UCA Universidad de Cádiz

Universidad de **Cádiz**

Proyectos de fin de carrera de **Ingeniería Química**

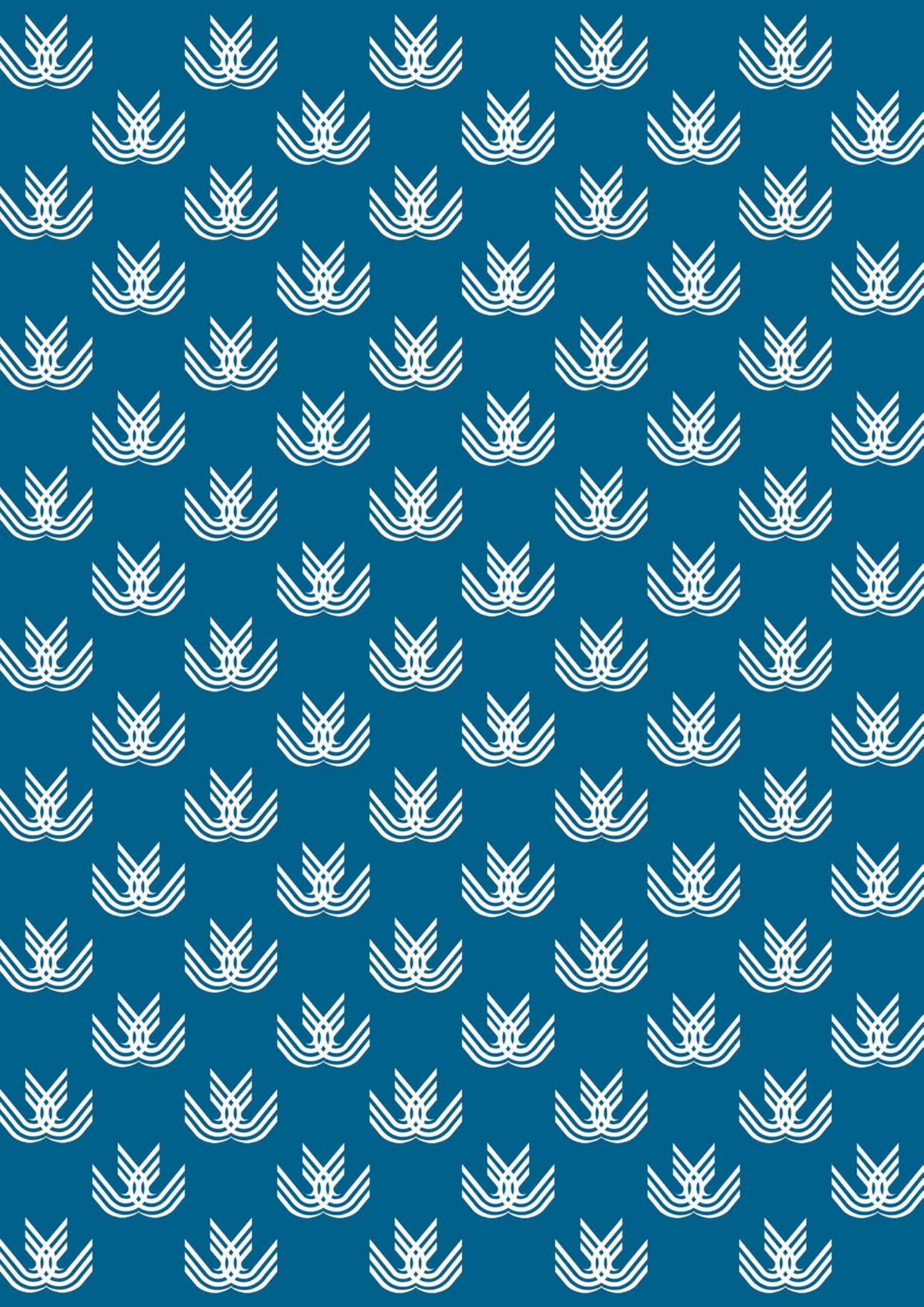
Facultad: CIENCIAS

Titulación: INGENIERÍA QUÍMICA

Titulo: DIMENSIONADO DE LA UNIDAD PIROLÍTICA DE UNA PLANTA DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN ANDALUCÍA

Autor: GIL GARCÍA, Alvaro

Fecha: Noviembre 2011



TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO
Universidad de Cádiz.

RESUMEN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA:

“Dimensionado de la unidad pirolítica de una planta de valorización energética de residuos plásticos en Andalucía.”

Alumno: Álvaro A. Gil García.

Tutores: Luis Isidoro Romero García
y Miguel Rodríguez Rodríguez.

Departamento de Ingeniería Química
y Tecnología de los Alimentos.

Noviembre, 2011

El proyecto se enmarca dentro del ámbito medioambiental, más en concreto la gestión de residuos. Su objeto es el dimensionado de la unidad pirolítica de una planta de valorización energética de residuos plásticos, a instalar en Aznalcóllar (Sevilla).

Primero, en la memoria descriptiva del proyecto, se analizan algunos aspectos básicos como qué son los materiales plásticos y sus tipos más comunes, para luego abordar el problema de los residuos que generan y las diferentes formas de gestión actuales. Así, justificándose en un marco legislativo, económico, tecnológico y medioambiental, se llegará a una solución que pretende ser sostenible y cuyo proceso es descrito, tanto en el conjunto de la planta como más específicamente en la unidad pirolítica.

A continuación, la solución planteada es apoyada por unos anexos donde se presentan primero los cálculos dimensionales de los equipos de la unidad, y luego se consideran otros aspectos como son un pequeño estudio de mercado que contempla las áreas de adquisición de los residuos, la competencia y los clientes potenciales en Andalucía Occidental. También se incluyen algunos trámites administrativos necesarios para la instalación, funcionamiento de la planta, obtención de ayudas y subvenciones, etc., así como mapas de localización, un estudio de impacto ambiental y algunas medidas de seguridad a considerar.

Con la unidad dimensionada y el lugar de instalación elegido, en el siguiente documento se muestran cinco planos con la ubicación de la planta, descripción del proceso global y los resultados dimensionales previos. Finalmente, se incluyen los documentos del Pliego de Condiciones del proyecto y el análisis económico de la unidad.

Desde el momento en que los materiales plásticos se introdujeron en la sociedad, han ido desplazando rápidamente los que se empleaban

habitualmente, gracias a unas propiedades únicas que les han convertido en imprescindibles en multitud de sectores.

Paralelamente, debido al corto ciclo de vida que éstos poseen en ciertas aplicaciones (por ejemplo envases y embalajes), unido a una sociedad de consumo que favorece la filosofía comercial de ”usar y tirar”, la generación de residuos plásticos ha proliferado igualmente, cambiando la composición de los residuos municipales e industriales.

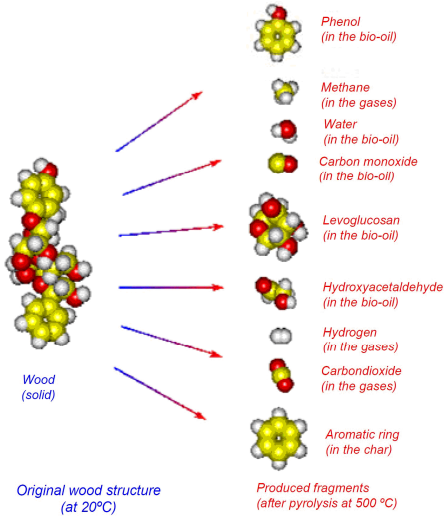
Estos residuos plásticos siguen poseyendo las mismas propiedades que sus productos originales, siendo algunas de ellas, como la resistencia química o la baja densidad, un problema para el medioambiente que obligó a las autoridades a implantar a lo largo de los años normativas de gestión que los consideraran.

Por otra parte, el plástico es un derivado del petróleo y posee un elevado poder calorífico que lo convierte en un residuo valioso, con una demanda en el mercado.

El tipo de residuo plástico para el que se va a dimensionar la unidad pirolítica del proyecto es el polietileno de alta densidad (PEAD), uno de los más comunes. Se adquirirá en las plantas de transferencia de residuos municipales y en centros de acopio de residuos plásticos agrícolas. Adicionalmente, también pueden tratarse en la unidad otros plásticos sintetizados por el mismo mecanismo que el PEAD, como son el polietileno de baja densidad, el polipropileno, el poliestireno y el PVC. Para este último tipo de plástico habría que incorporar una etapa en el postratamiento para separar el ácido clorhídrico formado a partir de él y evitar así una eventual formación de dioxinas.

La pirólisis térmica, llamada también termólisis o craqueo térmico, consiste en la descomposición de las sustancias orgánicas, como el plástico, a elevadas temperaturas en ausencia de oxígeno, o de cantidades suficientemente

pequeñas como para que no se produzcan combustiones significativas. Esto se traduce en que, a diferencia de otros procesos termoquímicos como la gasificación o incineración, la materia no es oxidada, sino convertida en moléculas más pequeñas por aporte de calor, conservando el poder calorífico para otras aplicaciones.



Craqueo térmico de una molécula en otras más pequeñas. Biomass technology Group (BTG).

Según la extensión de la pirólisis, la materia prima generará productos de hasta tres tipos posibles: sólidos (degradados del material original), líquidos volatilizados cuando el proceso es rápido y atenuado, y gases fruto de un proceso más intenso de craqueo térmico. Los líquidos y gases salen inicialmente en forma gaseosa debido a las altas temperaturas, pero en etapas posteriores de condensación ambas fases se separan.

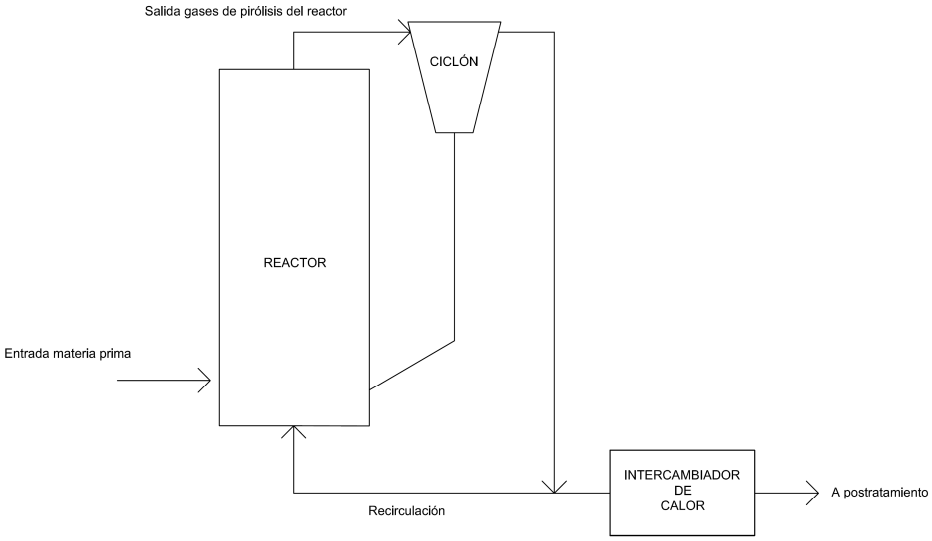
En la etapa de pretratamiento, debido a que los residuos plásticos procedentes de cultivos pueden estar impregnados con pesticidas y productos químicos así como traer gran cantidad de tierra o sustancias orgánicas, es preferible realizarles un triturado, lavado y secado para conseguir una alimentación uniforme y sin contaminantes que en la pirólisis podrían generar sustancias peligrosas.

La unidad pirolítica está compuesta por tres equipos:

- Un reactor con un lecho de arena fluidizado gracias a la recirculación de parte del propio gas de pirólisis. En este lecho se piroliza el plástico.

- Inmediatamente después, hay un ciclón para recircular al reactor posibles partículas de arena o plástico arrastradas.

- Finalmente, un intercambiador de calor de carcasa y tubos, situado antes de la salida de los gases de pirólisis a la etapa de postratamiento, para recuperar parte del calor residual de los gases en forma de vapor sobrecalentado. La temperatura de salida de los gases de pirólisis es tal que la fracción condensable permanece en estado gas, para evitar problemas de atascos en el equipo.



Esquema simplificado de la unidad pirolítica.

Para el caso del proyecto, donde el reactor trabaja a 740º C y con menos de 2 segundos de tiempo de residencia de los gases en el reactor, se puede considerar un tipo de pirólisis “flash”, que va a favorecer un rendimiento

elevado de productos pirolíticos en estado gas (70% de rendimiento) y líquido (30%), y prácticamente nada de sólidos.

	Tiempo de Residencia	Transferencia de calor	Temperat. (ºC)	Principales Productos
Carbonización	horas-días	Muy baja	300-500	Carbón/coque
Pirólisis convencional	horas	Baja	400-600	coque, aceites
	5-30 min.	Media	700-900	coque, gas
Pirólisis a vacío	2-30 seg.	Media	350-450	Aceites
Pirólisis flash	0,1-2 seg.	Alta	400-650	aceites
	< 1 seg.	Alta	650-900	aceites, gas
	< 1 seg.	Muy alta	>>1.000	gas

Tipos de pirólisis según condiciones de operación.

La unidad de pirólisis tiene una capacidad de trabajo de 15.000 t./año de residuos plásticos, con una disponibilidad de 343 días/año. El caudal másico de entrada al reactor es de 1,82 t./h de residuos plásticos de PEAD, el cual entra en el reactor de lecho fuidizado que está a 740º C gracias al aporte externo de 1.105,6 kW del horno que lo rodea.

El reactor tiene 1,16 metros de diámetro y 5,8 metros de alto, con una placa distribuidora de gas de 21 boquillas y trabaja en un régimen de fluidización de transición, con un arrastre del lecho de arena a razón de 2,44 t/h, la cual es recirculada gracias al ciclón, de 1,05 metros de diámetro y un largo de 3,2 metros.

El gas de pirólisis que no es recirculado al reactor tiene un caudal de salida de 1,82 t./h, y entra a 740º C en un intercambiador de calor de carcasa y tubos de 3,37 m^2 de superficie de intercambio y sale a 375º C. Gracias a un coeficiente global de intercambio de calor de 469,6 w/m·K convierte en vapor a 170º C una corriente de agua a 25º C y 5 atmósferas con un caudal de 51,74 kmol/h, mediante el aporte de calor de 693,26 kW.

En la etapa de postratamiento, ya fuera del objeto del proyecto, se separará la fracción condensable (formada por aceites pirolíticos con una composición similar a la nafta de petróleo), de la no condensable (formada por hidrocarburos de 1 a 4 átomos de carbono tipo metano, etano, eteno, propano, etc).

Dentro del estudio de impacto ambiental que produce la actividad, cabe destacar como residuos peligrosos del proceso unos lodos, fruto tanto del lavado de los plásticos en el pretratamiento, como de la condensación y precipitación, en la etapa de postratamiento, de hidrocarburos aromáticos policíclicos arrastrados en el gas de salida del reactor. Por lo cual, se sugiere la instalación de una depuradora

Como aplicaciones de los productos del proceso, debido a la restricción impuesta por el R.D. 653/2003 sobre incineración de residuos, para evitar la generación de dioxinas y furanos, los productos gaseosos de salida deben someterse a 850º C durante más de 2 segundos si no llevan compuestos clorados, o a 1100º C y más de 2 segundos si los llevan antes de darles ninguna aplicación como producto fuera de la planta. El reactor trabaja a 740º C, y como consecuencia al gas producido no se le puede dar así ninguna aplicación, por lo que se sugiere su valorización energética como combustible para el propio horno del reactor, o en unos motores de gas, o en un ciclo combinado mediante turbinas para generación de electricidad, que se consumiría en la propia planta o se vendería aprovechando la bonificación de "régimen especial de cogeneración" por el empleo de residuos como materia prima. En este último caso, la planta se denominaría "IPCC", planta integrada de pirólisis y ciclo combinado. Otras posibilidades para los gases pero que implicarían una inversión mayor serían:

- Su gasificación posterior (es decir, combustión parcial) para generar un gas de síntesis (CO e H_2), con multitud de aplicaciones como fabricación de combustibles líquidos o productos químicos.

- Su reformado con vapor, al contener metano, para producción de hidrógeno.

Respecto a los aceites pirolíticos condensados, al no verse afectados por el Real Decreto anterior pueden salir de la planta para venderse como materia prima en diferentes aplicaciones:

- Combustible, tanto dentro de la propia planta como fuera vendido a plantas de cogeneración por ejemplo, con los mismos fines que los descritos antes para el gas (generación de electricidad o calor).
- Destilado y obtención de los bencenos, toluenos y xilenos.
- Reformado catalítico para obtención de gasolinas, al tener una composición similar a las naftas del petróleo.

Para el análisis económico del proyecto se ha empleado la metodología de una empresa consultora con experiencia en estimación global de costes de plantas industriales, para la unidad pirolítica a partir de otros casos previos mediante la aplicación de ecuaciones de coste. De esta forma, se obtiene un valor medio del Coste Total de Inversión del Proyecto de unos 5.299.604 € y un coste Total de Operaciones de 3.057.274 €/año.

INDICE GENERAL

DOCUMENTO I: MEMORIA DESCRIPTIVA Y ANEXOS

DOCUMENTO II: PLANOS

DOCUMENTO III: PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES

DOCUMENTO IV: ANÁLISIS ECONÓMICO

ÍNDICE DE TABLAS, FIGURAS, DIAGRAMAS E IMÁGENES.

LISTA DE ABREVIATURAS

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

DOCUMENTO I: MEMORIA DESCRIPTIVA

Capítulo 0: RESUMEN DEL PROYECTO.

Capítulo 1: ANTECEDENTES.

Capítulo 2: OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

Capítulo 3: UBICACIÓN DE LA PLANTA

Capítulo 4: DEFINICIÓN DEL PROYECTO.

