \rho g Z_A + P_{\text{ventilador}} = P_B + \frac{\rho V_B^2}{2} + \rho g Z_B + h_{fA-B} \quad [11]$$

La velocidad del aire a la entrada (punto A) y a la salida (B) se puede considerar 0. Se desprecia la diferencia de cotas. La presión a la entrada es la atmosférica, mientras que en el punto B es ligeramente menor que la atmosférica (-2 cm ca) , para mantener el túnel en depresión y que no salgan gases. Para ser conservadores, se ha considerado una P_B atmosférica.

$$P_{\text{ventilador}} = h_{fA-B} \quad [12]$$

Las pérdidas de carga, h_{fA-B} , tiene en cuenta las pérdidas en el lecho, en las tuberías y accesorios y en la válvula de control.

2.2.1 Pérdidas de carga en el lecho

Para el cálculo de las pérdidas en el lecho se han utilizado la siguiente correlación experimental (7)

$$D_p = 98 * K * H^a * V^b \quad [13]$$

D_p : Pérdidas en el lecho (Pa)

K: Coeficiente = 0,78.

H: Altura de la pila (m).

V: Velocidad del aire (m/min): $4750 \text{ m}^3/\text{h} * 1\text{h}/60 \text{ min} / (5 \text{ m} * 15 \text{ m}) = 1,05 \text{ m}/\text{min}$

a: Coeficiente que tiene en cuenta la compactación de la pila: 1,1.

b: Coeficiente experimental : aproximadamente 1,25, indicando que el flujo es intermedio entre laminar y turbulento.

$$D_p = 98 * 0,78 * 3,5^{1,1} * 1,05^{1,25} = 325 \text{ Pa}$$

2.2.2 Pérdidas de carga en las tuberías del suelo aireado

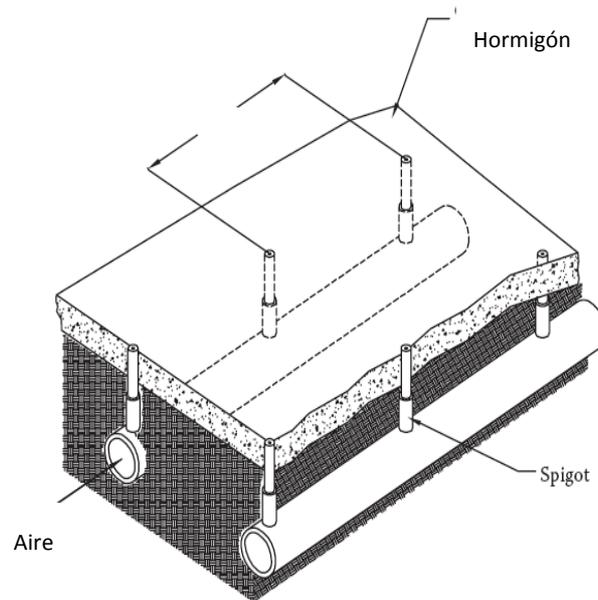


Ilustración 37. Sistema de aireación de los túneles.

Fuente (8)

Debajo de cada túnel se instalarán (31) 6 tuberías de 15 metros de longitud. Por lo tanto, por cada tubería circula un caudal de aire de 800 m³/h. Se ha elegido un diámetro típico para la tubería de 6" (15 cm), por lo que la velocidad a la entrada de la tubería es de 12 m/s.

En cada tubería se instalará una serie de boquillas ("spigot"). Cada boquilla (8) tendrá un orificio de salida con un diámetro normal de ½ pulgada (12 mm). Para conseguir un flujo uniforme entre las boquillas, la experiencia (31) indica que el número de boquillas debe ser tal que el área de todos los orificios sea la mitad del área de la tubería. Con esta disposición, se asegura que la diferencia de caudal que sale por la primera boquilla y el que sale por la última boquilla no supera el 10 % del valor medio.

$$N * 0.012^2 = 0,5 * 0.15^2 \quad [14]$$

N = 72 boquillas en cada tubería.

La velocidad de salida en cada boquilla (24 m/s) vendrá definida por la ecuación

$$V = C_d \sqrt{2 * \frac{Dp}{\rho_{aire}}} \quad [15]$$

Supuesto $C_d = 0,9$ (orificio redondo) y la densidad del aire 1,1 kg/m³, despejando Dp de la ecuación anterior se obtiene un valor de

$$Dp_{boquilla} = 400 \text{ Pa}$$

Por su parte, la pérdida de carga en la tubería, supuesto que los tubos son lisos de plástico, de 15 m de longitud y 25 cm de diámetro y un caudal de 800 m³/h:

$$Dp \text{ tubería} = 133 \text{ Pa} * Fc = 133 * 0,35 \cong 50 \text{ Pa}$$

Fc = factor que tiene en cuenta que el caudal en la tubería va disminuyendo por la salida de aire en cada boquilla. Para un número de 72 boquillas: Fc = 0,35 (31).

2.2.3 Pérdida de carga en la sección de entrada

En la sección de entrada: desde la admisión de aire en el ventilador hasta que el aire entra en las tuberías del suelo, hay 2 codos, una T y una válvula dámper. Se desprecia la pérdida de carga en el "plenum".

$$K \text{ de "codo"} = 0,3$$

$$K \text{ de "T"} = 0,9$$

$$Dp \text{ dámper} = 180 \text{ Pa (32)}$$

$$Dp \text{ entrada} = \frac{1}{2} * K * \rho * v^2 = \frac{1}{2} * (1,5) * 1,076 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * \left(20 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 + 180 \text{ (Damper)} = 500 \text{ Pa [16]}$$

2.2.4 Resumen

Sumando todas las pérdidas de carga resulta:

$$h_f = 325 + 400 + 50 + 500 = 1275 \text{ Pa} \quad (17)$$

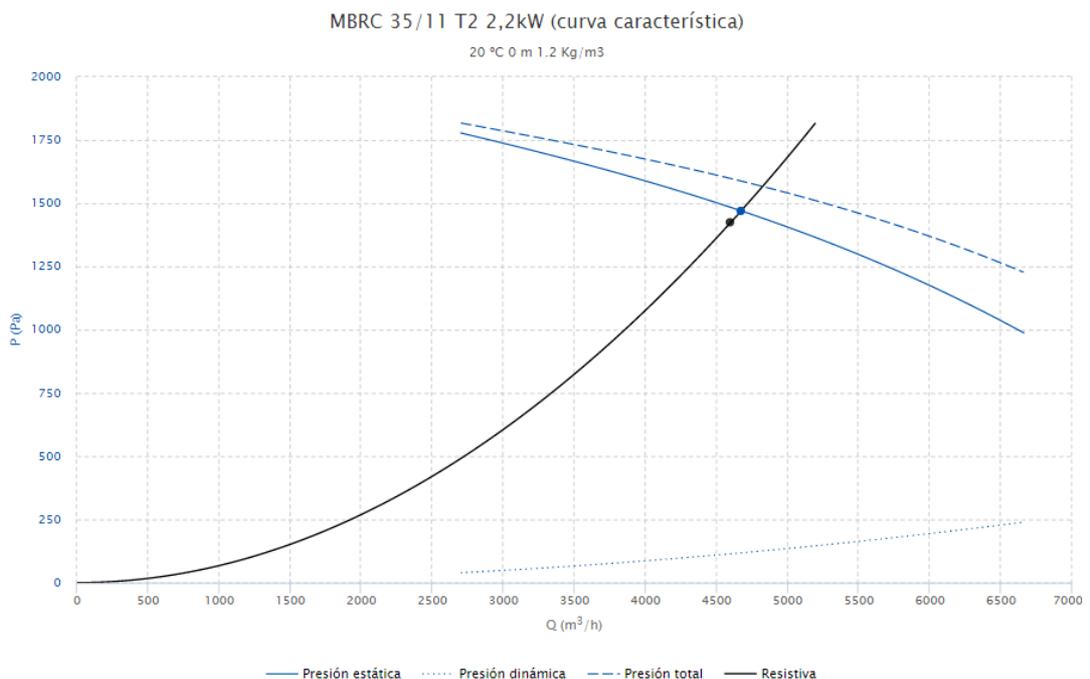


Ilustración 38. Curva característica del ventilador.

Elaboración propia. Fuente (33).

2.3 Sistema de rociado

2.3.1 Balance de agua

En primer lugar se calcula el caudal de agua requerida por la pila de compostaje para mantener constante la humedad en el túnel al 50%. Para ello se tiene en cuenta los siguientes requisitos:

En la reacción de fermentación se genera energía y parte del agua se evapora, por lo que hay que reponerla. Por otro lado, en la reacción de compostaje también se genera agua.

Datos e hipótesis

- La reacción de descomposición de la materia orgánica es:



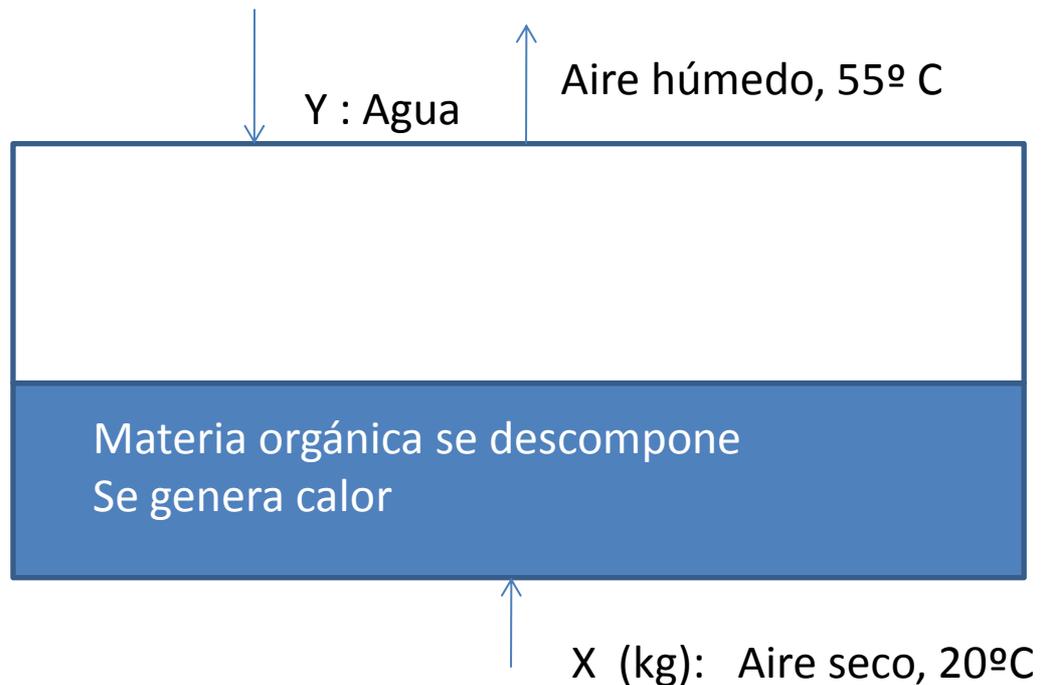
- La reacción es altamente exotérmica, el calor liberado en el compostaje es 20000 KJ/Kg sólido reaccionado (7).
- La masa de residuo a la entrada del túnel (día 0) tiene una temperatura de 20°C y a las 2 semanas sale a una temperatura de 40°C. Calor específico de los residuos = 3,5 KJ/(Kg °K)
- El aire que entra se supone seco a 20°C y sale saturado de vapor de agua a 55°C.

Calor específico del aire: 1 KJ/(Kg aire ° K)

Calor de vaporización del agua: 2.540 KJ/Kg

Humedad absoluta a 55 ° C: 0,115 kg vapor agua/Kg aire seco.

- Proceso adiabático. Se supone que no hay pérdidas de calor por las paredes del túnel. Los túneles están contiguos unos con otros, por lo que las temperaturas de las paredes son iguales. Sólo los túneles 1 y 14 tienen paredes expuestas a convección natural y están aisladas. Las puertas de los túneles son de material aislante, por lo que las pérdidas son despreciables.
- El posible lixiviado que sale por el suelo del túnel, se vuelve a rociar a los residuos.



El calor generado en el compostaje se emplea:

- Calentar Todos los residuos en el túnel (no sólo la materia orgánica).
- Calentar el aire (desde 20 a 50 °C) que se inyecta en los 14 días
- Evaporar el agua

Procedimiento a seguir:

Se va a plantear el balance de materia, donde nos vamos a encontrar con las incógnitas X (cantidad de aire seco en Kg) e Y (cantidad de agua rociada en Kg). A continuación se plantea el balance de energía en el que se obtiene X y por consiguiente la cantidad de agua evaporada (Y), cuando se sustituye el valor del aire seco (X) en el balance de materia.

2.3.2 Balance de materia.

- Entrada:
 - Aire seco (20°C): N₂ y O₂
 - Residuos (20°C)
 - Agua (que viene con los residuos)
 - Agua que se rocía
- Salida:
 - Aire saturado (55°C): CO₂, H₂O, N₂, O₂
 - Residuos (40°C)
 - Agua (que sale con los residuos)

Cálculos:

- Entrada:

- **Aire (seco)**

Entran X kilos (en las dos semanas)

N ₂	X * 0,767
O ₂	X * 0,233
H ₂ O	-
Total aire seco	X

Tabla 20. Caudal de Aire entrada al túnel.