Capítulo 5: MARCO LEGAL APLICABLE.

Capítulo 6: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

Capítulo 7: PRODUCTOS DEL PROCESO.

DOCUMENTO I: ANEXOS

Anexo A: CÁLCULOS.

Anexo B : ESTUDIO DE MERCADO.

Anexo C: MAPAS DE LOCALIZACIÓN.

Anexo D: TRÁMITES ADMINISTRATIVOS.

Anexo E: ASPECTOS AMBIENTALES Y DE SEGURIDAD.

Anexo F: FIGURAS DEL PROCESO.

Anexo G: CATÁLOGOS.

DOCUMENTO II: PLANOS

Plano P.1. DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA.

Plano P.2. ESQUEMA DEL PROCESO GENERAL.

Plano P.3. CONJUNTO REACTOR-CICLÓN.

Plano P.4. DETALLE DISTRIBUIDOR DE GAS.

Plano P.5. DETALLE CICLÓN.

DOCUMENTO III: PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES

Capítulo 1: OBJETO.

Capítulo 2: PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES DE LA OBRA.

DOCUMENTO IV: ANÁLISIS ECONÓMICO

4.1. INTRODUCCIÓN.

4.2. DATOS UNIDAD PIROLÍTICA PROYECTADA.

4.3. CASO 1.

4.4. CASO 2.

4.5. CASO 3.

4.6. COMPARATIVA ESTIMACIONES DE COSTE DEL PROYECTO.

DOCUMENTO I:

MEMORIA DESCRIPTIVA Y ANEXOS

INDICE

Capítulo 0: RESUMEN DEL PROYECTO

Capítulo 1: ANTECEDENTES

1.1. Los materiales plásticos.

1.2. La generación de residuos plásticos.

1.3. Planes de gestión de residuos plásticos.

1.4. Tecnologías de gestión de residuos plásticos.

Capítulo 2: OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

2.1. Objetivos

2.2. Justificación del proyecto.

Capítulo 3: UBICACIÓN DE LA PLANTA

Capítulo 4: DEFINICIÓN DEL PROYECTO

Capítulo 5: MARCO LEGAL APLICABLE

5.1. Normativa comunitaria

5.2. Normativa estatal

5.3. Normativa autonómica

5.4. Normativa local

5.5. Consideraciones sobre la ley RD 653/2003

Capítulo 6: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

6.1. Caracterización de materias primas.

6.2. Descripción del proceso global.

6.3. Descripción de la unidad pirolítica.

Capítulo 7: PRODUCTOS DEL PROCESO

Anexo A: CÁLCULOS.

A.1. CÁLCULOS PREVIOS.

A.2. DIMENSIONADO DEL REACTOR.

A.3. DIMENSIONADO DEL CICLÓN.

A.4. DIMENSIONADO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

Anexo B : ESTUDIO DE MERCADO.

Anexo C: MAPAS DE LOCALIZACIÓN.

Anexo D: TRÁMITES ADMINISTRATIVOS.

Anexo E: ASPECTOS AMBIENTALES Y DE SEGURIDAD.

Anexo F: FIGURAS DEL PROCESO.

Anexo G: CATÁLOGOS.

CAPÍTULO 0:

RESUMEN DEL PROYECTO

El objeto del presente proyecto es el dimensionado de la unidad pirolítica de una planta de valorización energética de residuos plásticos en Aznalcóllar (Sevilla). La unidad pirolítica está conformada por el reactor de lecho fluidizado, un ciclón y un intercambiador de calor de carcasa y tubos. Ésta a su vez forma parte de una planta IPCC (Pirólisis Integrada con Ciclo Combinado).

La pirólisis, llamada también termólisis, craqueo térmico o depolimerización térmica, consiste en la descomposición térmica de las sustancias orgánicas en ausencia de oxígeno, o de cantidades suficientemente pequeñas como para que no se produzcan combustiones significativas. Este tratamiento se realiza a una temperatura relativamente baja comparada con los otros tratamientos térmicos de gasificación o incineración, estando comprendida aproximadamente entre 400 y 750 ºC. La temperatura de diseño del proceso es de 740º C.

La planta se va a instalar en la provincia de Sevilla, y el radio de acción engloba la propia provincia y las colindantes, conformando Andalucía Occidental: Sevilla, Huelva y Cádiz. Esto ha sido fruto de un estudio de mercado donde se ha tenido en cuenta la competencia, la disponibilidad de la materia prima y los clientes potenciales.

La materia prima empleada es cualquier residuo plástico de procedencia urbana, industrial, agrícola, construcción, automoción, etc. El tipo de residuos plásticos que se trata es fundamentalmente de PEAD y PEBD, aunque también puede añadirse cualquier otro sintetizado por adición (al ser este grupo susceptible de craquearse térmicamente) como son otras poliolefinas (PP), o resinas vinílicas (PVC). Para este último plástico habría que incorporar una etapa de separación del ácido clorhídrico posterior a la pirólisis para así evitar la formación de dioxinas en caso de cogeneración (por ejemplo con un scrubber).

La materia prima es suministrada fundamentalmente por dos fuentes: las primeras son las llamadas “plantas de transferencia de residuos”, donde se valorizan los residuos plásticos mediante separación y clasificación a partir de los residuos urbanos y los asimilables a urbanos. La otra fuente son los centros de acopio de los residuos plásticos agrícolas, repartidos por la geografía agroindustrial andaluza. Existen otros posibles proveedores de residuos plásticos, los procedentes de la construcción y de la industria automovilística.

En la etapa de pretratamiento, debido a que los residuos plásticos pueden proceder de cultivos con pesticidas y productos químicos así como traer gran cantidad de tierra o sustancias orgánicas que en la pirólisis generen sustancias tóxicas o peligrosas, es preferible realizarles un triturado, lavado y secado para conseguir una alimentación uniforme y sin contaminantes.

La unidad de pirólisis tiene una capacidad de trabajo de 15.000 t./año de residuos plásticos, con una disponibilidad de 343 días/año. El caudal másico de entrada al reactor es de 1,82 t./h de residuos plásticos de polietileno, el cual entra en un reactor de lecho fuidizado a 740º C gracias al aporte externo de 1.105,6 kW del horno. El reactor tiene 1,16 metros de ancho y 5,8 metros de alto, con un distribuidor de gas de 21 boquillas.

El reactor trabaja en régimen de transición, con un arrastre del lecho de arena a razón de 2,44 t/h, la cual es recirculada gracias a un ciclón de 1,05 metros de diámetro y un largo de 3,2 metros.

En la etapa de postratamiento se separan gases de líquidos pirolíticos, para así poder obtener energía eléctrica de los gases mediante cogeneración, y aceites pirolíticos condensados. Así, según las condiciones del mercado vender los productos resultantes como electricidad, combustibles o materia prima para fabricación de otros productos.

El gas de pirólisis que no es recirculado tiene un caudal de 1,82 t./h, el cual entra en un intercambiador de calor de carcasa y tubos de 3,37 m^2 a unos 740º C y sale a 375º C, gracias a un coeficiente global de intercambio de 469,6 w/m·K convierte en vapor a 170º C una corriente de agua a 25º C con un caudal de 51,74 kmol/h mediante el aporte de 693,26 kW.

La energía eléctrica generada en la planta se puede vender a los clientes que la soliciten mediante su distribución por la red. Los productos combustibles generados (aceites pirolíticos) también pueden ser comercializados a plantas de cogeneración para sustituir al gas natural o petroquímicas como materia prima.

Se incluye en el proyecto un anexo con los trámites administrativos a seguir a la hora de instalar la planta, así como posibles formas de obtener subvenciones y ayudas de organismos públicos y privados.

La actividad genera puestos de trabajo directos en la planta, e indirectos en servicios auxiliares (proveedores, transportistas, comerciales), contribuyendo con ello a levantar la economía de la zona con una tecnología novedosa y apoyada por la normativa europea y española a través de incentivos y subvenciones.

Aunque la actividad de la empresa se encuadre dentro de la actividad de gestión de residuos, es inevitable que genere algunos impactos ambientales. Estos son las emisiones atmosféricas procedentes en mayor parte del proceso de cogeneración y el horno que calienta al reactor, aguas residuales industriales procedentes de la etapa del lavado de los plásticos, cenizas procedentes del reactor de pirólisis, lodos del tratamiento de aguas residuales en la depuradora y residuos peligrosos con restos de hidrocarburos en menor cantidad.

Para la identificación de dichos aspectos ambientales se ha realizado un estudio de impactos ambientales, y se han establecido medidas correctoras así como se han considerado situaciones de emergencia.

La actividad está fuertemente ligada a la normativa de incineración 653/2003, de forma que en algunos aspectos es perjudicada en algunos aspectos fruto de no considerar esta tecnología lo suficiente a la hora de elaborar la normativa.

Para la estimación de costes, se ha empleado el protocolo de la empresa consultora Harris, para una estimación global del proceso único de pirólisis a partir de otros casos previos, y utilizando exponentes de costes anuales y de capacidad. De esta forma, se obtiene un valor medio del Coste Total de Inversión del Proyecto de unos 5.299.604 € y un coste Total de Operaciones de 3.057.274 €/año.

CAPÍTULO 1:

ANTECEDENTES

Indice:

1.1. Los materiales plásticos.
- 1.1.1. Breve historia de los materiales plásticos……pág. 1
- 1.1.2. Síntesis de materiales plásticos……pág. 2
- 1.1.3. Tipos de materiales plásticos……pág. 3
- 1.1.4. Propiedades de plásticos……pág. 8

1.2. La generación de residuos plásticos.
- 1.2.1. Problemática del residuo plástico……pág. 9
- 1.2.2. Vías de generación de residuos plásticos……pág. 11

1.3. Planes de gestión de residuos plásticos……..pág. 13
- 1.3.1. Directiva europea……..pág. 14
- 1.3.2. Planes nacionales……..pág. 14
- 1.3.3. A nivel autonómico……pág. 15
- 1.3.4. A nivel provincial……pág. 15

1.4. Tecnologías de gestión de residuos plásticos……pág. 16
- 1.4.1. Reciclaje mecánico (primario y secundario)…….pág. 18
- 1.4.2. Reciclaje terciario……..pág. 19
- 1.4.3. Valorización energética……pág. 22

1.1. Los materiales plásticos:

1.1.1. Breve historia de los materiales plásticos:

El plástico es un polímero versátil que se halla presente en estado natural en algunas sustancias vegetales y animales como el caucho, la madera o el cuero. Hoy día, se produce en la industria química mediante fenómenos de polimerización de monómeros orgánicos derivados del petróleo crudo y el gas natural para formar largas cadenas moleculares.

El primer *plástico* creado se originó como resultado de un concurso en 1860, cuando un fabricante estadounidense de bolas de billar ofreció una recompensa a quien consiguiera un sustituto del marfil natural. Una de las personas que compitió fue el inventor norteamericano John Wesley Hyatt, quien desarrolló el celuloide disolviendo celulosa (material de origen natural) en una solución de alcanfor y etanol. Hyatt no ganó el premio, pero consiguió un producto muy comercial que sería vital para el posterior desarrollo de la industria cinematográfica de finales de s XIX.

No fue hasta el siglo XX cuando la demanda de productos potenció el desarrollo y fabricación de materiales poliméricos. De esta forma, la invención del primer producto plástico se le atribuye a Leo Hendrik Baekeland, que vendió la baquelita como aislante eléctrico en 1909, tras el descubrimiento de una nueva materia prima, el alquitrán.

En las décadas de 1920 y 1930 comenzó la fabricación de plásticos a partir de derivados del petróleo. Staundinger introdujo el término macromolécula para describir los polímeros, lo cual dio un mejor entendimiento de los mismos e hizo posible el avance en la ciencia de los polímeros. En esta época se desarrollaron muchos materiales nuevos, como por ejemplo el nylon y el PVC.

En la década de los 40 se incorporaron otros como el polietileno, los poliésteres, los poliuretanos, las resinas epoxi, etc.

En la década de los 50 Karl Ziegler mejoró la fabricación del polietileno al descubrir que el etileno gas podía polimerizar en contacto con ciertos catalizadores a presión atmosférica. En la misma década Giulio Natta desarrolló el polipropileno usando semejantes catalizadores y ambos compartirían el premio Nobel de química en 1963.

En los años siguientes la investigación se dedicó a modificar los polímeros ya conocidos, la co-polimerización (polímeros con dos tipos de monómeros), la mezcla de polímeros y el uso de aditivos.

1.1.2. Síntesis de materiales plásticos:

Para conseguir una reacción de polimerización debe haber enlaces dobles en los monómeros. Estos compuestos insaturados reaccionan enlazándose a otros monómeros contiguos al aplicar energía térmica o radiante o en presencia de catalizadores. De los dobles enlaces surgen enlaces simples, que ya no son reactivos.

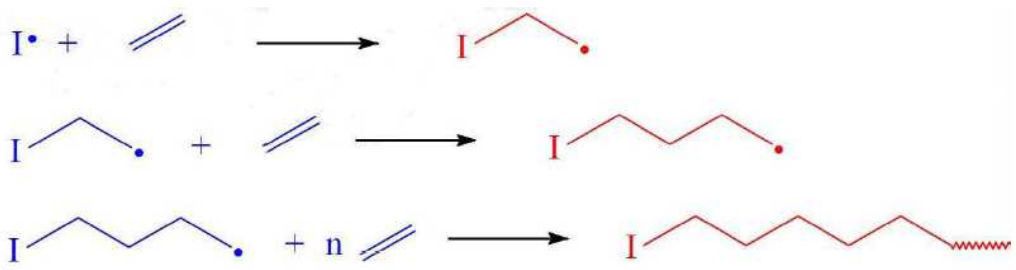


Figura 1 - Esquema de polimerización del etileno para obtención de polietileno.

La polimerización, una vez iniciada, continúa por sí sola con rapidez (reacción en cadena). Además, en este caso no varía ni el ordenamiento de los átomos ni la composición química porcentual; es lo que se llama un polímero isostático (estable y cristalino). Los sindiotácticos tienen cadenas ordenadas pero

alternadas y son menos estables y semicristalinos. Finalmente los atácticos tienen secuencia monomérica aleatoria y son fácilmente degradables.

La reacción entre dos tipos de monómeros distintos desemboca en la formación de copolímeros, que presentan propiedades distintas a las de los monómeros de los que proceden y permiten por tanto nuevas aplicaciones.

Hay dos tipos de reacciones de polimerización en la obtención de plásticos:

a) Poliadición: es una reacción entre muchos monómeros; implica la ruptura de la unión de los monómeros para reagrupar así los grupos reactivos y producir finalmente una cadena (polímero). La migración de los átomos altera su ordenamiento. Este es el caso del polietileno, cuya reacción de polimerización se simplifica así:

$$2n\ H_2C{=}CH_2 \rightarrow [\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}]_n$$

b) Policondensación: es la reacción química entre grupos funcionales reactivos de muchos monómeros normalmente para obtener polímeros, pero con una formación lateral de moléculas pequeñas que se segregan de la cadena. Sufren por tanto cambios en el ordenamiento de los átomos. Debe tener, por lo menos, dos grupos reactivos por monómero para darle continuidad a la cadena.

1.1.3. Tipos de Plástico:

a) Según su comportamiento termo-mecánico:

a.1. Termoestables: son plásticos que una vez que han sufrido el proceso de calentamiento-fusión y formación-solidificación se convierten en materiales rígidos que no vuelven a fundirse, sino que se incendian, al obtenerse por reticulación (entrecruzamiento) de productos previos líquidos o viscosos de

bajo peso molecular. La reacción de reticulación se activa rápidamente con la adición de agentes reticulantes y normalmente necesitan aporte de calor. Por esto no pueden reciclarse. Algunos ejemplos son los polímeros del fenol, las resinas epoxi y melamínicas, la baquelita y los aminoplásticos.

a.2. Termoplásticos: son plásticos que una vez conformados, cada vez que son sometidos a calor se ablandan y fluyen pero si se enfrían vuelven al estado vítreo, variando su cristalinidad. Son moldeables por el calor cuantas veces se quiera sin que sufran alteración química irreversible gracias a que poseen cadenas asociadas por medio de débiles fuerzas Van der Waals (polietileno); fuertes interacciones dipolo-dipolo y enlace de hidrógeno; o incluso anillos aromáticos apilados (poliestireno) en estructuras lineales poco ramificadas. Sus propiedades son flexibilidad y resistencia. Se pueden reciclar. Algunos tipos de termoplásticos son las poliolefinas (polietileno, polipropileno), las resinas vinílicas (PVC), los poliésteres y los poliestirenos.

a.3. Elastómeros: de consistencia elástica y gomosa, son las variantes sintéticas de la goma. Su comportamiento se debe a que sus moléculas no son filamentosas, sino que están enlazadas entre sí formando una tupida malla tridimensional. No son reciclables.