- **Residuos**

Entran 119 toneladas (humedad al 50%). De estas toneladas $119 * 9,86 / 15,33 = 76,50$ toneladas corresponden a materia orgánica, de los cuales sólidos son: $76,50 * 0,5 = 38,5$ t de C₆H₁₆O₅

Entran: 38,5 t Sólidos Materia orgánica

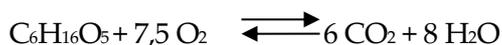
59,5 t Agua

$119 - 38,5 - 59,5 = 21,0$ t otros sólidos (inertes)

- **Agua**

Agua que se introduce para reponer la que se evapora = Y kg/h.

REACCIÓN:



De C₆H₁₆O₅ reacciona el 57%:

$38500 \text{ Kg C}_6\text{H}_{16}\text{O}_5 * 0,57 = 21840 \text{ Kg} = 130 \text{ Kmol}$

De O₂: $(130 \text{ Kmol} * 7,5) = 975 \text{ Kmol} = 31200 \text{ Kg}$

De CO₂: $(130 \text{ Kmol} * 6) = 780 \text{ Kmol} = 34320 \text{ Kg}$

De H₂O: (130 Kmol * 8) = 1040 Kmol = 18720 Kg

- Salida:

- "Aire" (saturado) 55°C.

N ₂	X*0.767
O ₂	X*0.233 - 31200
CO ₂	34320 kg
Total aire seco	X+34320 -31200= x+3120

Tabla 21. Aire de salida.

(CO₂ se considera parte del "aire" que sale)

- Residuos (Compost).

C ₆ H ₁₆ O ₅	38500*0.43 = 16560 Kg
Inerte	21000 Kg
H ₂ O	(16560+21000)*0.5= 18780 Kg

Tabla 22. Residuos de salida.

Realizando el balance de materia:

$$\text{Residuos} + \text{Agua} + \text{Aire} = (\text{Compost}) + \text{Gases (aire)} + \text{Agua (vapor)} \quad [19]$$

$$119000 + Y + X = (21000 + 16560 + 18780) + X + 3120 + (X * 0,115)$$

2.3.3 Balance de energía

$$\text{Entrada} + \text{Reacción} = \text{Salida} + \text{pérdidas} \quad [20]$$

Referencia: sustancias a 20° C. Agua líquida a 20 °C.

En la entrada, todos tienen entalpia cero con respecto a la referencia.

$Q_{\text{liberado en el compostaje}} = 20000 \text{ KJ/Kg sólido reaccionado} * 21840 \text{ Kg sólido reaccionado} = 436.800.000 \text{ KJ}$

$Q_{\text{residuos}} = m_{\text{residuos}} * C_p * (T_s - T_e) = (21000+16560) * 3,5 * (40 - 20) = 2.629.200 \text{ KJ}$

$Q_{\text{aire}} = (X + 3120) * 1 * (55-20) = 35 X + 109.200 \text{ KJ}$

$Q_{\text{agua de los residuos}} = 18780 * 4,2 * (40 - 20) = 1.577.520 \text{ KJ}$

$Q_{\text{vapor agua}} = (X * 0.115) * (c_{\text{pagua}}*(55-20)+ H_{\text{vap}}(55^{\circ})) = X * 0.115 * (4,2 *(55-20)+ 2540) = 309 * X \text{ KJ}$

$$0 + 436.800.000 = 2.496.200 + (35 X + 109.200) + 1.497.720 + (309 * X) \quad [21]$$

$$X = \text{Kg de aire seco} = 1.257.840 \text{ Kg}$$

Introduciendo el valor de X en la ecuación 18:

$$Y = \text{Kg de agua que se introduce para reponer lo que se evapora} = 86300 \text{ Kg}$$

Una vez calculado el caudal de agua necesario, se continúa con el diseño del sistema de rociado.

2.3.4 Boquillas

El caudal evaporado durante los 14 días es de 86 m^3 , por lo que obtiene un caudal medio de $6 \text{ m}^3/\text{día}$, aunque los primeros días se evapora más agua. Con lo cual se toma un caudal de $9 \text{ m}^3/\text{día}$.

El tiempo de rociado va a ser de aproximadamente unos 30 minutos al día, por lo que Caudal: 300 l/min .

El rociado se va a llevar a cabo a través de unas boquillas incrustadas en dos tuberías situadas en el techo del túnel. Estas tuberías son paralelas a la pared longitudinal del túnel. Para que el agua sea rociada uniformemente sobre la superficie del residuo, las tuberías tienen que estar separadas $2,5$, como se muestra en la Ilustración 39 :

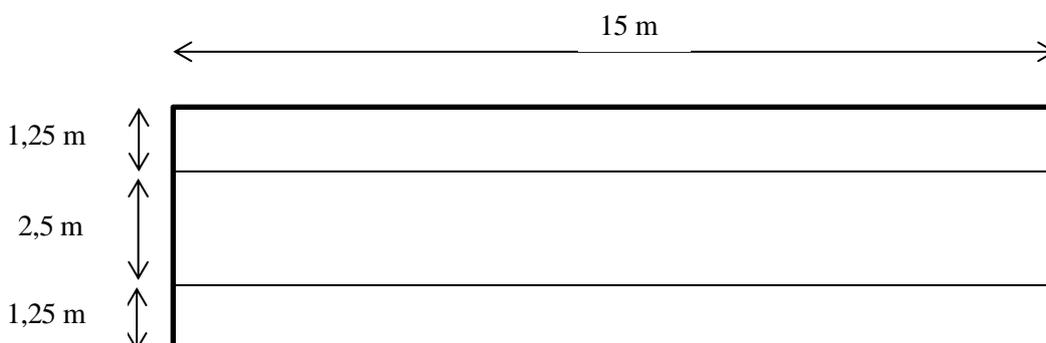


Ilustración 39. Tuberías de rociado.

Con esta distribución de tuberías se ve que las boquillas rociadoras tienen que cubrir un área de radio $2,5 \text{ m}$ como mínimo.

Como el túnel tiene una longitud de 15 m y los chorros cubren $2,5 \text{ m}$: $15 \text{ m} / 2,5 \text{ m} = 6$ boquillas por

cada tubería, o 12 boquillas por cada túnel.

Una vez calculado el número de boquillas, se procede a elegir el tipo de boquilla que se va a utilizar. Para escogerlas, se tiene en cuenta el caudal, el ángulo de aspersión y la presión de trabajo de cada boquilla:

- Caudal de cada boquilla:

$$(9 \text{ m}^3/\text{ día}) / 12 \text{ boquillas} = 0,75 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$(0,75 \text{ m}^3/\text{ día}) * (1 \text{ día}/ 30 \text{ min}) * (1000 \text{ l}/ 1 \text{ m}^3) = 25 \text{ l}/\text{min}$$

- Ángulo de aspersión:

Las boquillas se encuentran a 1,5 m de los residuos y tienen una cobertura de 2,5 m, entonces tienen que rociar con un ángulo de unos 80° aproximadamente.