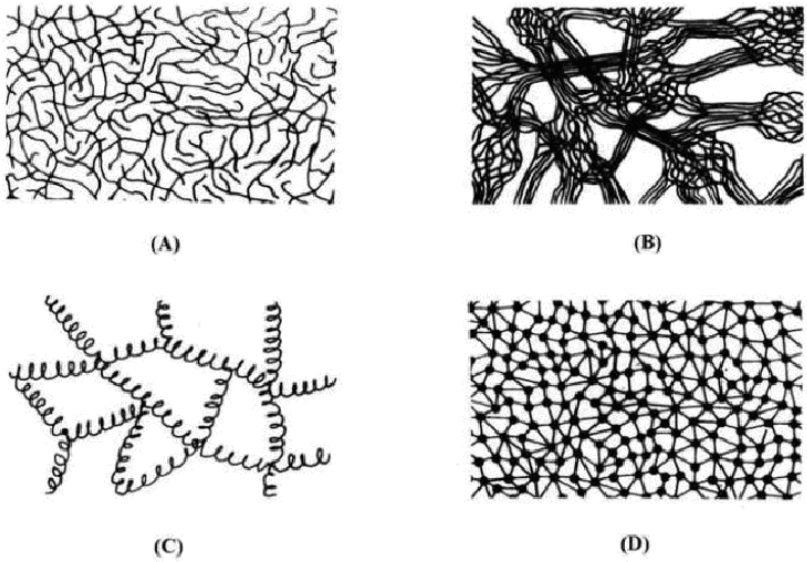


Figura 2 - Modelos estructurales de los plásticos: (A) Termoplástico amorfo; (B) Termoplástico semicristalino; (C) Elastómero; (D) Termoestable.

b) Según su aplicación:

b.1. Plásticos estándar o de uso general: aquí se encuentran los termoplásticos de producción “masiva”. Su diversidad y rango de aplicación en el mercado ha llevado a crear una variada tipología para identificarles. La señal que indica que puede reciclarse de alguna forma (el anillo o círculo de Möbius) contiene un número y unas letras que señalan el tipo de material. Así, un consumidor puede encontrarse en el mercado símbolos como los siguientes:

Termoplásticos			Aplicaciones	Usos después del reciclado
Polietileno tereftalato	PET		Botellas, envasado de productos alimenticios, moquetas, refuerzos neumaticos de coches.	Textiles para bolsas, lonas y velas náuticas, cuerdas, hilos
Polietileno alta densidad	PEAD		Botellas para productos alimenticios,detergentes, contendores, juguetes, bolsas, embalajes y film, laminas y tuberias.	Bolsas industriales, botellas detergentes, contendores, tubos
Polietileno de baja densidad	PEBD		Film adhesivo, Bolsas, revestimientos de cubos, recubrimiento contendores flexibles,tuberias para riego,	Bolsas para residuos, e industriales, tubos, contenedores, film uso agricola, vallado
Policloruro de vinilo	PVC		Marcos de ventanas, tuberias rígidas, revestimientos para suelos, botellas, cables aislantes, tarjetas de crédito,productos de uso sanitario,	Muebles de jardin, tuberias, vallas, contendores
Polipropileno	PP		Envases para productos alimenticios,Cajas, tapones, piezas de automoviles, alfombras y componentes eléctricos.	Cajas multiples para transporte de envases, sillas, textiles
Poliestireno	PS		Botellas, vasos de yogures, recubrimientos	Aislamiento térmico, cubos de basura, accesorios oficina

Tabla 1 - Clasificación de los plásticos reciclables más famosos.

1. El PET o PETE: es el plástico típico de envases de alimentos y bebidas, gracias a que es ligero y no es caro. En su síntesis se emplean sustancias tóxicas y metales pesados como catalizadores, no obstante el PET no daña la salud, ni el ambiente y por ello se recicla.

2. Las poliolefinas: PEAD, PEBD y PP. son versátiles y baratas. Se fabrican con etileno y propileno, son los más abundantes y de mayor reciclado.

   - El PEAD gracias a su versatilidad y resistencia química se utiliza sobre todo en envases, en productos de limpieza de hogar o químicos industriales.
   - El PEBD es fuerte, flexible y transparente y se usa sobre todo en películas y film.
   - El PP tiene un alto punto de fusión, lo cual lo hace ideal para envases con líquidos o alimentos calientes.

3. Los vinílicos: PVC. Muy resistente, es el único termoplástico que contiene cloro, contaminante ambiental durante su ciclo útil y de disposición final. Su reciclaje es difícil y su incineración produce dioxinas, por lo que es preferible usar otros materiales.

4. El PS: usado en platos y vasos de usar y tirar, hueveras, bandejas de carne, envases de aspirina, cajas de CD, etc. Su bajo punto de fusión hace posible que pueda derretirse en contacto con el calor. Su síntesis se realiza con compuestos químicos cancerígenos: benceno, estireno y 1,3-butadieno. Su incineración libera estireno y otros hidrocarburos tóxicos. Técnicamente el PS, se recicla pero el porcentaje de recuperación es bajo.

b.2. Plásticos especiales: por las exigencias de los consumidores, los fabricantes y transformadores de plásticos pueden añadirles aditivos o modificarlos químicamente y físicamente para que así adquieran propiedades concretas en grado extraordinario. Así, por ejemplo, el polimetilmetacrilato (PMMA) posee una excelente transparencia y estabilidad a la luz, y el politetrafluoroetileno (PTFE) tiene una gran resistencia térmica y química, etc.

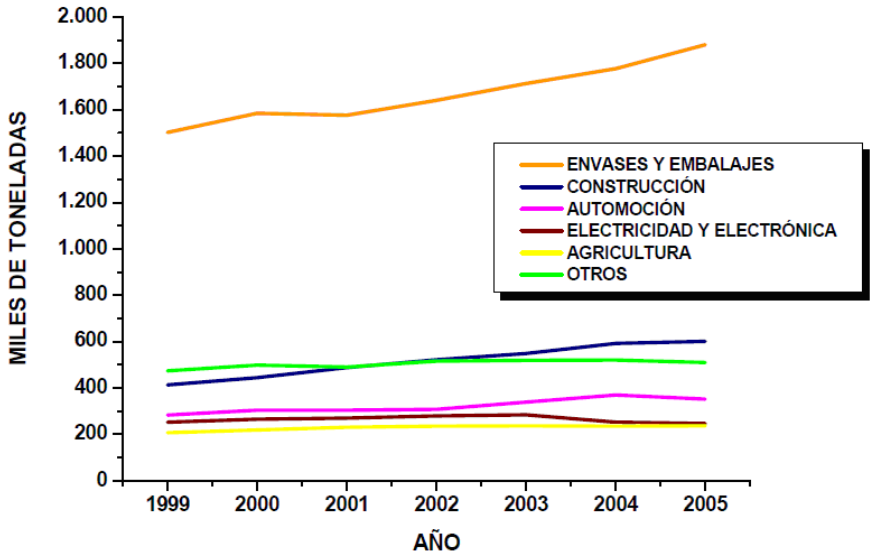
- Plásticos técnicos: específicos para determinadas aplicaciones que han de reunir unas características concretas, como deformación mínima cuando soportan solicitación constante, buena resistencia al impacto, poca dilatación térmica, escasa contracción, etc. En este grupo se incluyen las poliamidas (PA), policarbonato (PC), etc.
- Plásticos de altas prestaciones: termoplásticos con buena resistencia mecánica más allá de los 150°C, o con resistencias muy elevadas para los plásticos (debidas al especial ordenamiento estructural de los mismos). Ejemplos de este tipo de plásticos son las polieteretercetonas (PEEK), las polietercetonas (PEK), las polimidas (PI) o las polisulfonas (PU).

1.1.4. Propiedades de los plásticos:

El valor que poseen los materiales plásticos en la economía mundial se debe a sus propiedades fisicoquímicas, mejores que las de los materiales naturales:

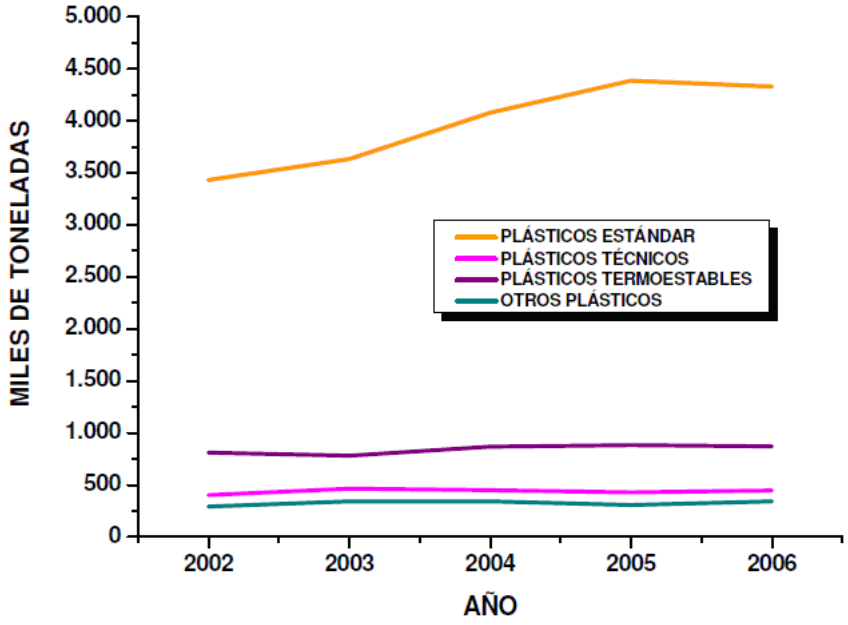
- Son fáciles de trabajar: elásticos, maleables, dúctiles.
- Tienen una baja densidad.
- Existen materiales plásticos permeables e impermeables.
- Son aislantes eléctricos y térmicos, aunque la mayoría no resisten temperaturas muy elevadas.
- Son resistentes a la corrosión y a su exposición a la intemperie.
- Son resistentes a diversos factores químicos y mecánicos.

Estas propiedades hacen del plástico una materia prima adecuada en aplicaciones como ingeniería o en la fabricación de objetos diversos, de los cuales los más famosos son los envases y embalajes.



Gráfica 1 - Principales aplicaciones de los plásticos reciclados en España. Centro español de plásticos.

Su éxito se ha debido a las ventajas que ofrecen al consumidor: poco peso, facilidad de manejo, excelente protección al producto envasado, variedad de diseño, etc.



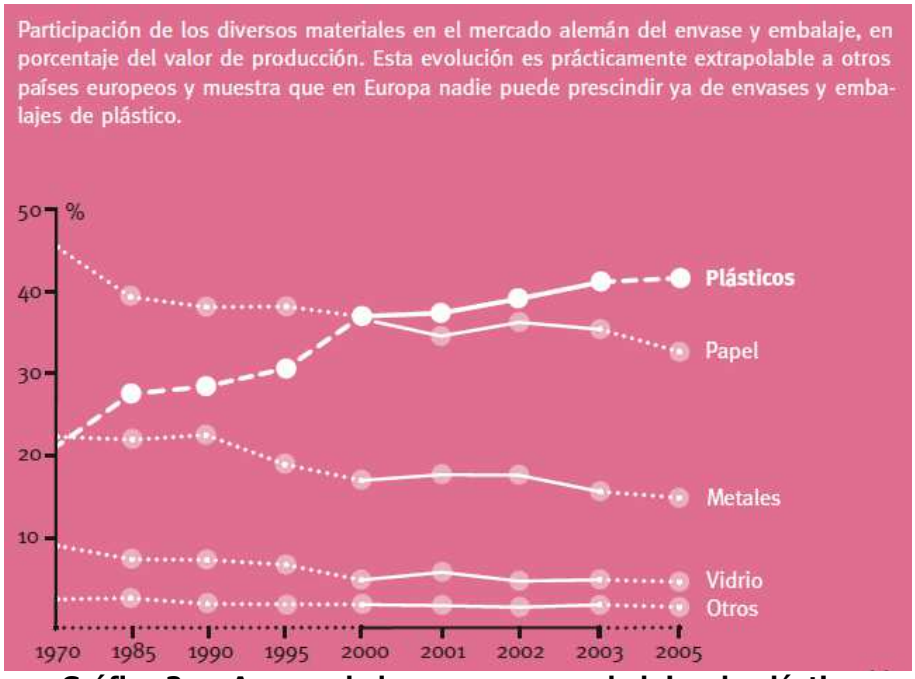
Gráfica 2 - Consumo aparente de plásticos por familias en España. Centro español de plásticos.

1.2. La generación de residuos plásticos:

1.2.1. Problemática del residuo plástico:

El desarrollo industrial y los patrones de producción actuales han llevado a la sociedad mundial a adoptar un tipo de consumo masivo de productos de vida útil muy corta. El consumo anual de materiales plásticos en el mundo ha incrementado desde unos 5 millones de toneladas en los años 50 hasta casi 100 millones de toneladas en la actualidad. Eso significa unas 20 veces más de plástico producido. En los países en desarrollo el aumento es aún mayor, pues la rápida urbanización y la economía lo favorecen.

Esto ha ocasionado que a lo largo de los últimos años la generación de residuos esté en constante crecimiento. Los materiales plásticos, por su versatilidad y gran número de aplicaciones además de por su baja densidad y bajo coste, han sido la familia de materiales más utilizado en sectores de gran consumo como el del envase y embalaje.



Gráfica 3 - Avance de los envases y embalajes de plástico. PlasticsEurope.

La ingente producción de productos plásticos implica por un lado que se están consumiendo más recursos para abastecer las demandas de plástico, y por otro que se está generando una cantidad muy grande de residuos plásticos dentro del volumen de residuos sólidos urbanos (RSU). Después de la fracción orgánica y el papel, el residuo plástico es el mayor constituyente en los RSU y RSI en las ciudades. Incluso ciudades de bajo crecimiento económico se incrementan las cantidades de residuos plásticos debido al empaquetamiento, bolsas de plástico, botellas y otros bienes y aplicaciones.

Este incremento se ha convertido en un reto para las autoridades responsables de la gestión de los RSU (Fuente ANARPLA, del año 1997 al 2003 el aumento de residuos plásticos en España ha sido del 36,4 %).

Además, al convertirse en un residuo, muchas de las ventajas de los materiales plásticos se convierten en problemas:

- Alta resistencia a la degradación: la mayoría de los plásticos actuales no son biodegradables y poseen una gran resistencia química. Esto implica que ocupan los vertederos más tiempo y éstos disminuyen su capacidad de recepción de residuos, de forma que los plásticos representan más del 25% de los residuos sólidos acumulados en ellos.
- Poseen una baja densidad: es un material muy ligero, pero luego es una tarea costosa y compleja la recolección y transporte de los residuos plásticos, ya que a la cantidad de envases se le debe sumar el volumen que representan.
- Contienen gran cantidad de aditivos: algunos hasta pueden tener sustancias tóxicas como el PVC, resultado de añadir al monómero de vinilo aditivos como son estabilizantes, plastificantes, colorantes, biocidas que contienen metales pesados y que se acumulan en las cadenas tróficas y son prácticamente imposibles de eliminar. El principal problema del PVC es que si es incinerado emite dioxinas, sustancias altamente tóxicas que producen graves efectos sobre la salud y el medio ambiente y hay que instalar filtros costosos para evitarlo.

1.2.2. Vías de generación de los residuos plásticos:

a) Residuos pre-consumo o del sector productivo: desperdicios plásticos que quedan al pie de las máquinas de conformado en las industrias (recortes o scraps). Son más fáciles de reciclar al estar limpios y homogéneos en su composición, sin mezclarse con otros tipos de plásticos, pero son más escasos debido a la calidad de limpieza y características de los mismos. Generalmente consisten en artículos que no cumplen con los requisitos de calidad, como las mermas ocasionadas por arranques y paros, productos defectuosos, coladas, barreduras, etc.

b) Residuos post-consumo o del sector mercado. Proceden sobre todo de:

- Centros comerciales: los distintos productos que una vez utilizados se desechan. Por ejemplo películas plásticas, ganchos, etc.
- Los residuos sólidos urbanos (RSU): son los más contaminados y difíciles de separar y lavar, ya que surgen de la basura. Los plásticos contenidos en los RSU son mayoritariamente polietileno (PE) y polipropileno (PP). Estos plásticos se pueden encontrar en tres estados:

  - Residuos plásticos de tipo simple: han sido clasificados y separados en balas según su clase. Esta tarea se hace en plantas de transferencia, ya están valorizados y se pueden vender para su reciclaje.
  - Residuos mixtos: los diferentes tipos de plásticos se hallan mezclados entre sí. Provienen de los contenedores de envases en las ciudades. Tienen una valorización menor.
  - Residuos plásticos mixtos combinados con otros residuos: papel, cartón, metales. Se encuentran en los contenedores de materia orgánica u “otros residuos”. No tienen valorización.