- Presión de trabajo (20)

3 bar.

Boquilla seleccionada (20):

- *Tipo: Cono lleno de sección cuadrada 1/2 – M – B3 – 36*
- *Fabricante: Nozzles division*
- *Caudal: 26 l/min*
- *Ángulo de aspersión: 80°*
- *Presión de trabajo: 3 bar*

Con esta boquilla se consigue una cobertura de 2,52 m, con lo cual los chorros sólo se solaparían 2 cm.

3 CONTROL DE OLORES. BIOFILTRO

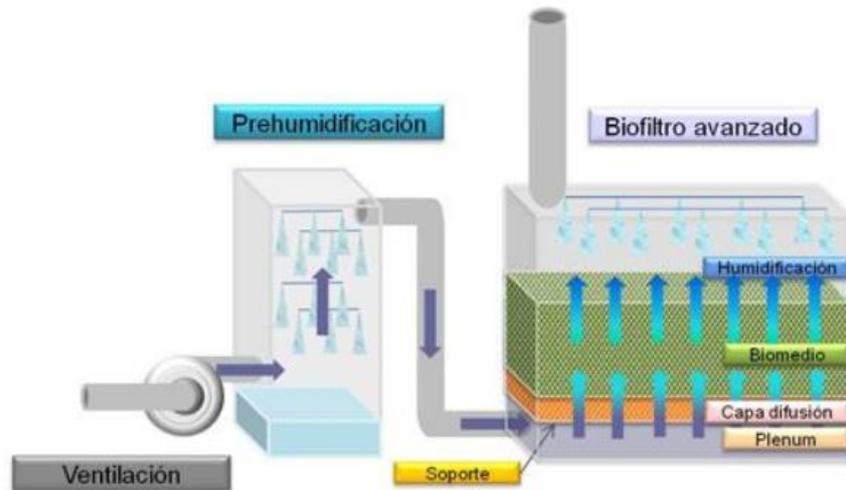


Ilustración 40. Sistema de biofiltración.

Como se puede observar en la figura anterior este sistema consta de tres equipos principales: el ventilador, el humidificador y el biofiltro.

3.1 Ventilador.

A este ventilador le llega una tubería que transporta los gases de salida de los 14 túneles. Es decir un caudal de **48035 m³/h**.

Este caudal se obtiene de los 1260960 Kg de gases que sale de cada túnel durante los 14 días de fermentación (52540 Kg/h).

El ventilador debe suministrar una presión para vencer las pérdidas en las tuberías, en el humidificador y en el biofiltro.

3.1.1 Pérdidas de carga

Cálculo de pérdidas de carga en los 100 m de tuberías (14 túneles * 5 metros de ancho + 30 metros hasta el ventilador y desde éste hasta el biofiltro), en las 2 T. En La tubería de extracción de gases de cada túnel se coloca una válvula antiretorno y la válvula de control de caudal ("dámper").

La velocidad por la tubería es de 20 m/s.

$$\pi \cdot D^2/4 \cdot 20 = 48035/3600 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D = 0.92 \text{ m}$$

$$h_{fA-B} = 4f \frac{L v^2}{D} + \sum_i K_i \frac{v^2}{2}$$

En el cálculo de $4f$ se utiliza el siguiente Ábaco de Moody:

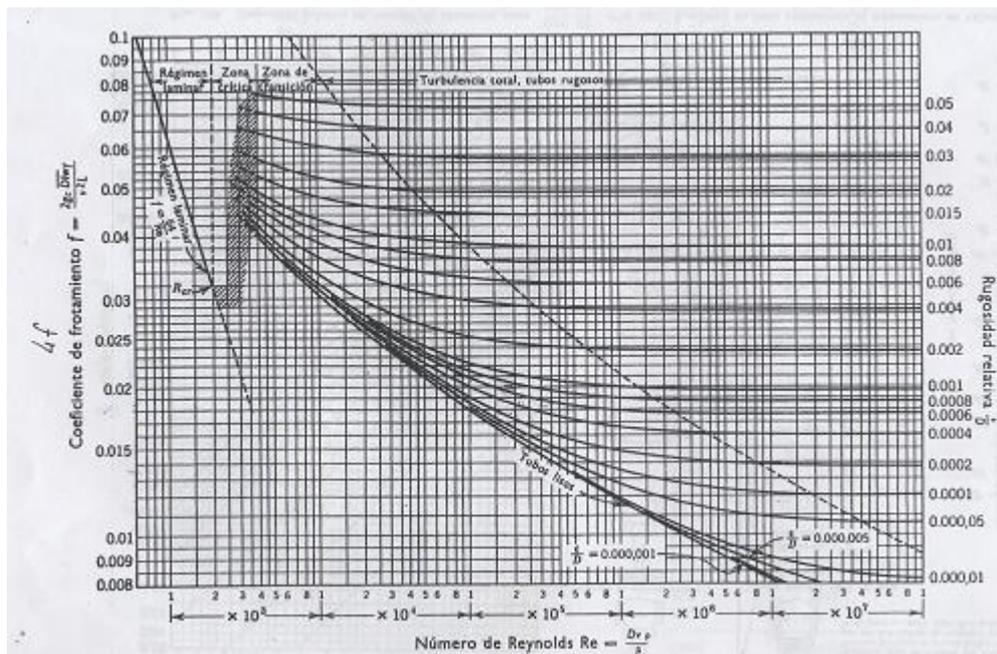


Ilustración 41. Ábaco de Moody.

Se tiene que calcular el número de Reynolds y la rugosidad relativa:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = 1e6$$

Para el cálculo de la rugosidad relativa $\left(\frac{\epsilon}{D}\right)$ se utiliza la siguiente figura:

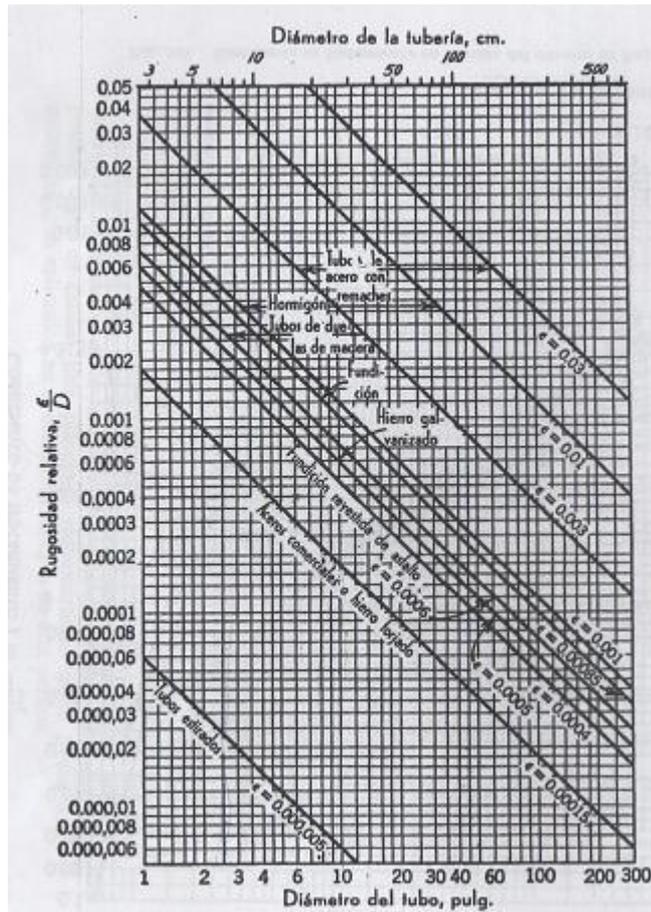


Ilustración 42. Rugosidad relativa en función del diámetro, para tubos de diversos materiales.

Con un diámetro de 0,92m (36 in) y para aceros comerciales se obtiene una rugosidad relativa de:

$$\frac{\epsilon}{D} = 0,00006$$

Una vez calculados los valores de Reynolds y rugosidad relativa, el Ábaco de Moody nos da un valor de $4f = 0,0135$.

Para el cálculo de los coeficientes de resistencia en accesorios (K_i):

Diámetro del tubo, en pulgadas	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24
Tubo curvado $R = 3D$ $R = 4D$						0,04 0,025							
Codo de 90°	1,5	1,0	0,8	0,7	0,55	0,3	0,27	0,25	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22
Codo largo de 90°	0,75	0,4	0,3	0,25	0,20	0,18	0,10	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09
Codo de 45°	0,35	0,30	0,28	0,28	0,27	0,28	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Codo largo de 45°	0,25	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,14	0,14
Curva de 180°	1,5	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25	0,23	0,22	0,21	0,2
Curva de 180° de gran radio	0,8	0,5	0,4	0,35	0,3	0,2	0,16	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10
Tes-Flujo principal						0,9							
Flujo derivado	1,8	1,4	1,2	1,1	1,0								
Válvula de compuerta, abierta		0,2-0,3	0,15	0,15	0,12	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03
cerrada 1/4		0,8	0,2										
cerrada 1/2		4,0	0,8										
cerrada 3/4		16,0	2,0										
Válvula esféricas	12,5	8,5	7,5	6,5	6	5,9	5,8	5,7	5,6	5,5	5,5	5,5	5,5
Válvula de retención	3,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Válvula de pte							0,8						
Colador		1,5	1,0					1,0	0,4				

Figura 3: Coeficientes de resistencia para codos y accesorios.

$$K_{\text{para } 2T} = 2 * 0,9$$

$K_{\text{válvula antirretorno}} = K_{\text{válvula retención}} = 2$

Dámper: 1,8

Sustituyendo todos los datos en la ecuación de pérdida de carga se obtiene:

$$h_{fA-B} = \rho \left(4f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2} + \sum_i K_i \frac{v^2}{2} \right) = 1030 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \times 1,076 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1500 \text{ Pa} \quad [22]$$

A esta pérdida de carga, hay que sumarle:

- Pérdida de carga en el humidificador = 150 Pa (34)
- Pérdida de carga en el biofiltro: = 125 Pa (12)
- Vacío en el túnel : 10 mm de ca: - 100 Pa (Diseño)

Pérdida de carga total: $1500 + 150 + 125 + 100 = 1875 \text{ Pa}$

El ventilador escogido tiene las siguientes especificaciones:

- *Modelo: MTRL 900*
- *Fabricante: Casals*
- *Caudal en el punto de servicio: 48780 m³/h*
- *Presión en el punto de servicio: 2060 Pa*
- *Nº de ventiladores: 1*
- *Regulador de caudal: Variador de frecuencia*

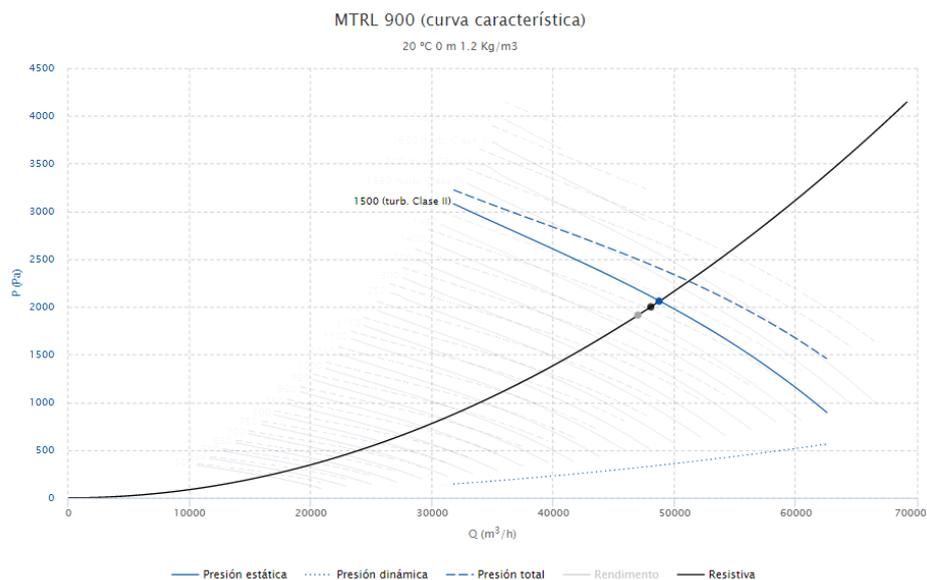


Ilustración 43. Curva característica del ventilador del biofiltro.

Elaboración propia. (33)

3.2 Humidificador

El aire que sale del ventilador entra por la parte inferior de este equipo, el cual tiene forma cilíndrica. Dicho equipo se encarga de enfriar y saturar de humedad los gases rociándoles agua por unos pulverizadores.

En el humidificador se produce una humidificación adiabática (el agua se recircula). En el fondo del reactor se acumula el agua pulverizada hasta una determinada altura, desde donde una bomba la envía a los pulverizadores.

El aire de entrada se encuentra a 50°C y tiene una humedad relativa del orden del 60%. Este aire es puesto en contacto en contracorriente con agua pulverizada para que sea enfriado hasta su temperatura de rocío. En la realidad, se diseña para alcanzar una humedad relativa del 90-95%.