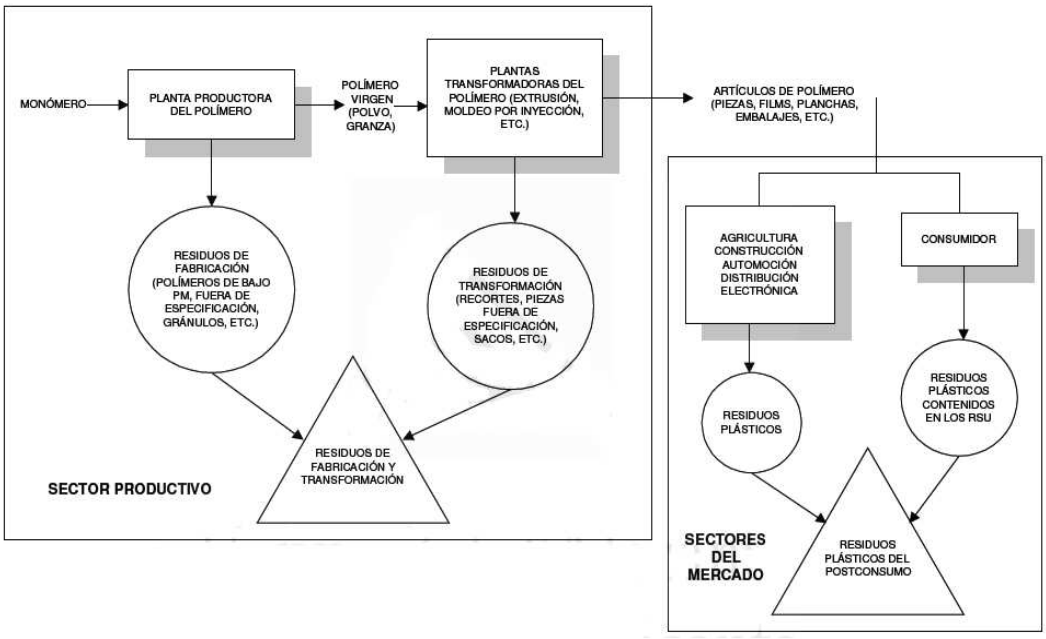
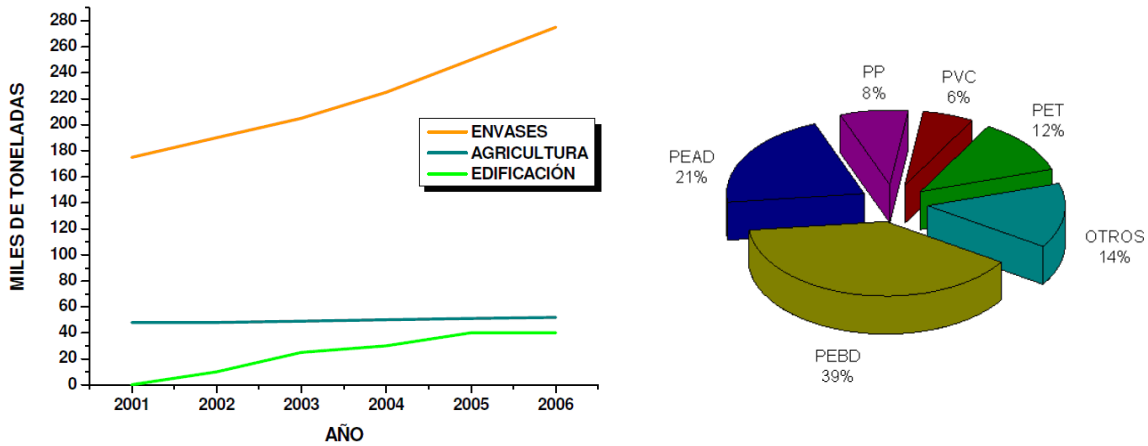


Figura 3 - Vías de generación de residuos plásticos (González Sánchez y col., 1997).

1.3. Planes de gestión de residuos plásticos:

Antes de que surgiera cualquier legislación encargada de regular la gestión de los residuos lo que se hacía en el pasado era simplemente eliminarlos mediante el vertido incontrolado o su quema, con la consecuente pérdida de materia prima y los daños producidos a los medios hídricos-atmosféricos que transportan y reparten los contaminantes más rápido y hacen que sus efectos sean mayores.

Ante la necesidad de métodos alternativos para que el consumo de plásticos fuera compatible con el desarrollo y se evitaran pérdidas de materias primas y problemas medio-ambientales, las autoridades se vieron obligadas a fomentar la gestión de residuos. La evolución experimentada en los últimos años muestra que el reciclaje de los plásticos ha estado marcado por dos hitos clave en sus inicios: el Sistema del Punto Verde iniciado en 1998 y la Directiva Europea 94/62/CE de Envases y Residuos de Envases con objetivos de reciclado que debían cumplirse en 2001. Ambos factores han motivado que el crecimiento anual del reciclaje haya sido espectacular, permitiendo alcanzar, e incluso superar, dichos objetivos.



Gráficas 4 y 5 - Evolución del reciclaje de residuos plásticos por sectores en España (Centro español de plásticos), y principales plásticos reciclados en España en 2005.

ANARPLA.

Otras leyes que han ido surgiendo a partir de entonces son:

1.3.1. Directiva Europea: la gestión de los residuos plásticos actual surge de las políticas ambientales de la Unión Europea, a través de sus Directivas. Por ejemplo, la *Directiva 2008/98 CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008:* esta directiva es la que dictamina la necesidad de la creación de planes de gestión de residuos para los Estados Miembros, que en Agosto de 2011 se traspuso en España**.** La síntesis general es que con el fin de proteger mejor el medio ambiente, los Estados miembros deberán adoptar medidas para tratar los residuos de conformidad con una jerarquización piramidal:

- Prevención: evitar generar el residuo es lo más eficiente.
- Reutilización: volver a utilizar un producto para un mismo fín.
- Reciclaje: volver a utilizar la materia prima de un producto desechado.
- Valorización energética: aprovechar la energía de un desecho.
- Eliminación por vertedero.

1.3.2. Planes Nacionales: las Directivas Europeas se han ido trasponiendo a todos los Estados Miembros en su propia legislación, y en España se han llevado a cabo planes Nacionales Directores desarrollados por el Estado, las Comunidades Autónomas y Diputaciones provinciales. El último es el *Plan Nacional Integrado de Residuos. 2007-2015.* Los objetivos principales son:

- El enfoque del problema de los residuos en un marco más amplio, lo cual incluye la política de ahorro de recursos, el desarrollo sostenible y la política integrada de producto.

- El desacople del paralelismo que se ha dado hasta ahora entre el crecimiento económico y la generación de residuos.
- El principio de jerarquía. Tras la prevención, el orden de prioridad en las modalidades de gestión es el visto antes: reutilización, reciclaje, valorización energética y eliminación.
- Impulso a la innovación tecnológica para reducir la generación de residuos y para mejorar las tecnologías para su tratamiento.
- Búsqueda de nuevos posibles usos de los materiales procedentes de los residuos urbanos. Creación e impulso de los mercados secundarios de estos materiales.

1.3.3. A Nivel Autonómico: El II Plan Director de Residuos no peligrosos de Andalucía 2010-2019. Este plan afecta directamente al periodo en que se ubica este proyecto. Los objetivos de este plan son:

- Reducir la producción de residuos en origen.
- Asegurar su correcta gestión con costes homogéneos en todo el territorio.
- Favorecer las innovaciones tecnológicas para el aprovechamiento de las fracciones valorizables, así como mejorar las actuales instalaciones y los sistemas de recogida selectiva.

1.3.4. A Nivel Provincial: Plan Provincial de Prevención y Gestión de Residuos Industriales No Peligrosos de Cádiz*.* Los objetivos son:

- Alcanzar un conocimiento cuantitativo completo acerca de las cantidades y características de los residuos no peligrosos generados en la provincia, logrando datos estadísticos fiables y reales tanto de producción como de gestión de residuos no peligrosos.
- Reducir la cantidad generada de estos residuos, siendo éste el objetivo de mayor interés.

- Conformar una red provincial completa e integrada de instalaciones de gestión de residuos, basada en la jerarquía de opciones de tratamiento, que permita llenar el déficit de instalaciones de la provincia en cuanto a empresas gestoras y propicie la legalización de las empresas no autorizadas.
- Coordinar las actuaciones de las distintas administraciones y organismos en la provincia, desarrollando medios de investigación y control que permitan la mejora continua en la minimización y gestión de residuos no peligrosos.

1.4. Tecnologías de gestión de residuos plásticos:

Los métodos de gestión de residuos plásticos para volver a obtener un recurso depende del tipo o tipos de plásticos que sean considerados como materia prima, ya que su composición puede ser muy diferente y algunos pueden contener aditivos indeseables que perjudiquen su tratamiento o la aplicación posterior de los productos. Esto repercutirá en las operaciones de pretratamiento, la temperatura de operación y por tanto el consumo de energía necesario, la calidad del producto, la composición de los gases de su posible combustión (formación de NO_x y HCl), la composición de las cenizas o la posible corrosión de los equipos

Se evalúa a continuación el estado del arte de las tecnologías de gestión de residuos plásticos. Siempre va a ser necesaria una etapa de transformación física o mecánica para limpiar y reducir mediante trituración/molienda la granulometría, lo cual facilita su homogeneización en el tratamiento. En estos procesos los residuos plásticos son convertidos normalmente en tres tipos de productos:

- Energía eléctrica o térmica (tecnología waste-to-energy, WTE).
- Gases de hidrocarburos. Este puede a su vez convertirse en un líquido de hidrocarburos (tecnología gas-to-liquids, GTL).

- Líquido de hidrocarburos.

Estos dos últimos productos pueden a su vez emplearse para producir energía eléctrica, como combustibles o como materia prima para producir otros productos químicos.

TIPO DE GESTIÓN	TECNOLOGÍA				MATERIA PRIMA	DESCRIPCION	PRODUCTOS	APLICACIONES
Reciclaje Energético	Térmica	Incineración con recuperación			Plásticos	Combustión total de componentes. De 900 a 1200º C.	Calor	Electricidad
		Pirólisis			Plásticos de adición	Rotura molecular por craqueo térmico en ausencia de oxígeno. De 250 a 700º C.	Gases, líquidos y sólidos de pirólisis	Electricidad, combustible, productos químicos
		Gasificación			Plásticos	Combustión parcial de componentes. Usa aire, oxígeno o vapor. De 800 a 1100º C.	Syngas ($CO+H_2$)	
		Gasificación y plasma				Generador de Plasma por Arco Eléctrico. Unos 3000º C.	Syngas limpio	
		Hidrogenación				Las cadenas poliméricas son tratadas con H_2 y calor.	Líquido de hidrocarburos	Productos Químicos
	Termoquímica	Pirólisis catalítica			Plásticos de adición	Uso de compuestos que disminuye la temperatura de reacción y orienta el craqueo a un rendimiento concreto.	Gases, líquidos y sólidos específicos	Combustibles y productos químicos
		Oxidación catalítica			Plásticos	Uso de compuestos que disminuye la temperatura de reacción y las emisiones.	Calor	Electricidad
	Química	Solvólisis	Metanólisis		Plásticos de condensación	Rotura de la estructura química del plástico con disolventes	Metano	Productos químicos
			Hidrólisis				Hidrógeno	
			Glicólisis				Glicol	
		Catálisis	Hidrogenación catalítica		Plásticos	Empleo de catalizadores que favorecen una reacción concreta, aumentando el rendimiento de los productos de dicha reacción	Líquidos de hidrocarburos	
			Catálisis del syngas de gasificación	Metanol	Syngas		Metanol	Combustible
				Fischer-Tropsch			Olefinas y parafinas	
				Mezcla alcoholes			Etanol y otros	
			Catálisis de los gases de pirólisis		Gases pirolíticos		Compuestos específicos	Combustible y productos químicos
			Catálisis de liquidos pirolíticos		Líquidos pirolíticos			
	Termo mecánica	Extrusión, Inyección			Plásticos	Fundición de los plásticos mezclados con granza virgen para inyectarlos en moldes	Objetos de calidad similar o inferior al plástico original	Envases no alimentarios
Reciclaje mecánico								

Tabla 2 - Tecnologías de gestión de residuos plásticos.

La siguiente figura resume las diferentes posibilidades de gestión de los residuos plásticos mostradas en la tabla anterior:

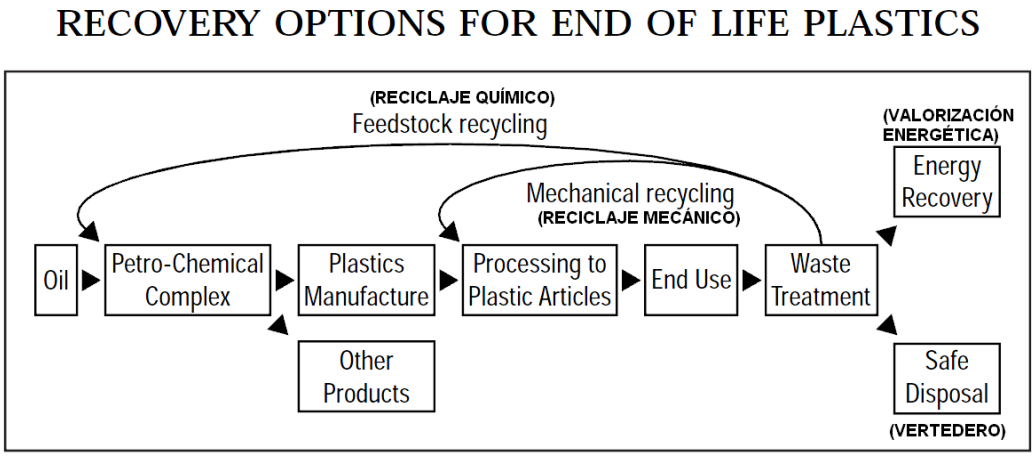


Figura 4 - Esquema de formas de gestión de residuos plásticos. APME.

El reciclaje de residuos plásticos consiste en obtener nuevos productos a partir de ellos, o recuperar los monómeros iniciales para que puedan introducirse de nuevo en el sistema productivo. El reciclaje no será eficiente si no se cumplen sus cuatro condiciones básicas: recolección, selección, procesamiento y mercado para el producto reciclado. En esta línea, existen tres tipos de reciclaje de plásticos: mecánico (primario y secundario), y el terciario (químico y termoquímico):

1.4.1. Reciclaje mecánico:

a) Reciclaje mecánico primario: consiste en la conversión mediante fusión de desechos plásticos en artículos con propiedades idénticas a la del material original. El reciclaje primario se hace exclusivamente en termoplásticos, como PET, PEAD, PEBD, PP y PVC. Los plásticos a reciclar deben estar en buen estado, además de limpios y ser de una única clase (separados previamente), con los mismos aditivos y las mismas cargas. En el conformado se produce una pérdida de las

propiedades del plástico, por lo que se mezcla con granza de plástico virgen.

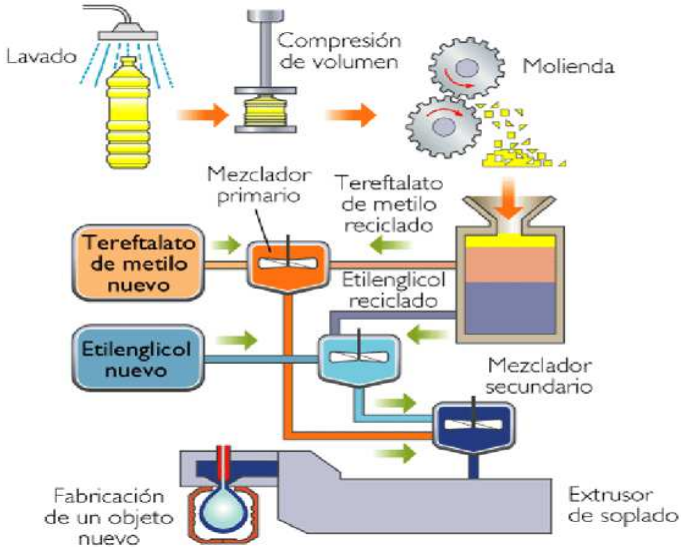


Figura 5 - Esquema reciclaje mecánico primario

b) Reciclaje secundario (mecánico): convierte mezclas de residuos plásticos en artículos con propiedades inferiores a las del polímero original. Aquí se elimina la necesidad de separar los plásticos. El producto suele ser madera plástica para construcción, agricultura, urbanismo, etc., como sustitutos de la madera o metales.

1.4.2. Reciclaje terciario:

El reciclaje mecánico es la alternativa más desarrollada para recuperar los residuos plásticos actualmente en España, pero existen otras opciones para alargar la vida de estos materiales a través de diferentes tipos de reacciones químicas. Estas opciones de recuperación se denominan reciclaje químico y termoquímico.

En el reciclaje terciario se produce la ruptura de la cadena del polímero para la obtención de componentes químicos elementales o monómeros, que luego son empleados como combustibles o transformados en otros productos derivados. Permite trabajar con plástico degradado o con mezclas de diferentes tipos. Una

gran ventaja es que minimiza el volumen y peso de los residuos y además los aprovecha.

a) Reciclaje químico (solvólisis): un disolvente actúa como reactivo. Los polímeros de condensación (PET; Poliamidas, PA; PC; Poliuretano, PUR) aceptan este tipo de reciclaje. Tienen grupos funcionales unidos por enlaces débiles que son susceptibles de disociación por ataque con determinados agentes químicos. Requiere altas cantidades, y se aplica a residuos plásticos separados por tipo de resinas. En función de la naturaleza del disolvente se distinguen distintas clases de solvolisis:

   - Hidrólisis: normalmente se realiza en medio básico (saponificación), lo que facilita el proceso, pero necesita una etapa de post-tratamiento para transformar el producto en monómeros utilizables. Este procedimiento permite tratar los desechos coloreados y mezclados.
   - Metanólisis: es un avanzado proceso de reciclaje que consiste en la aplicación de metanol en el PET. Este poliéster se descompone en sus moléculas básicas, incluidos el dimetiltereftalato y el etilenglicol, que pueden polimerizarse nuevamente para producir resina virgen.
   - Glicólisis: se realiza con etilenglicol y en condiciones menos severas que la metanolisis y la hidrólisis, lo que reduce los costes económicos, aunque es menos eficaz que ellas para el tratamiento de desechos coloreados y mezclados. Los productos de la reacción pueden utilizarse para recuperar PET o como precursores de espumas de poliuretano o poliésteres insaturados.

b) Reciclaje termoquímico: los polímeros de adición (PE; PP; PVC; PS; Polimetilmetacrilato, PMMA) se tratan principalmente con este reciclaje. Hay varios tipos de proceso termoquímico en función del producto obtenido.

- Despolimerización térmica: agrupa las tecnologías que permiten la transformación de los polímeros en monómeros u oligómeros mediante aporte de calor, sin que un reactivo químico intervenga en las reacciones de ruptura de las cadenas. Incluye diversos procesos como:

  - Pirólisis o craqueo térmico: se lleva a cabo bajo condiciones de reacción severas (entre 450 y 750º C) y variados tiempos de residencia. Es necesario aportar grandes cantidades de calor para romper el enlace carbono-carbono al hacerse en ausencia de oxígeno. La ruptura de las cadenas tiene lugar a través de una reacción primaria con una velocidad suficiente. Además, se forman radicales a partir de reacciones secundarias menos selectivas que dificultan el control de esta reacción primaria. Normalmente, el producto de reacción es una mezcla heterogénea de hidrocarburos con una distribución muy amplia de tamaños moleculares. La proporción de hidrocarburos líquidos, gaseosos y sólidos es función de la temperatura a la que se desarrolla el proceso. Si se emplean catalizadores (pirólisis catalítica o craqueo catalítico) se favorecen los rendimientos de ciertos monómeros valiosos (etileno o propileno).