3.2.1 Cantidad de agua

Para calcular la cantidad de agua que se evapora, se calcula la humedad absoluta a la entrada y a la salida del humidificador. El agua evaporada hay que reponerla continuamente.

Las humedades se calculan con la ayuda del diagrama psicrométrico.

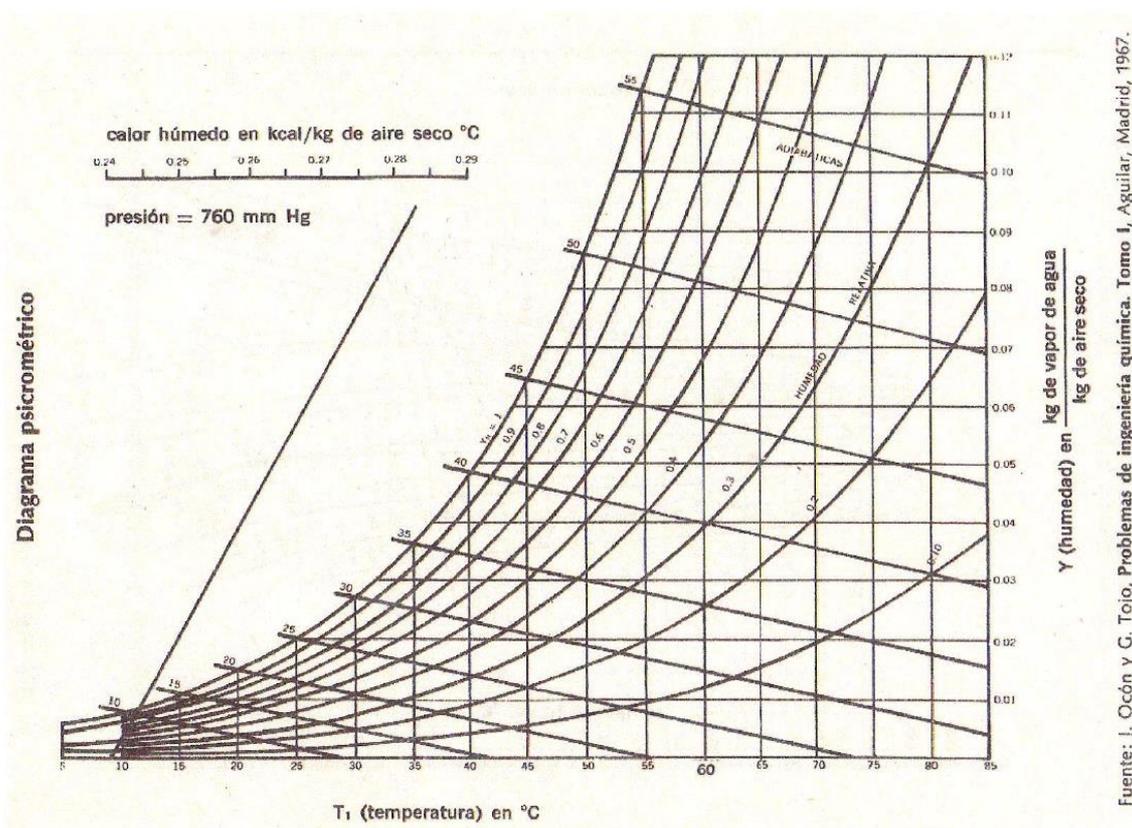


Ilustración 44. Diagrama psicrométrico.

Fuente: Ocón y Tojo. Problemas de Ingeniería Química. Tomo I, Aguilar 1997

- Aire de entrada

50°C y 60% humedad relativa.

Se obtiene una humedad absoluta $Y_1=0,048$ Kg agua/Kg aire seco.

- Aire de salida

95% humedad relativa y entalpia constante.

Se obtiene una humedad absoluta $Y_2=0,051$ Kg agua/Kg aire seco y $T^a_{salida}= 42^\circ\text{C}$.

$$\text{Cantidad de agua a reponer} = G_s * (Y_2 - Y_1) \quad [23]$$

$$G_s = \text{caudal de aire seco} = (52540 \text{ Kg aire/h}) / (1 + 0,048) = 50133,6 \text{ Kg aire seco / h.}$$

$$\text{Cantidad de agua a reponer} = 50133,6 * (0,051 - 0,048) = 150,4 \text{ Kg agua / h.}$$

3.2.2 Dimensiones del humidificador

A) Área

En cuanto al cálculo de las dimensiones del humidificador, en primer lugar se calcula el área del humidificador. Para ello, se dividirá el caudal de los gases por la velocidad a la que éstos circulan por el humidificador.

Para evitar que haya un excesivo arrastre de gotas, se calcula la velocidad del gas con la siguiente ecuación (34):

$$v_g = 0,2 * \left(\frac{Q_{\text{liquido}} - Q_{\text{gas}}}{Q_{\text{gas}}} \right)^{0,5} = 6,13 \text{ ft/s} \quad [24]$$

$$Q_{\text{liquido}}(25^\circ\text{C}) = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 62,345 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

$$Q_{\text{gas}}(50^\circ\text{C}) = 1,0624 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 0,0662 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

Caudal del aire:

$$Q_{\text{aire}} = \frac{50133,6 \text{ Kg/h} * 0,082 * (50 + 273) \text{K}}{1 \text{ atm}} = 45835 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 449,28 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}} \quad [25]$$

Área del humidificador:

$$\text{Área} = \frac{Q_{\text{aire}}}{v_{\text{gas}}} = 73,3 \text{ ft}^2 = 6,8 \text{ m}^2$$

B) Volumen del humidificador

La altura del humidificador (Z) se calcula utilizando la siguiente ecuación (34):

$$Z = \frac{G_s/\text{área}}{K_{ya}} * \frac{(Y_2 - Y_1)}{(Y^*(T_{as}) - Y)_{ml}} \quad (\text{ft}) \quad [26]$$

- $G_s = \text{caudal de aire seco} = \frac{52540 \text{ Kg aire/h}}{1+0,048} = 50133,6 \text{ Kg aire seco/h} = 110524 \text{ lb/h}$

- $(Y^*(T_{as}) - Y)_{ml} = \frac{(Y^*(T_{as}) - Y_2) - (Y^*(T_{as}) - Y_1)}{\ln \frac{(Y^*(T_{as}) - Y_2)}{(Y^*(T_{as}) - Y_1)}} = 2,164 \cdot 10^{-3} \quad [27]$

Siendo $Y^*(T_{as})$ la humedad absoluta correspondiente a la temperatura de saturación, es decir a una humedad relativa del 100% = 0,052 Kg agua/ Kg aire seco.