    Los principios de funcionamiento de la pirólisis se pueden dividir en dos grandes grupos: alotérmicos (aquellos cuya aportación de calor al proceso se lleva a cabo de forma externa utilizando un horno y como combustible la fracción gaseosa de la pirólisis), y autotérmicos (aquellos en los que la energía la proporciona la combustión de una parte de la carga dentro del propio reactor con una pequeña cantidad de aire).

  - Hidrogenación o hidrocraqueo: tratamiento térmico del residuo plástico en presencia de hidrógeno, normalmente a temperaturas moderadas (400-500º C), y elevadas presiones (10-100 kPa). En ellos se emplean catalizadores bifuncionales (con funciones de

craqueo e hidrogenación). Da lugar a la formación de productos altamente saturados que pueden usarse directamente como combustible o como materia prima en refinería. Permite el tratamiento de mezclas de plásticos y la obtención de hidrocarburos líquidos con rendimientos cercanos al 85 %. Sin embargo, el uso de hidrógeno a altas presiones y temperaturas resulta costoso y requiere medidas de seguridad especiales.

- Gasificación: lleva implícita una combustión en condiciones de defecto de oxígeno, con producción de un gas de síntesis formado por monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno y metano en proporciones diversas según la composición de la materia prima y las condiciones del proceso.

  Ya se conocía desde los años veinte, pero ha recibido en estos últimos años un gran impulso tecnológico debido a los éxitos cosechados durante las fases de experimentación en laboratorio o a escala de planta piloto. Este proceso puede utilizarse para la producción de electricidad, combustibles o materias primas para sintetizar otros compuestos químicos.

- Gasificación por plasma: un gas es puesto en contacto con un arco eléctrico formado a través de dos electrodos, formando un chorro de iones a gran temperatura que degrada prácticamente todo en lo que impacta a un gas de síntesis. El único problema es el coste de operación.

1.4.3. Valorización energética:

Los residuos plásticos y sus productos de reciclaje, al ser derivados del petróleo, poseen un elevado poder calorífico similar al del gas natural. La valorización energética es un proceso de recuperación del calor sensible contenido en los gases de combustión para producir un fluido térmico en

calderas y electricidad en turbinas. Ocurre a temperaturas entre los 800 y los 1200º C, en exceso de aire. Este procedimiento de recuperación está reservado para aquellas fracciones de residuos plásticos que no pueden ser tratadas por medio del reciclaje mecánico o químico. Este método es aconsejable en el caso de tener materiales plásticos deteriorados, sucios o mezclados con otros materiales difíciles de separar. Así el plástico, sin importar lo degradado que esté, reduce su volumen hasta dejar sólo cenizas para vertedero. En consecuencia, los residuos plásticos separados y pre-tratados se convierten en un recurso en sí mismo.

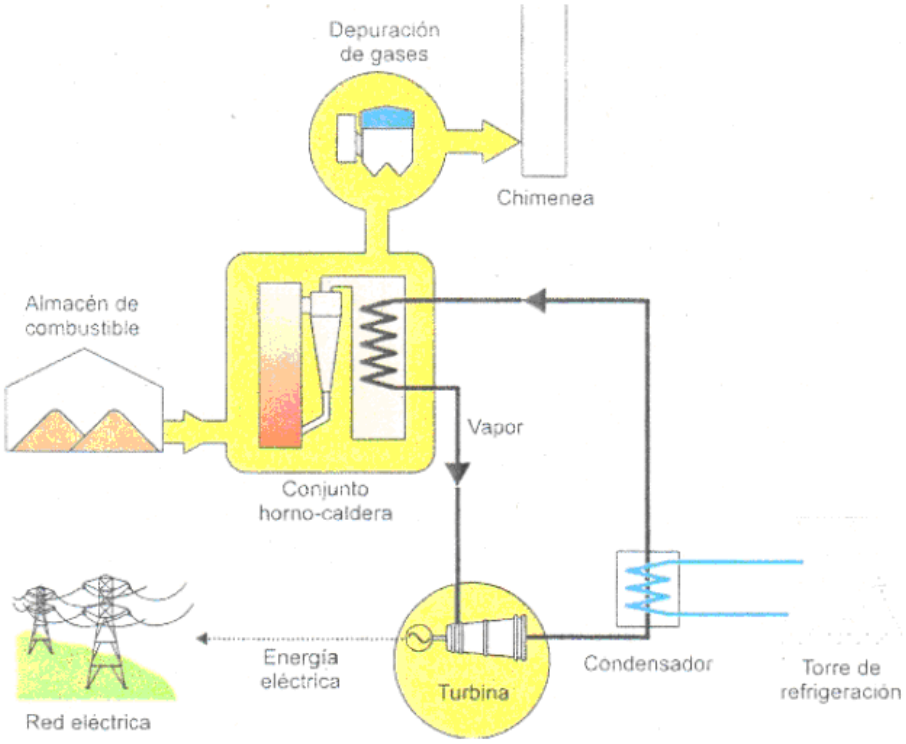


Figura 6 - Sistema de incineración con recuperación energética. SOGAMA.

Existe una gran relación entre los procesos de valorización energética y reciclaje termoquímico, de forma que la combinación de ambos puede dar lugar a un mayor aprovechamiento del producto obtenido.

	Pirólisis	Gasificación	Combustión
Temperatura de reacción (ºC)	250 – 700	500 – 1600	800 - 1450
Presión (bares)	1	1 – 45	1
Atmósfera	Inerte/nitrógeno	Agente de gasificación: O_2, H_20	Aire
Relación estequiométrica	0	<1	>1
Productos del proceso			
Fase gas:	H_2, CO, hidrocarburos, H_2O, N_2	H_2, CO, CO_2, CH_4, H_2O, N_2	CO_2, H_2O, O_2, N_2
Fase sólida:	Ceniza, coque	Escoria, ceniza	Ceniza, escoria
Fase líquida:	Aceite de pirólisis y agua		

Tabla 3 - Condiciones de reacción típicas y productos de los procesos de pirólisis, gasificación e incineración.

CAPÍTULO 2:

OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

Indice:

2.1. Objetivos……..pág. 1
2.2. Justificación del proyecto
2.2.1 Justificación legal…….pág. 2
2.2.2 Justificación tecnológica……..pág.
2.2.2.a. Tipo de residuo…….pág. 3
2.2.2.b. Tipo de residuo plástico a reciclar…….pág. 4
2.2.2.c. El proceso de transformación…….pág. 6
2.2.2.d. Tipo de reactor a emplear……..pág. 10
2.2.2.e. Reactores de lecho fluidizado……pág. 12
2.2.2.f. Tipo de intercambiador de calor……pág. 28
2.2.2.g. Tipo de separador gas-partícula……pág. 32
2.2.2.h. Ejemplos comerciales……pág. 37
2.2.3 Justificación económica……..pág. 40
2.2.4 Justificación ambiental……pág. 43

2.1. Objetivos:

Los objetivos que se persiguen con la implantación de la planta de valorización energética de residuos plásticos en Andalucía son:

- Cumplimiento de toda la normativa vigente vista en el capítulo 5 con respecto a la gestión de residuos plásticos en el contexto andaluz, español y europeo.

- Colaborar a la disminución del problema ambiental actual que implican los residuos plásticos. Los plásticos tienen una densidad muy baja, algunos contienen sustancias tóxicas y además poseen un periodo de degradación de hasta 400-500 años dependiendo de su tipología. A esto se le une que las sociedades modernas cada vez generan más residuos plásticos.

- Colaborar a la disminución de la dependencia del petróleo, materia prima primordial en la fabricación de plásticos. Algunas estimaciones indican que el petróleo empezará a escasear en un periodo estimado de 50 a 100 años, por lo cual es interesante colaborar para crear un camino en el reciclaje termoquímico de plásticos.

- Optimización de los recursos, ya que con el reciclado termoquímico además de crear energía eléctrica se recupera materia prima a partir de un residuo que aún es útil para la sociedad.

- Ahorro del gasto en la factura energética: valorizar energéticamente los residuos plásticos, los cuales poseen un poder calorífico similar al gas natural, implica un recorte en la factura eléctrica al poder ser un proceso auto-abastecido.

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

- Fomentar la implantación de una actividad y tecnología novedosa en Andalucía y en España, con lo que se ayuda a la entrada de empresas y servicios ligados a nuevas tecnologías sostenibles.

- Crear empleos directos, indirectos y riqueza en la región.

2.2. Justificación del proyecto:

2.2.1. Justificación legal:

La Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de Noviembre de 2008 sobre los residuos en su consideración (28) dice: "*La presente Directiva debe contribuir a ir transformando la UE en una «sociedad del reciclado», que trate de evitar la generación de residuos y que utilice los residuos como un recurso.*" En esa misma directiva, en su consideración (29) comenta "*Los Estados miembros deben apoyar el uso de reciclados… con arreglo a la jerarquía de residuos y con el objetivo de una sociedad del reciclado, y no deben apoyar el vertido o la incineración de dichos reciclados siempre que sea posible.*"

En base a esta normativa europea, en su trasposición a España y las Comunidades Autónomas a través de diversas leyes y decretos, se instará a la gestión obligatoria de los residuos, entre ellos los residuos plásticos.

Por otra parte, la Ley 7/2007 de fomento de las energías renovables y del ahorro y eficiencia energética de Andalucía establece pautas para reducir el consumo de formas de energía primarias a través de otras formas de energía renovables o de un ahorro y eficiencia energéticos. En este último apartado el uso de residuos plásticos tendría su aplicación.

2.2.2. Justificación tecnológica:

2.2.2.a. Tipo de residuo:

La Comisión Europea, a través del Centro Común de Investigación perteneciente al Instituto para Estudios Tecnológicos Prospectivos (JRC-IPTS) está llevando a cabo estudios para desarrollar propuestas de criterios “Fin de residuo” de una gran variedad de corrientes de residuos específicos.

La reciente Directiva Marco de Residuos (2008/98/EC) presenta un nuevo procedimiento para definir el criterio “Fin de Residuo”, donde se muestran los parámetros que una determinada corriente de residuo debe cumplir para dejar de serlo. Las corrientes de residuos susceptibles de lograr el estatus “Fin de Residuo” deben someterse a una operación de recuperación y cumplir con unos criterios concretos específicos y generales. Dichos criterios generales están definidos en el artículo 6 de dicha Directiva:

a) La sustancia u objeto es empleada comúnmente para un determinado propósito.
b) Existencia un mercado o una demanda para dicha sustancia u objeto.
c) La sustancia u objeto cumple con unos requisitos técnicos para el propósito específico referido en (a) y se adecúa a la actual legislación y estándares aplicables a los productos.
d) El uso de la sustancia u objeto no implicará un impacto adverso medioambiental o en la salud humana.

Como puede observarse, tras pasar los diferentes criterios, los residuos plásticos son susceptibles de gestionarse para abandonar su estatus de residuo.

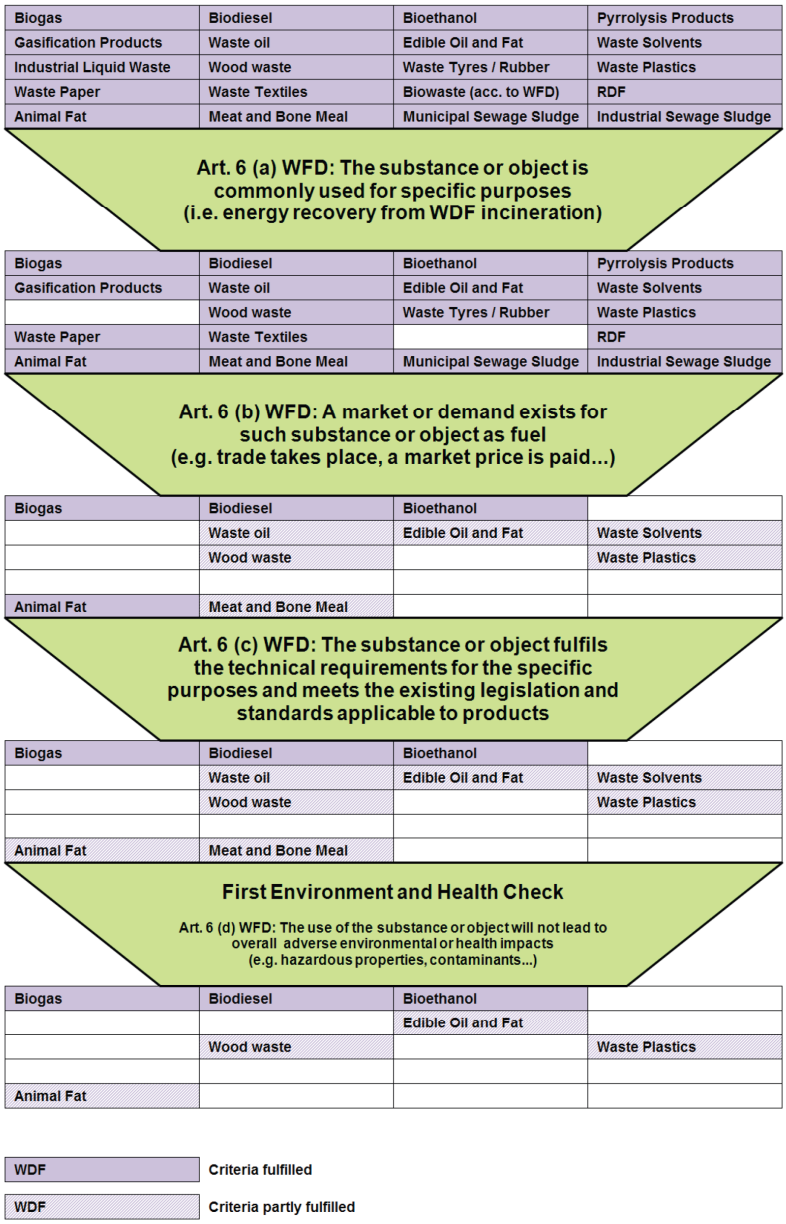
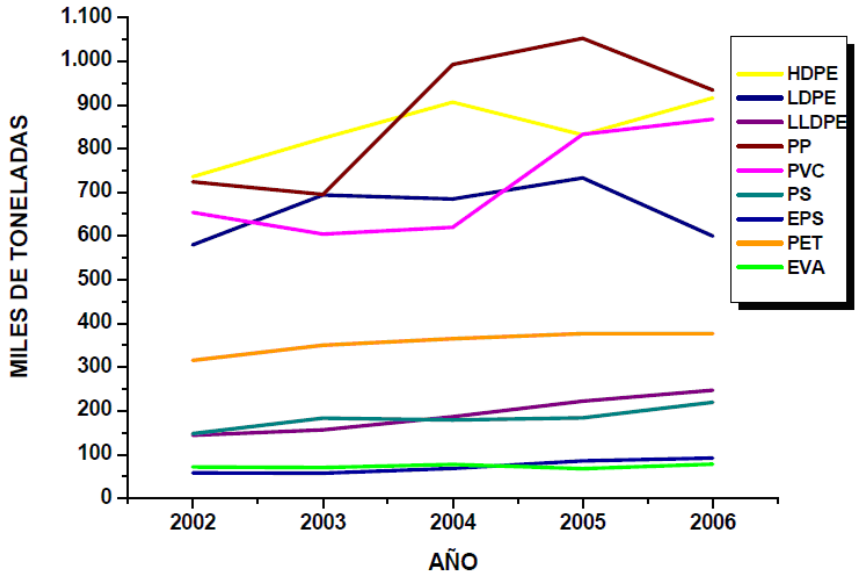


Tabla 4 - Consideraciones para el cumplimiento de los criterios "Fin de residuo" de acuerdo con el artículo 6 de la Directiva Marco de residuos. JRC-IPTS

2.2.2.b. Tipo de residuo plástico a reciclar:

Los tipos de residuos plásticos que se van a gestionar son poliolefinas y vinílicos (polímeros de adición), es decir: todos los polietilenos (de alta y baja densidad, los lineales, etc), el polipropileno, poliestireno, el PVC, etc. Esto se debe a que, según las estadísticas recogidas tanto en el capítulo 1 (antecedentes) como en el anexo B (estudio de mercado) muestran una gran

presencia de dichos materiales plásticos en la sociedad, y de esta forma se aplica un proceso a un residuo con mayor necesidad de gestión y a la vez el proyecto se garantiza la materia prima.



Gráfica 6 - Consumo aparente de plásticos estándar en España. Centro español de plásticos.

La siguiente tabla clasifica los diferentes termoplásticos de acuerdo al producto que se puede obtener a través de ellos. Se puede observar que aquellos plásticos que consisten en Carbón e Hidrógeno son las mejores materias primas para la producción de combustibles tanto sólidos como líquidos, básicamente aquellos producidos por el método de “polimerización por adición”: el polietileno, polipropileno y poliestireno.

Types of polymer	Descriptions	Examples
Polymers consisting of carbon and hydrogen	Typical feedstock for fuel production due to high heat value and clean exhaust gas.	Polyethylene, polypropylene, polystyrene. Thermoplastics melt to form solid fuel mixed with other combustible wastes and decompose to produce liquid fuel.
Polymers containing oxygen	Lower heat value than above plastics	PET, phenolic resin, polyvinyl alcohol, polyoxymethylene
Polymers containing nitrogen or sulfur	Fuel from this type of plastic is a source of hazardous components such as NO_x or SO_x in flue gas. Flue gas cleaning is required to avoid emission of hazardous components in exhaust gas.	Nitrogen: polyamide, polyurethane Sulfur: polyphenylene sulfide
Polymers containing halogens of chlorine, bromine and fluorine.	Source of hazardous and corrosive flue gas upon thermal treatment and combustion.	Polyvinyl chloride, polyvinylidene chloride, bromine-containing flame retardants and fluorocarbon polymers.

Tabla 5 – Polímeros como materia prima. Programa Medioambiental de N.U.

2.2.2.c. El proceso de transformación:

Por las características que poseen los materiales plásticos a considerar, y según se ha especificado en el capítulo 1, las técnicas de reciclaje para estos materiales se especifican en las termoquímicas, como es el proceso de pirólisis al que se dedica el proyecto, ya que sólo puede aplicarse de forma eficiente a residuos con un cierto Poder Calorífico Inferior (entre 15 y 20 MJ/Kg) y no se puede generar muchos tras (alquitranes) en su pirólisis, pues es una fracción que no sirve como combustible y debe ser tratada nuevamente.

Además, las técnicas de reciclaje termoquímico aplicadas a polímeros de adición permiten mezclar los distintos tipos de poliolefinas y vinílicos en un mismo proceso, estén degradados o no, sin necesidad por tanto de operaciones previas de clasificación por tipo.

Tal como verifica la siguiente tabla, los termoplásticos de adición son preferibles como materia prima para el proceso de pirólisis en la recuperación energética de residuos:

Main products	Type of plastics	As a feedstock of liquid fuel
Liquid hydrocarbons	Polyethylene (PE)	Allowed.
	Polypropylene (PP)	Allowed.
	Polystyrene (PS)	Allowed.
	Polymethyl metacrylate (PMMA)	Allowed.
Liquid hydrocarbons	Acrylonitrile-Butadiene-Styrene copolymer (ABS)	Allowed. But not suitable. Nitrogen-containing fuel is obtained. Special attention required to cyanide in oil.
No hydrocarbons suitable for fuel	Polyvinyl alcohol (PVA)	Not suitable. Formation of water and alcohol.
	Polyoxymethylene (POM)	Not suitable. Formation of formaldehyde.
Solid products	Polyethylene terephthalate (PET)	Not suitable. Formation of terephthalic acid and benzoic acid.
Carbonous products	Polyurethane (PUR)	Not suitable.
	Phenol resin (PF)	Not suitable.
Hydrogen chloride and carbonous products	Polyvinyl chloride (PVC)	Not allowed.
	Polyvinylidene chloride (PVDC)	Not allowed.

Tabla 6 - Tipos de productos de la pirólisis de plásticos. Programa medioambiental de Naciones Unidas.

La pirólisis, llamada también termólisis, craqueo térmico o depolimerización térmica, consiste en la descomposición térmica de las sustancias orgánicas en ausencia de oxígeno, o de cantidades suficientemente pequeñas como para que no se produzcan combustiones significativas. Este tratamiento se realiza a una temperatura relativamente baja comparada con los otros tratamientos térmicos de gasificación o incineración, estando comprendida aproximadamente entre 400 y 750 ºC.

La mayoría de las sustancias orgánicas son térmicamente inestables y cuando se someten a la pirólisis, que es un proceso endotérmicos a temperaturas elevadas en atmósfera inerte, se descomponen en moléculas más sencillas gracias a la combinación de reacciones de craqueo térmico y condensaciones de las fracciones moleculares, dando como resultado la formación de fracciones de hidrocarburos gases, líquidos y restos carbonáceos.

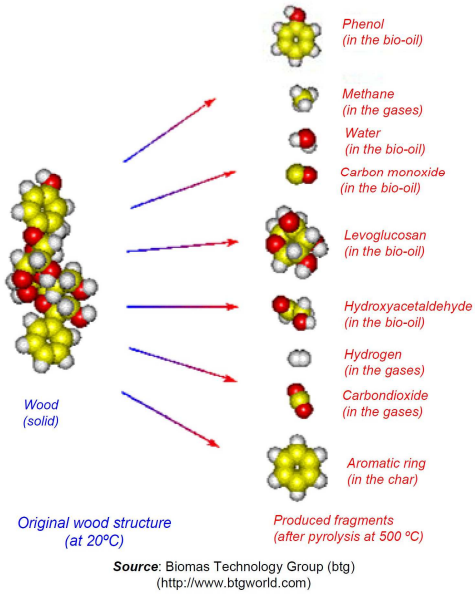


Figura 8 - Rotura de una molécula por craqueo térmico. BTG.

La energía necesaria para el proceso suele provenir de la combustión externa de los gases producidos en el propio proceso y el calor es introducido en el reactor de diversas formas, generalmente por transferencia conductiva a través de paredes metálicas.

Atendiendo a la velocidad de transmisión de calor al reactor y al tiempo de residencia del material a temperatura elevada, se diferencian tres tipos de pirólisis:

- Pirólisis lenta: el proceso tiene lugar de forma discontinua, a presión atmosférica, con una velocidad de calentamiento reducido (< 2 ºC/s) y una temperatura que no supera los 400 - 500º C, que se prolonga por un tiempo elevado, entre 5 minutos y varias horas. Los vapores no escapan del reactor, sino que permanecen durante tiempo en contacto con los sólidos, produciendo reacciones de condensación y dando lugar a alquitranes, aceites y un residuo carbonoso, como el carbón vegetal por ejemplo.

- Pirólisis rápida: el proceso tiene lugar a presión reducida; los productos volatilizados permanecen solamente unos segundos en el reactor, con lo

que se evitan reacciones de condensación; también se denomina destilación seca, pues conduce a una mayor proporción de líquidos. Es la más utilizada en el tratamiento de biomasa para obtención de biocombustibles. La temperatura suele ser elevada, para que se produzcan las reacciones con velocidad suficiente.

- Pirólisis "flash": el tiempo de residencia de los gases en el reactor es inferior a 2 segundos y la transmisión de calor ocurre de forma extremadamente rápida entre 400 y 900º C; se aplica en los casos en los que existe una gran proporción de compuestos volátiles y esta orientada a la producción de productos gaseosos y líquidos debido al craqueo de alquitranes alquitranes.

Por las condiciones de operación en el reactor, este último tipo de pirólisis es el que se aplica a los residuos plásticos del proyecto. La combinación de temperaturas y tiempos de residencia en los diferentes procesos pirolíticos condiciona la naturaleza de los productos, como se señala en la siguiente tabla:

	Tiempo de Residencia	Transferencia de calor	Temperat. (ºC)	Principales Productos
Carbonización	horas-días	Muy baja	300-500	Carbón/coque
Pirólisis convencional	horas	Baja	400-600	coque, aceites
	5-30 min.	Media	700-900	coque, gas
Pirólisis a vacío	2-30 seg.	Media	350-450	Aceites
Pirólisis flash	0,1-2 seg.	Alta	400-650	aceites
	< 1 seg.	Alta	650-900	aceites, gas
	< 1 seg.	Muy alta	>>1.000	gas

Tabla 8 - Combinación de factores en los productos de pirólisis. Guerra Reyes y Ramos Robaina "Año 50 de la revolución".

La pirólisis también puede ser térmica o catalítica, donde cada una presenta una serie de ventajas y problemas. Al final, la pirólisis térmica produce un aceite pirolítico de mayor densidad, formado por gran cantidad de productos,

mientras que la pirólisis catalítica permite la obtención de un aceite ligero orientado a uno o varios tipos de compuestos químicos en concreto.

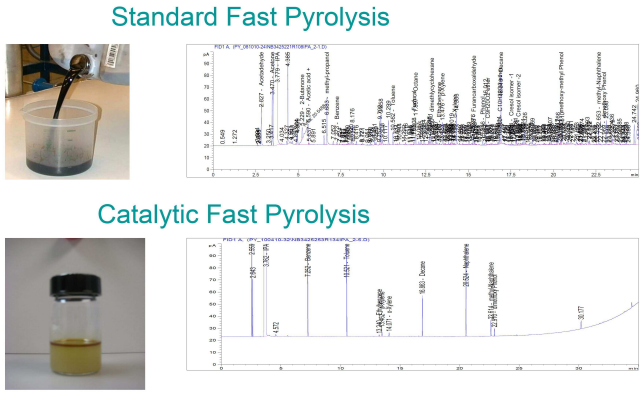


Figura 9 - Pirólisis térmica y catalítica. Grupo de I+D de la Univ. de Ashton.

En el proyecto se va a emplear la pirólisis térmica, ya que por las condiciones de trabajo se va a generar una mayoría de gas de pirólisis (70%) que se va a valorizar y el 30% restante de aceites pirolíticos podrá emplearse como combustible o reformarlo para productos químicos (i.e. BTX).

2.2.2.d. Tipo de reactor a emplear:

El grupo I+D de Bioenergía de la Universidad de Ashton (Birmingham) realizó una presentación sobre los diferentes reactores empleados en procedimientos termoquímicos, marcando aquellos que están siendo más exitosos para sus aplicaciones comerciales:

Figura 10 - Tipos de reactores de pirólisis susceptibles de operación comercial. Grupo de Bioenergía de la Universidad de Ashton.

A pesar de que la materia prima es distinta, el proceso termoquímico en sí es el mismo, y aparece como favorito el reactor de lecho fluidizado en diferentes regímenes de operación, sobre todo los reactores de lecho fluidizado burbujeante (BFB) y circulante (CFB) son los de mayor aplicación comercial:

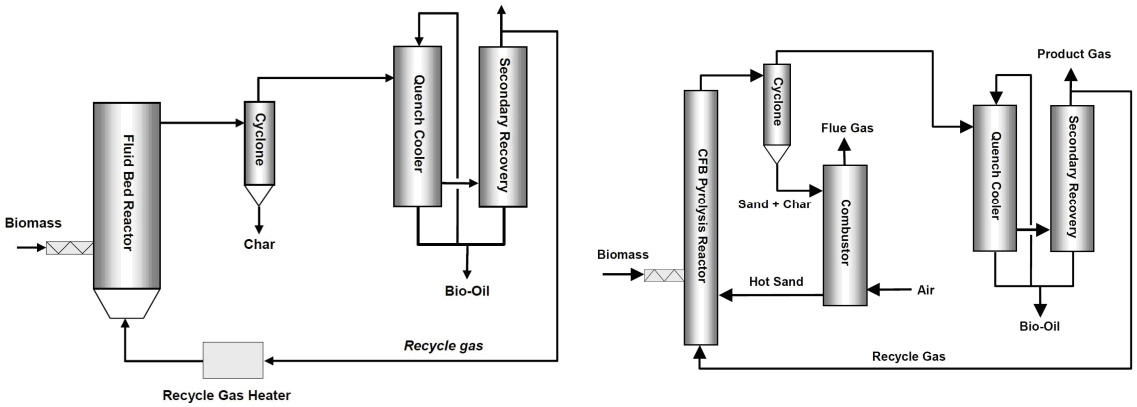


Figura 11 - Esquemas de procesos con reactores BBF y CFB.

2.2.2.e. Reactores de lecho fluidizado:

1º. Introducción: la fluidización es aquella operación por la cual partículas sólidas se encuentran en un estado "fluido" por la acción de un gas o un líquido que las suspende.

Si un fluido circula ascendentemente a través de un lecho de partículas a bajo caudal, y pasa a través de los intersticios o huecos de las partículas estacionarias, se tiene un lecho fijo. Si se aumenta el flujo del fluido, llegará un momento en que las partículas empiecen a moverse y a vibrar, hasta que todas estén totalmente suspendidas por la acción del fluido. En este punto las fuerzas de fricción existentes entre las partículas y el fluido contrarrestan el peso del conjunto de todas las partículas, por lo que la componente vertical se hace nula. A partir de este punto, el sistema se dice que está incipientemente fluidizado.

En los sistemas en los que el fluido sea gas, si se incrementa el flujo del mismo por encima del punto de transición entre el lecho fijo y lecho fluidizado, (lo que se conoce como estado de mínima fluidización), se forman inestabilidades y burbujas de gas, que a medida que se aumente la velocidad del gas se va haciendo más vigorosas y violentas. Este sistema se denomina lecho fluidizado de burbujeo.

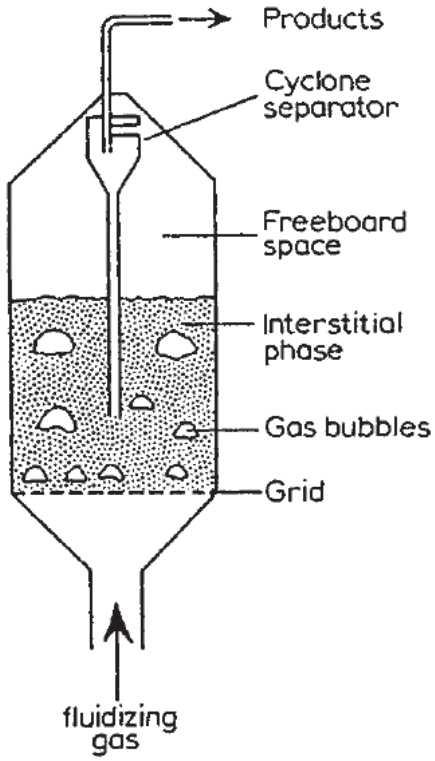


Figura 12. Reactor de lecho fluidizado burbujeante con ciclón interno. Fuente: Manual del Ingeniero Químico - Perry 7ª Ed.

Si el flujo del gas se sigue aumentando, llegará un punto en que el lecho tenga mayor proporción de gas que de partículas y éstas empezarán a ser arrastradas por el flujo, configurándose así diferentes regímenes en función de la velocidad del gas a su paso por el reactor.

Los reactores de lecho fluidizado en general tienen algunas características ideales para gran variedad de aplicaciones industriales: Esto es así porque posee una serie de características:

- El lecho es un medio inerte (a no ser que contenga catalizadores).
- Posee excelente transferencia térmica entre el lecho y las partículas a pirolizar.
- Facilita la regulación de los tiempos de residencia de los gases a través del caudal del gas de fluidización.

- Al comportarse como un líquido, las partículas sólidas fluidizadas pueden añadirse o eliminarse sin cortar el funcionamiento y así ajustar parámetros como la actividad de un posible catalizador (regenerándolo si el soporte es catalítico) o la alimentación de un material a transformar.
- Este comportamiento facilita el transporte de partículas entre reactores, la adaptación de los sólidos a operaciones en continuo, un control más preciso y automático, y una mayor flexibilidad de operación al poder trabajar en amplios rangos de flujo de gas (regulando así el tiempo de contacto o el tiempo de residencia de los sólidos y gases).
- La agitación y mezcla perfecta de sólidos conduce a condiciones prácticamente isotermas en el reactor, haciéndolo ideal para reacciones muy endotérmicas o exotérmicas.
- El sistema posee inercia térmica, es decir, se resiste a cambios bruscos de temperatura (fácil de controlar)
- Es apta para operaciones a gran escala.
- La transferencia de masa y calor es más elevada en los sistemas fluidizados que en otros tipos de sistemas.
- Un control flexible de la temperatura permite la optimización de otras variables de proceso para incrementar el rendimiento de ciertos productos y minimizar pérdidas y productos secundarios.
- Ciertas partículas cohesivas se pueden procesar gracias al fuerte movimiento e interacciones entre partículas.

Las desventajas de los reactores de lecho fluidizado para las aplicaciones industriales incluyen:

- La circulación del gas en forma de burbuja reduce la eficiencia de contacto gas-sólido en los lechos de burbujeo, cuando se desea una reacción entre ambas fases.
- Se da cierta acumulación de partículas en las paredes.
- Unos patrones complicados de hidrodinámica en la burbuja y en el mezclado requieren un esfuerzo adicional para el proceso de escalado.

- Se obtienen productos heterogéneos debido al amplio rango de tiempos de residencia del gas y los sólidos en el régimen de burbujeo.
- La fuerte retro-mezcla (productos de reacción que se mezclan con la alimentación) de las partículas y el gas puede provocar bajas conversiones y una pobre selectividad.
- El fuerte movimiento de los sólidos provoca la erosión de las partes internas del reactor.
- El soporte, sea catalítico o no, también se desgasta (atrición) y conduce a pérdidas de sólido en los ciclones por arrastre (elutriación).