- $K_{ya} = H_a / C_s \quad (\text{Kg/m}^3\text{h}) \quad [28]$

$$C_s = \text{calor específico húmedo (Kcal/Kg}^\circ\text{C)} = 0,24 + 0,45 Y \quad [29]$$

Haciendo un promedio entre los calores específicos húmedos a la entrada y salida del humidificador:

$$C_{s1} (Y_1 = 0,048) = 0,2616 \text{ (Kcal/Kg}^\circ\text{C)}$$

$$C_{s2} (Y_2 = 0,051) = 0,263 \text{ (Kcal/Kg}^\circ\text{C)}$$

$$\text{Se obtiene } C_s = 0,2623 \text{ (Kcal/Kg}^\circ\text{C)} = 0,014 \text{ (Btu/lb }^\circ\text{F)}$$

$$H_a = \text{coeficiente volumétrico de transferencia de calor} = 1000 \text{ (Kcal/m}^3\text{h}^\circ\text{C)}$$

$$H_a = \frac{0,043 * G^{0,8} * L^{0,4}}{Z^{0,5}} \left(\frac{\text{BTU}}{\text{ft}^3\text{h}^\circ\text{F}} \right) \quad [30]$$

$$G = \frac{110524 \text{ lb/h}}{73,3 \text{ ft}^2} = 1508 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2\text{h}}$$

$$L = \frac{126309 \text{ lb/h}}{73,3 \text{ ft}^2} = 1723,4 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2\text{h}}$$

Para el cálculo del caudal de líquido, se ha usado el valor típico para boquillas pulverizadoras de "presión": 1-1,5 litro de agua/ 1 m³ de gas (34).

Como se puede observar se han obtenido dos ecuaciones 25 y 29, con dos incógnitas. Al resolver el sistema de ecuaciones, se obtienen los siguientes valores:

$$H_a = 3,32 \text{ (Btu/ft}^3\text{h}^\circ\text{C)} = 1000 \text{ (Kcal/m}^3\text{h}^\circ\text{C)}$$

$$Z = \text{altura} = 8,82 \text{ ft} = 2,7 \text{ m}$$

La altura total del humidificador será:

$$H_{\text{total}} = 2,7 \text{ m} + 0,5 \text{ m (almacenamiento agua)} + 1 \text{ m (diámetro tubería de entrada de gases)} + 0,5 \text{ m (pulverizadores)} + 1 \text{ m (sistema de captación de gotas)} \cong 6 \text{ m}$$

3.3 Biofiltro

El aire entra en el biofiltro por el plenum situado en la parte inferior. Encima de éste se coloca una rejilla para retener una capa de unos 30 cm de grava, cuya función es producir una distribución homogénea de los gases sin caminos preferenciales. Encima de la grava se coloca el material filtrante, que está constituido por un 80% de "cortezas" de madera y 20% compost. La capa filtrante tiene una altura típica de 1m.

A) Área biofiltro:

Caudal de aire que entra (a 42°C) = 46845,3 m³/h

Carga volumétrica = 75-100 (m³/h)/(m²).

Dividiendo los dos datos dados se obtiene un área de 625 m².

B) Cantidad material filtrante:

El volumen del biofiltro es de 625 m³ y la densidad del material filtrante es de 400 Kg/m³, por lo que se necesita una cantidad de 250 t de material filtrante: 200 de "chip" y 50 de compost.

4 BALANCE DE MATERIAL EN EL TÚNEL

En el proceso de fermentación (8) hay una reducción del 60 % de los sólidos de la materia orgánica (humedad del 50%) y una reducción del 15% de los sólidos del papel y cartón (humedad del 20%).

Cada túnel se carga con 119 t de residuos

Materia orgánica = $119 * 9,86 \text{ t materia orgánica} / 15,33 = 76,3 \text{ t}$

Sólidos en materia orgánica = $76,3 \text{ t} * 0,5 \text{ sólidos} / 1 = 38,15 \text{ t}$

Pérdidas por fermentación = $38,15 \text{ t} * 0,6 = 22,9 \text{ t}$

Por lo tanto del túnel salen = $76,3 - 22,9 = 53,4 \text{ t}$ de materia orgánica.

Papel y cartón = $119 * 0,89 \text{ t papel y cartón} / 15,33 = 6,9 \text{ t}$

Sólidos en papel y cartón = $6,9 \text{ t} * 0,8 \text{ sólidos} / 1 = 5,50 \text{ t}$

Pérdidas por fermentación = $5,50 \text{ t} * 0,15 = 0,83 \text{ t}$

Por lo tanto del túnel salen = $6,9 - 0,83 = 6,06 \text{ t}$ de papel y cartón.

Salen del túnel en total = 94,9 t de residuo fermentado.

	Entrada a túnel (t/h)	Salida túnel (t)
Materia orgánica	76.25	53.38
Papel y cartón	6.88	6.06
Plástico	2.24	2.24
Vidrio	12.61	12.61
Metales	0.31	0.31
Maderas	1.16	1.16
Otros	19.10	19.10
Total	118.55	94.85

Tabla 23. Balance de materia en el túnel.

5 PROCESO DE MADURACIÓN

La entrada de material fermentado a las eras de maduración es:

Compost a madurar (t/día)	94,9
Compost a madurar (m ³ /día)	210

La reducción en el proceso de maduración (7) es del 20 % de la materia orgánica que quede y del 50 % papel/cartón que resta.

De las 94,9 toneladas que salen del túnel, 53,9 t pertenecen a la materia orgánica y 6,06 t al papel y cartón.

Reducción en la materia orgánica = $53,9 \text{ t} * 0,5 * 0,2 = 5,4 \text{ t}$

Además, la humedad de la materia orgánica pasa del 50 al 35 %, por lo que se evaporan: 8,09 t

Sale de la maduración = $53,9 - 5,4 - 8,09 = 40,4 \text{ t}$ de materia orgánica.

Reducción en el papel y cartón = $6,05 \text{ t} * 0,5 = 3,025 \text{ t}$

Sale de la maduración = $6,05 - 3,025 = 3,025 \text{ t}$ de papel y cartón.

Sale de la maduración en total = 79,12 t de residuo maduro

Compost maduro (t/día)	79,12
Compost maduro (m ³ /día)	175,8

Para diseñar las medidas de la era de maduración hay que tener en cuenta que hay que dejar 10 m alrededor de la era y un 1 m entre pila y pila para que pueda maniobrar bien la pala que se va a encargar de formar las pilas.

También hay que tener en cuenta que el periodo de maduración es de 8 semanas y en cambio el de fermentación es de 2 semanas, por lo que hay que dejar espacio suficiente como para 4 procesos de fermentación.