Después de analizar todas las características de los lechos fluidizados, y observando su implantación comercial y su buen funcionamiento, se llega a la conclusión de que son adecuados para llevar a cabo procesos químicos heterogéneos, fundamentalmente todas aquellas reacciones catalíticas y sólido-gas, que se agrupan en tres tipos de reacciones (Costa et al, 2007; Conesa et al., 1996, Conesa et al. 1994, Johannes et al., 2004, Ceamanos et al., 2001):

a) Reacciones de fase catalítica: las partículas sólidas sirven como catalizadores, con aplicaciones favorables y selectivas en la reacción.

$$A(g) + B(g) \overset{CAT}{\rightarrow} C(g)$$

$$A(g) \overset{CAT}{\rightarrow} C(g)$$

b) Reacciones de fase gaseosa no-catalítica: en este caso las partículas son inertes (arena). Su propósito es proveer una transferencia de calor uniforme. Es el caso de la pirólisis térmica.

$$A(s) \rightarrow B(s) + C(g)$$

c) Reacciones gas-sólido: el producto útil puede ser sólido, gas, energía térmica o alguna combinación de éstas. Un ejemplo típico es la combustión.

$$A(g) + B(s) \rightarrow C(g) + D(s)$$

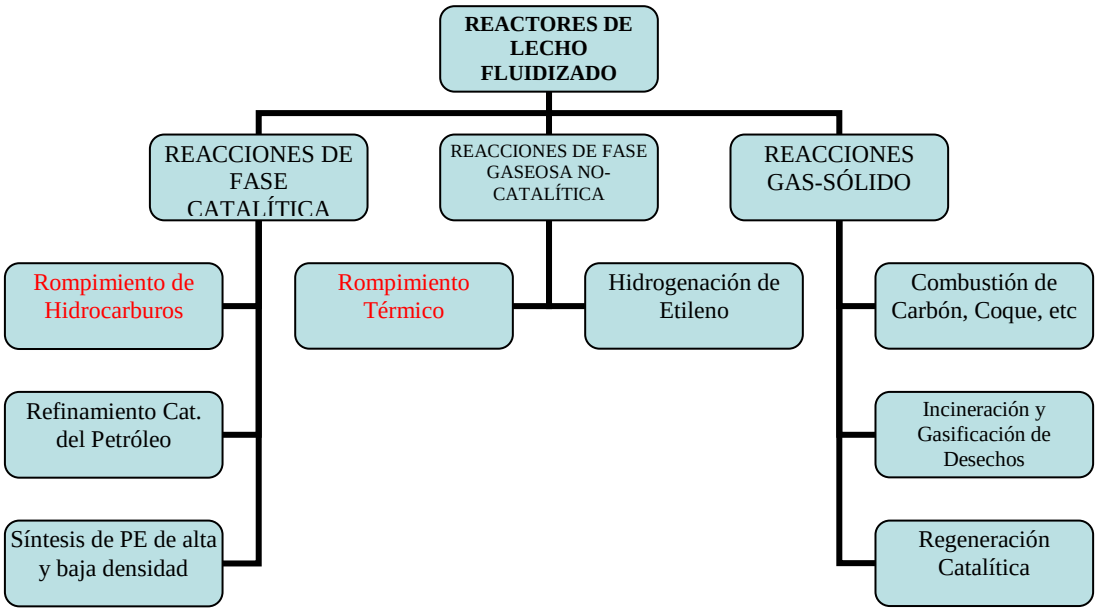


Figura 13 – Tipos de procesos producidos en reactores de lecho fluidizado.

2º. Tipos de regímenes de fluidización:

Según Harrison et al (1961), los regímenes de fluidización se pueden clasificar en dos amplias categorías: particulados (homogéneos) y agregativos (heterogéneos):

- En la fluidización particulada, característica de la mayoría de lechos fluidizados por líquidos, las partículas sólidas se dispersan de forma relativamente uniforme en el lecho, sin burbujas distinguibles.
- En la fluidización agregativa, se observan espacios vacíos que no contienen sólidos. Hay cinco tipos de fluidización agregativa, según la velocidad de fluidización.

Por tanto, para sistemas gas-sólido, los regímenes de fluidización observables experimentalmente y ordenados según la velocidad de fluidización son:

1. Lecho fijo (no es un régimen de fluidización en sí mismo sino un estado previo).
2. Fluidización particulada (homogénea).
3. Fluidización de burbujeo.
4. Fluidización de slugging (coágulos de gas que ocupan casi toda el área).
5. Fluidización turbulenta.

Cuando la velocidad de fluidización es mayor que la de arrastre y hay que recircular las partículas arrastradas para mantener el lecho, aparecen otros dos regímenes:

6. Fluidización rápida (lechos con recirculación o CFB)
7. Arrastre neumático o fase diluida.

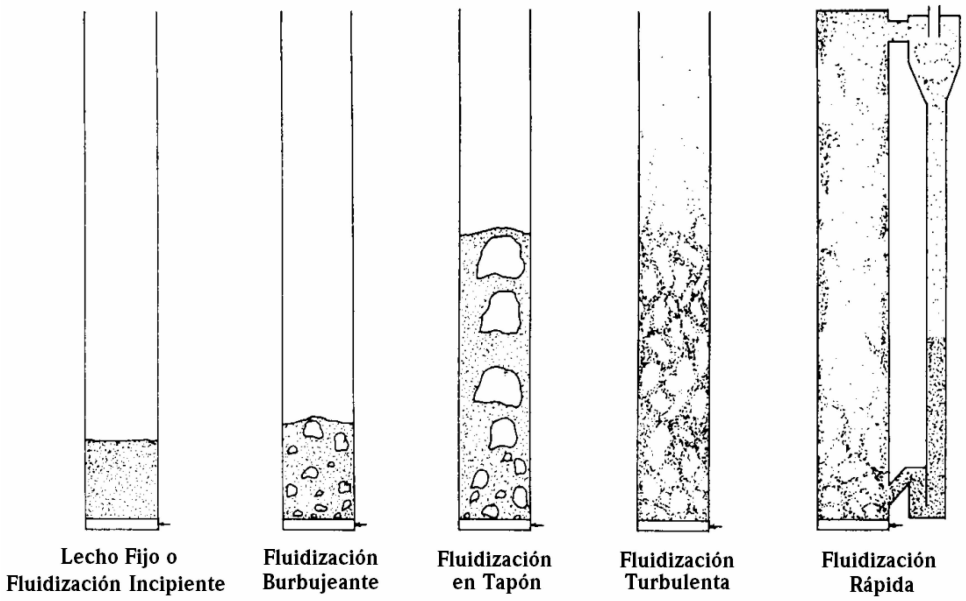


Figura 14 - Regímenes de fluidización. Grace (1990)

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

Como se ha visto, en las partículas del Grupo B se da la particularidad de que al incrementar la velocidad de fluidización el lecho pasa de estar fijo a emitir las primeras burbujas, y luego se alcanza la velocidad mínima de fluidización cuando el lecho se expande. Es decir, el régimen particulado no se alcanza nunca porque las burbujas primeras no dejan que el lecho se homogenice.

Los regímenes de slug se dan en lechos de partículas grandes y con una relación altura-diámetro mayor a dos, ya que entonces las burbujas tienen suficiente tiempo para crecer en su ascenso. Las burbujas en lechos fluidizados crecen de tamaño al ascender por tres factores: la presión hidrostática disminuye cuanto más ascienden, coalescen en sentido vertical con las burbujas alcanzando a las que están por encima y coalescen en sentido horizontal con las burbujas colindantes. De esta forma, cuando el diámetro de las burbujas alcanza 2/3 del diámetro del lecho, éste sufre un flujo periódico de grandes burbujas que pueden llegar a dividir al lecho en varias partes, haciendo que la presión fluctúe.

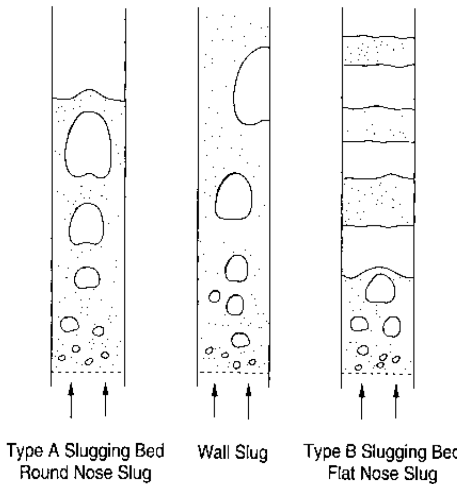


Figura 15 – Tipos de lechos con slugging.

Si por el contrario las partículas son pequeñas y el diámetro del lecho es grande, el aumento de la velocidad de fluidización favorecerá un régimen turbulento en lugar de la formación de slugs.

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

3º. Partes elementales de un reactor de lecho fluidizado:

1. Una columna vertical: es el cuerpo del reactor, que contiene todos los elementos además del lecho y donde se introduce la alimentación para que los productos salgan por su parte superior.

2. Un distribuidor de gas: proporciona una distribución deseada de gas de fluidización y sirve de soporte para las partículas del lecho. Normalmente se necesita una mínima pérdida de presión a través del distribuidor para asegurar la uniformidad de la distribución del gas en el lecho. Se pueden diseñar de muchas formas, de forma que en el régimen de burbujeo su geometría influye mucho en el tamaño de burbuja inicial.

3. Un soporte de fluidización: son las partículas sólidas que sufren la fluidización del gas. Pueden ser de tres tipos según su función, y se puede trabajar con un solo tipo o varios de ellos a la vez:

   a) Soporte catalítico: usados comúnmente en lechos fluidizados para reacciones de síntesis a partir de reactivos gases.
   b) Soporte reactivo: el sólido fluidizado es la materia prima y reacciona con el gas.
   c) Soporte inerte: el ejemplo más típico es la arena, cumple únicamente funciones de agitación y relleno. Usado conjuntamente con los dos soportes anteriores o solo en reacciones de degradación térmica.

4. Ciclón/es: sólo forman parte del reactor si se encuentran contenidos en el interior, ya que también pueden colocarse fuera. Separan las partículas sólidas del gas de salida y las devuelve de vuelta al lecho a través del "dipleg" (tubo de aspiración). Son los separadores gas-sólido más ampliamente adoptados en lechos fluidizados.

5. Intercambiadores de calor: elimina el calor generado en reacciones exotérmicas o añade el calor necesario en reacciones endotérmicas (hornos). Pueden estar introducidos dentro del lecho o a lo largo de la pared.

6. Una sección expandida en la parte superior del reactor: se encarga de reducir la velocidad lineal del gas en la "zona libre" (freeboard), evitando el arrastre de las partículas. No siempre es necesaria, y depende de las condiciones de operación y el diseño del separador gas-sólido.

7. Pantallas deflectoras (baffles): son estructuras internas que reorganizan el flujo, mejoran la rotura de burbujas, promueven el contacto gas-sólido y reducen el arrastre de las partículas. Los beneficios de los deflectores son más claros para lechos de partículas gruesas debido a que las burbujas son más grandes.

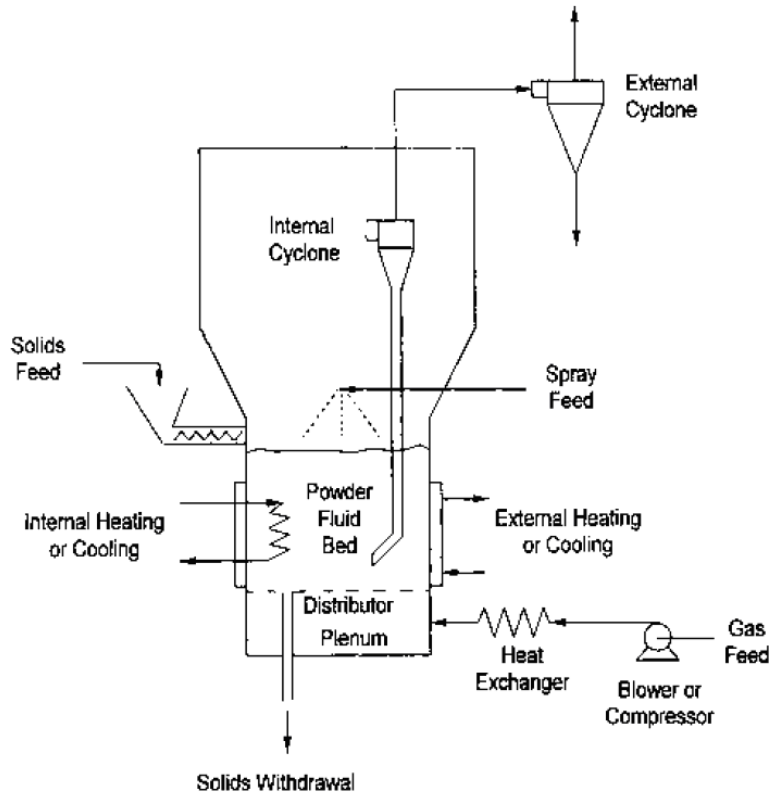


Figura 16 - Partes elementales de un reactor de lecho fluidizado.

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

4º. Modelo hidrodinámico del reactor:

Cuando se empezó a estudiar el comportamiento hidrodinámico dentro de los reactores de lecho fluidizado se propusieron dos tipos de modelo para describirlo: uno basado en un enfoque pseudo-homogéneo y otro en un enfoque de dos-fases.

a) Modelos pseudo-homogéneos: en el primer intento de hacer un modelado de reactor de lecho fluidizado gas-sólido se utilizaron modelos ideales o sencillos de un solo parámetro, por ejemplo lecho en pistón, mezcla completa, dispersión, tanques en serie. Se desecharon.

b) Modelos de dos fases: la teoría de este modelo enuncia que todo el gas que exceda el necesario para fluidizar el lecho pasará a través de él en forma de burbujas. Este aspecto engloba un amplio rango de modelos con varias suposiciones básicas: unos consideran estelas y nubes alrededor de las burbujas y otros no; algunos proponen modelos de tamaño de burbuja constante y otros consideran que la burbuja crece en su ascenso por el lecho; e incluso algunos niegan que exista percolación del gas a través de la emulsión.

   Aún así, en la mayoría de este tipo de modelos se considera un lecho fluidizado en el que existen dos fases diferentes, por ejemplo las fases burbuja y emulsión. Cada fase se representa por una ecuación diferente con un término en cada una que expresa el intercambio de materia entre ambas.

   - Modelo de Davidson y Harrison (1963). Presenta las siguientes suposiciones:
     - Todo el gas que fluya en exceso del necesario para que se produzca la fluidización incipiente pasa a través del lecho en forma de burbujas.
     - Las burbujas son de tamaño uniforme en su ascenso por el lecho.

- La reacción sólo tiene lugar en la fase emulsión, con una cinética de primer orden.
- La transferencia de materia en la interfase burbuja-emulsión ocurre por un proceso combinado de difusión molecular y paso continuo del gas.
- La fase emulsión (fase densa) se puede considerar que está tanto en mezcla completa como en flujo en pistón.

En este modelo el parámetro clave es el *diámetro de burbuja equivalente*, el cual se asume que es constante.

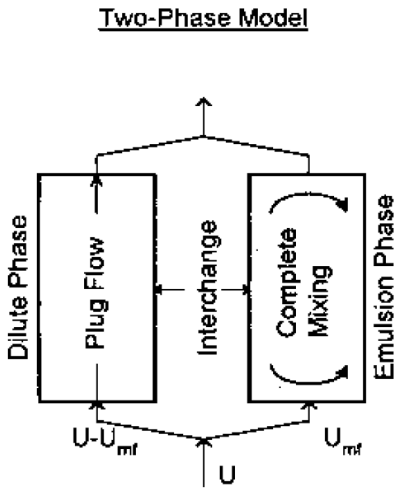
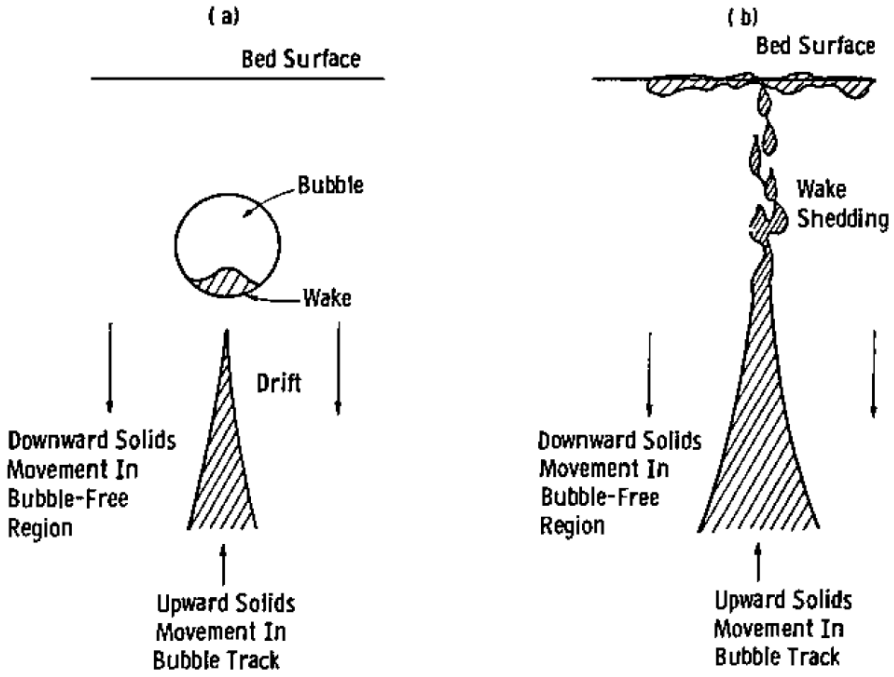


Figura 17 - Modelo De fluidización de dos fases. Handbook of solids fluidization.

Chavarie y Grace (1975) revisaron este modelo y enunciaron que el modelo de mezcla completa es demasiado conservador en la estimación de la conversión global y que los perfiles de concentración no se parecen en nada a los valores experimentales. Respecto al modelo de flujo en pistón, comprobaron que aunque el modelo ofrece un perfil de concentración en fase densa decente, la concentración de fase densa predicha es demasiado alta y muy cercana a las concentraciones de fase burbuja, concluyendo que la velocidad de transferencia de materia es demasiado elevada.

- Modelo de Partdige y Rowe (1966): observaron que cada burbuja de gas arrastra una estela considerable de sólidos hacia la parte superior del lecho. El sólido que asciende en la estela se encuentra con el que desciende en la fase emulsión y se intercambian entre ellos (agitación intensa). Al descender la fase emulsión por el paso de la burbuja puede ocurrir que el gas descienda en algunas partes del lecho (retromezcla). Permite tamaños de burbuja y velocidades variables, y considera que el intercambio de gas ocurre en la interfase nube-emulsión, es decir, la fase burbuja y la fase nube están bien mezcladas en lo que se llama la fase nube-burbuja, y la distribución de flujo se produce entre ésta y la fase emulsión.



Solids mixing mechanism in fluidized beds—wake and drift.

Figura 18 - Modelo de fluidización de Partdige y Rowe. Handbook of solids fluidization.

Chavarie y Grace (1975) revisaron el modelo y encontraron que tiene tendencia a sobreestimar el tamaño de nube, lo cual altera los perfiles de concentración y aspectos relacionados con cualquier sentido físico obtenidos del modelo.