Dimensiones pila:

Altura 3,5 m

Ancho 5 m

Longitud 25 m

Números de pilas: 14 pilas x 4

Dimensiones de la era: 45 x 355 m

Cada pila en una fila: $((14*4)*(5+1)) + 2*10 = 355$ m, y de profundidad $(25+20) = 45$ m.

6 AFINO DEL COMPOST

En el trómel se separan (29) en los gruesos los metales, maderas, 80 % de plásticos, 30 % papel-cartón, 60 % otros y 20 % materia orgánica.

Residuos		Antes del trómel (t/día)	Finos (t/día)	Rechazo (t/día)
Materia orgánica		40,4	32,4	8,0
Papel y cartón		3,025	2,12	0,91
Plástico	115 * 0,29 /14,88	2,24	0,45	1,79
Vidrio	115 * 1,63 /14,88	12,60	12,60	0,00
Metales	115 * 0,04 /14,88	0,31	0,00	0,31
Maderas	115 * 0,15 /14,88	1,16	0,00	1,16
Otros	115 * 2,47 /14,88	19,09	7,64	11,45
Total		79,1	55,41	23,7

Tabla 24. Distribución de los residuos a la salida del trómel de afino.

A continuación, los finos se llevan hacia una mesa densimétrica, donde se eliminan los elementos de mayor densidad no deseados en el compost

En la mesa densimétrica, se separa todo el vidrio y el plástico que quede, además del 90 % de los otros. El resto es compost refinado.

Residuos	Después mesa densimétrica (t/día)
Materia orgánica	32,62
Papel y cartón	2,12
Plástico	0,00
Vidrio	0,00
Metales	0,00
Maderas	0,00
Otros	0,76
Total	35,5

Tabla 25. Compost a la salida de la mesa densimétrica.

Una vez realizados todos estos procesos ya el compost tiene las propiedades necesarias para ser comercializado.

REFERENCIAS

1. **Sequeiros, Leandro. CMA Andalucía.** Estrategias institucionales para el tratamiento y valoración de residuos urbanos. Valencia : s.n., 2014.
2. **Garrigues.** *Manual para la gestión de los residuos urbanos.* s.l. : Ecoiuris, 2003.
3. **López Martínez, Marga.** *Valorización de la fracción orgánica de Residuos municipales: Materia prima, proceso y producto.* s.l. : MP, 2014. Vol. III.
4. **MAGRAM (MINISTERIO MEDIO AMBIENTE).** *Guía para la implantación de la recogida separada y tratamiento de la fracción orgánica.* Madrid : s.n., 2013.
5. **Mata alvarez, J.** *Biomethanization of the organics fraction of municipal Solid Wastes.* s.l. : IWA, 2002.
6. **Dpto. Ingeniería Química y Ambiental. ETSI Sevilla.** *Apuntes. Gestión y Tratamientos de Residuos.* 2014.
7. **Haug, Roger T.** *The practical handbook of compost engineering.* s.l. : CRC Press, 1993.
8. **Epstein, E.** *Industrial Composting. Environmental engineering and facilities management.* s.l. : CRC, 2011.
9. **RESA.** *Comparación de tecnologías de compostaje en naves cerradas.* 2004.
10. **Pérez Losada, Carlos.** *Compostaje en túneles cerrados. Jornada Técnica: "DA seca de Residuos orgánicos para producir emienda orgánica de suelos".* Pamplona : s.n., 2003.
11. <http://www.compostandociencia.com/2015/02/sistemas-de-compostaje/>. [En línea] 1 de 9 de 2015.
12. **Environment Agency (Inglaterra).** *Biofilter performance and operation as related to commercial composting.* 2013.
13. **Abengoa.** *Conversión de RSU en biocombustibles (WB2). I Conferencia sobre gestión de RSU.* Valencia : s.n., 12 NoViembre 2014.
14. **GH cranes.** *Folleto de grúas de residuos.* 2013.
15. *Plant Report. Centro de tratamientos de RSU del complejo ambiental de la "Vega".* **Infoenviro.** Octubre 2008.
16. **Masias Recycling.** *Folleto Tromel.* 2014.
17. **Drago electrónica.** *Folleto Separadores magnéticos.* 2015.
18. http://www.leblan.com/residuo_urbano.php. [En línea] 1 de 9 de 2015.
19. **Metrocompost.** *Folleto. Compotunel. Compostaje de residuos orgánicos .* 2014.
20. **TECSI. Nozzles division.** *Catálogo Nozzles.* 2006.
21. **Castelli, L. y colab.** *Fuzzy logic control applied to in-vessel composting.* s.l. : Ecomaster Atzwanger, 2005.
22. **GOSAB.** *Folleto. Densimetric tables.* 2012.
23. **Universitat politècnica de Valencia. Escola Tècnica superior Enginyeria.** *Gestión de RSU en el área metropolitana de Valencia.* VIII Jornadas de de Ingeniería Ambiental 2015.
24. **Consorti per a la gestió de les residus urbans d'Osona.** *Pliego PPT. Centro Tratamiento de Residuos municipales de Osona y Ripollés.* 200y6.
25. **Gipuzkoaku foru Aldundia.** *Centro de Gestión de Residuos de Guipuzcoa.* 2014.

26. **Consorci per a la gestió de les residus urbans del Vallés Occidental.** *Centre de tractament de residus municipals del Vallés Occidental. Avantproject.* 2007.
27. **Ecoembes.** Diseño de la nueva Fórmula de pago por selección de envases ligeros en plantas automáticas. 2012.
28. **Zorrilla, C.** Sistema de tratamiento de la fracción resto. El modelo TMB. Reinnova. II Congreso. 2011.
29. **Gallardo Izquierdo, A.** *Estudio de la situación actual de las plantas de tratamiento MB en España.* Conama 2014.
30. **Caputo, A. y colab.** RDF Production Plant: I Design and Costs. 2002, Vols. Applied Thermal Engineering 22, Pag 423-437.
31. **Hartsock, D. y colaboradores.** Uniform aeration of compost media. *National Waste processing conference proceedings ASME.* 1994.
32. **AIRTECH.** Volume Control Dampers. Catálogo. 2014.
33. http://www.casals.tv/pricelist/Casals_tarifa_2015/. [En línea] 2015.
34. **Fair, J.** Process Heat transfer by direct fluid phase contact. *AiChe Heat Transfer Symposium, Series n° 118.* 1971, Vol. 68, págs. 1-11.
35. **Colomer Mendoza, FJ y Gallardo, Antonio.** *Tratamiento y gestión de residuos sólidos.* s.l. : UPV, 2007.
36. **Ayuntamiento de Madrid.** *Implicaciones de la Ley 22/2011 en la gestión de biorresiduos.* s.l. : XXI Jornadas técnicas de Medio Ambiente, 2012.