- Modelo de lecho de burbujeo. Propuesto por Kunii y Levenspiel (1969), puede considerarse una versión modificada del modelo de dos fases donde además de la fase burbuja y emulsión, también se considera una fase nube-estela. Representa un grupo de modelos que considera una retromezcla en la emulsión o flujo invertido de la fase densa como consecuencia del ascenso de las burbujas.

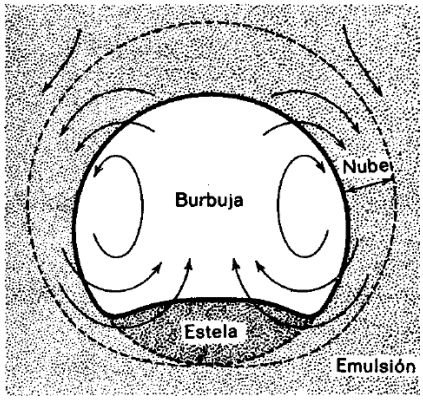


Figura 19 - Modelo de Kunii-Levenspiel. Handbook of solid fluidization.

Una diferencia crucial entre este modelo y el resto de modelos de dos fases es que la transferencia de materia en la interfase considera dos resistencias diferentes: una de la fase burbuja a la fase nube-estela y otra de la fase nube-estela a la fase emulsión. La teoría básica que enuncia el modelo es:

- El gas en la burbuja permanece con la burbuja, recirculando como humo que se eleva y sólo penetrando una pequeña cantidad en la emulsión. Esta zona de penetración es la nube, ya que envuelve la burbuja que asciende.
- Todos los parámetros como la velocidad de ascenso, el espesor de la nube y la velocidad de recirculación son funciones simples del tamaño de la burbuja que asciende.
- Cada burbuja de gas arrastra una estela sustancial de sólidos hacia arriba en el lecho.

Las suposiciones basadas de la teoría anterior para el modelo de lecho de burbujeo son:

- Las burbujas son de un tamaño único y están uniformemente distribuidas en el lecho.
- El flujo de gas en los alrededores de las burbujas que ascienden se comporta según el modelo de Davidson y Harrison.
- Cada burbuja arrastra con ella una estela de sólidos, creando una circulación de sólidos en el lecho hacia arriba por detrás de las burbujas y un flujo hacia abajo en el resto de la emulsión.
- La emulsión permanete en condiciones de mínima fluidización, por lo tanto la velocidad relativa del gas y los sólidos permanece invariable.

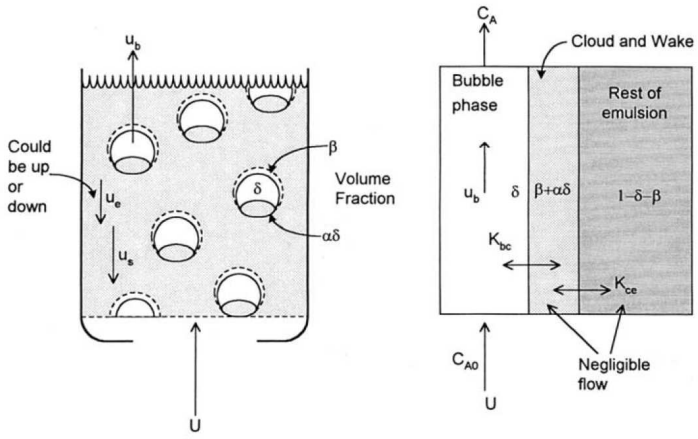


Figure 2 Bubbling bed model. (From Kunii and Levenspiel, 1969.)

Figura 20 – Suposiciones realizadas en el modelo de Kunii-Levenspiel. Handbook of solids fluidization.

- Modelo de burbujas coalescentes. Propuesto por Kato y Wen (1969), considera que el tamaño de la burbuja cambia con la altura en el lecho. Sus suposiciones son:

  - Un lecho fluidizado puede representarse por n compartimentos en serie. La altura de cada compartimento es igual al tamaño de cada burbuja a esa altura del lecho.

- Cada compartimento está compuesto por una fase burbuja y una fase emulsión. El gas fluye a través de la fase burbuja, y la fase emulsión se considera completamente mezclada en su interior.
- La porosidad de la fase emulsión es igual que la del lecho en condiciones de fluidización incipiente.
- La fase burbuja está formada por burbujas esféricas rodeadas de nubes esféricas. La porosidad dentro de la nube es asumida como la misma que en la fase emulsión.
- El intercambio de gas tiene lugar entre las dos fases.
- Las burbujas crecen continuamente mientras cruzan el lecho hasta que alcanzan el máximo tamaño estable o logran el diámetro de la columna del lecho.
- El lecho opera en condiciones isotérmicas ya que la difusividad térmica efectiva y el coeficiente de transferencia de calor son grandes.

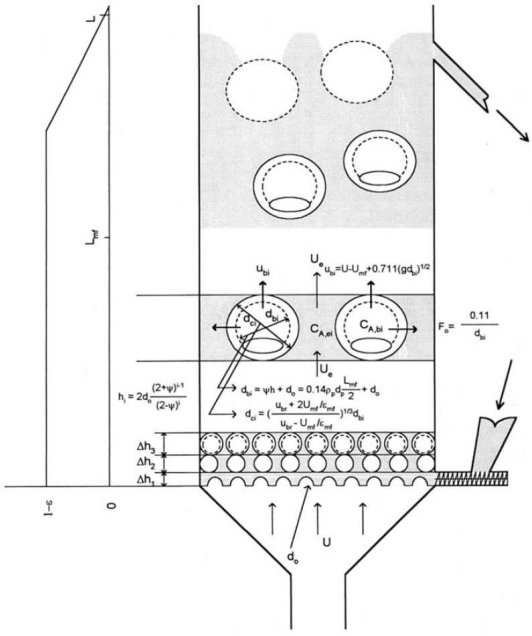


Figure 3 Main features of bubble assemblage model. (From Kato and Wen, 1969.)

Figura 21 – Modelo de fluidización de Kato y Wen. Handbook of solid fluidization.

En un intento de comparar la efectividad de varios modelos de dos fases, Chavarie y Grace (1975) llevaron a cabo un estudio experimental de lecho fluidizado que les permitía medir ambas fases (la burbuja y la emulsión). Compararon los datos experimentales con aquellos predichos por varios de los modelos de dos fases y vieron que:

- La suposición del modelo de Davidson y Harrison (1963) que asume la mezcla completa en la fase densa subestima seriamente la conversión global de la reacción. Por otro lado, la otra suposición de que también hay flujo pistón en la fase densa proporciona mucho mejores predicciones de la conversión global. Aún así, los perfiles de concentración predichos concuerdan poco con los perfiles experimentales observados.
- El modelo de Partridge y Rowe (1966) sobreestima el flujo de la burbuja visible en la teoría de dos fases, lo cual lleva a una incompatibilidad entre las áreas de nube predichas y la sección del lecho. Esta incompatibilidad mecánica evita la aplicación directa del modelo.
- El modelo de lecho de burbujeo de Kunii y Levenspiel (1969) proporciona la mejor representación global de los datos experimentales. El éxito del modelo se puede atribuir principalmentea que:
  - La moderada transferencia global de masa en la interfase.
  - La despreciable velocidad de percolación en la fase emulsión.
  - La suposición de que exista reacción en la nube y la estela.
  - El uso de propiedades promedio en las burbujas para simular el lecho completo.
- El modelo de Kato y Wen (1969), aunque da el mejor ajuste para el perfil de la fase burbuja al considerar sus propiedades variables, los perfiles de la fase densa y las concentraciones de salida del reactante fueron pronosticadas en exceso.

Esto y el hecho de que en ningún modelo de dos fases se consideren los efectos del distribuidor del gas ni del freeboard lleva a la conclusión de que

el modelado de reactores funciona para reacciones particulares y no hay un patrón general y aunque los estudios están avanzando aún no hay suficiente conocimiento de su comportamiento.

Aún así y dado los comentarios de Chavarie y Grace, en este proyecto se va a considerar que es aplicable el modelo de Kunii-Levenspiel, debido a que cuando las partículas sólidas del PE entran y se suspenden en el lecho sufren el craqueo térmico por el que se emiten volátiles que siguen reaccionando en fase gas tanto si existe catalizador en el lecho como si no, de una forma muy similar a la reacción considerada en dicho modelo. Existen trabajos en la literatura donde el modelo de K-L es aplicado a la pirólisis o gasificación no catalítica de otros materiales en lecho fluidizado, por ejemplo "*Matsui, Kunii and Furusawa, Estudio de la gasificación de char con lecho fluidizado por vapor empleando la cinética obtenida termogravimétricamente*".

2.2.2.f. Tipo de intercambiador de calor:

Para recuperar el calor residual que porta el gas de pirólisis antes de condensar los aceites, se va a emplear un intercambiador de calor que transferirá la energía a un fluido, en este caso agua, para generar un vapor con aplicaciones térmicas o eléctricas.

El intercambiador de calor seleccionado es de tipo carcasa y tubos, uno de los más conocidos ya que se pueden construir con muchos tipos de materiales y disposiciones, con lo cual pueden desempeñar mayor cantidad de aplicaciones.

El mayor problema es la temperatura de entrada de los gases de pirólisis. Aunque se van enfriando a su paso por el intercambiador, su entrada es a 740º C y requerirá un material del tipo acero Inconel o similar. Los tipos de intercambiadores se construyen en función de tres partes: cabeza, carcasa y cola.

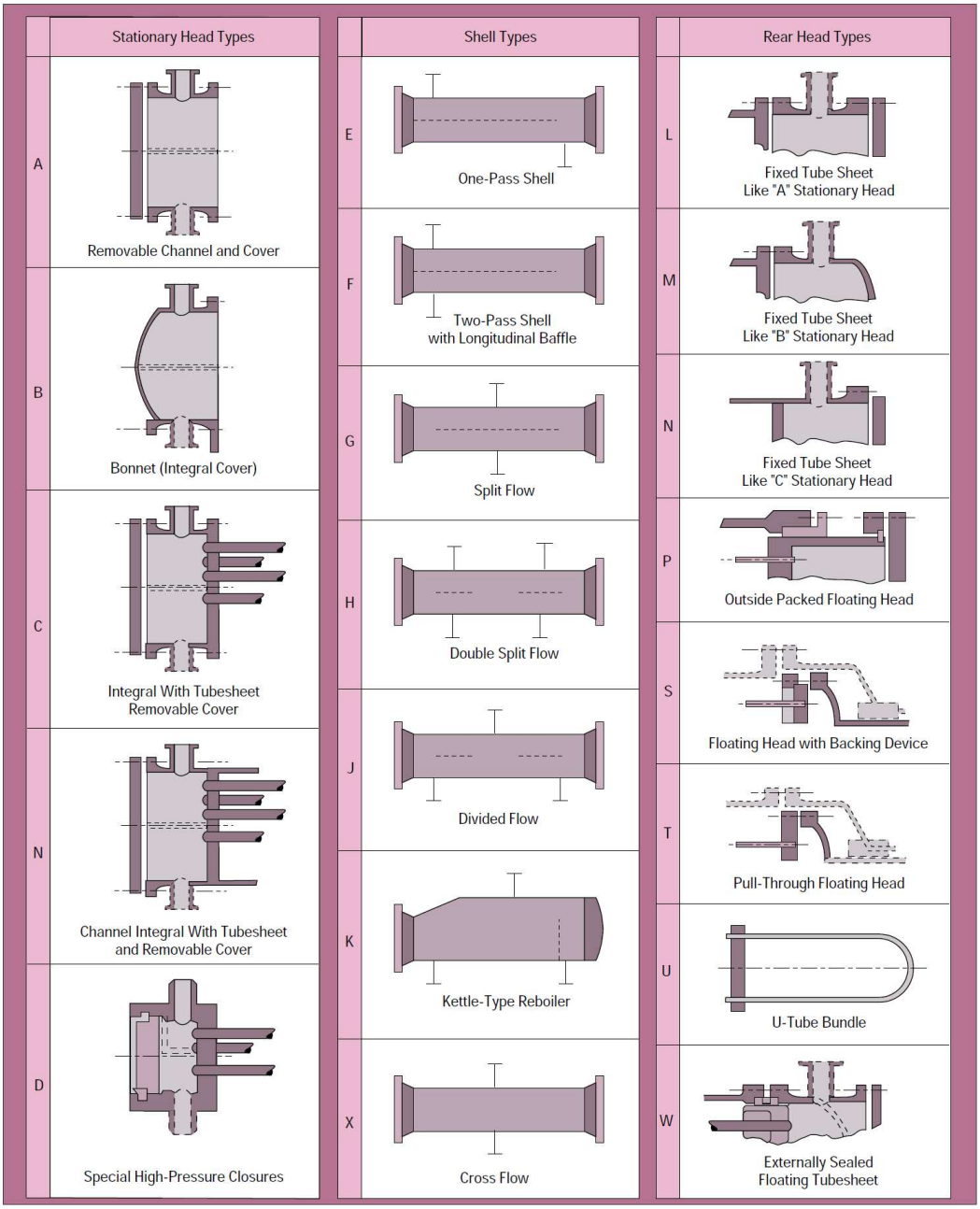


Tabla 9 -Designaciones TEMA para intercambiadores de calor de carcasa y tubos.

Según en las elevadas temperaturas de operación y los tipos existentes de intercambiadores según su construcción, hay que tomar en cuenta grandes diferenciales de temperatura entre los tubos y la carcasa, por lo que el equipo debe ser capaz de absorber el estrés térmico. Hay dos tipos que cumplen esta necesidad:

- En forma de U: los tubos dentro del intercambiador se giran en forma de U, con lo que sólo hay una placa tubular (como una parrilla circular donde se soportan los tubos en cada hueco). Tiene la ventaja de que un extremo del intercambiador está libre y por tanto el haz de tubos puede expandirse o contraerse en caso de estrés por diferencial térmico. Además, los tubos se pueden limpiar por fuera, ya que el haz de tubos puede sacarse, pero no pueden limpiarse efectivamente por dentro al tener el giro de U. En este caso el fluido más “sucio” (el gas de pirólisis) circula por fuera de los tubos, lo cual es una ventaja.

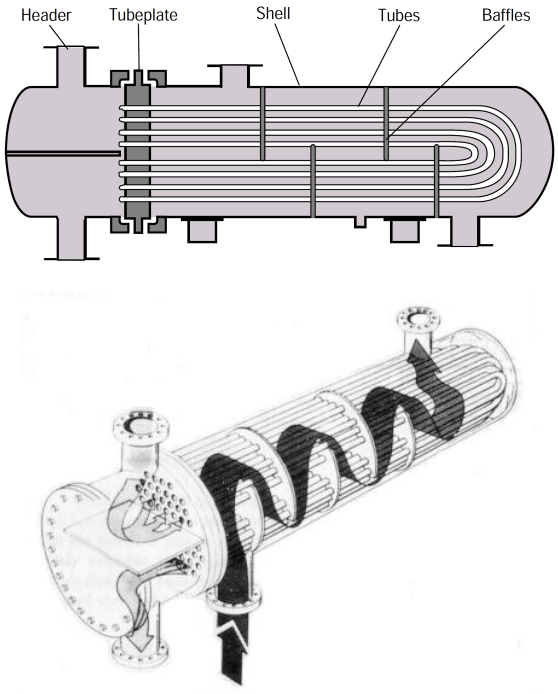


Figura 22 - Intercambiador de carcasa y tubos en forma de U. KLM Technology Group. Engineers India Ltd.

- Cabeza flotante: es el más versátil pero el más caro. Una placa tubular es fijada a la carcasa y la otra “en el otro extremo “flota” libremente. Esto permite la expansión libre del haz de tubos así como la limpieza de los tubos por fuera y por dentro. Por tanto es ideal para petroquímicas donde los fluidos son sucios y a elevadas temperaturas. Hay varias formas de cabezas flotantes. Las dos más comunes son la TEMA-S y TEMA-T, porque

las otras dos existentes (TEMA P y TEMA W) son tendentes a tener fugas y no se podrían usar para un fluido a elevada temperatura y combustible como son los gases de pirólisis.

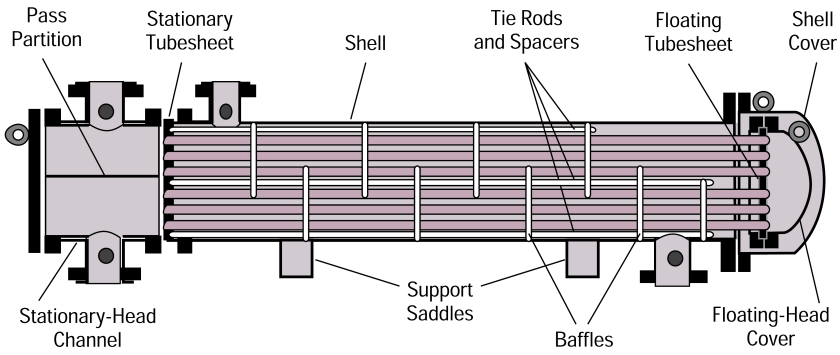


Figura 23 - Intercambiador de carcasa y tubos con cabeza flotante (TEMA S). Engineers India Ltd.

Por tanto, según la designación TEMA, las posibilidades mejores de diseño son:

Parte del intercambiador	TEMA
Cabeza	**A**, **B**, C, D, N
Carcasa	**E**, F
Cola	**U**, **S**, **T**

Se ha marcado en negrita los diseños más comunes de construcción, de forma que hay tres familias:

- Tipos AES, BES: haz de tubos desmontable, cabeza flotante con anillo interno fracturado. Ideal para aplicaciones que requieran desmontaje frecuente del haz de tubos para inspección y limpieza. Emplea tubos rectos que soportan bien las diferencias de temperaturas entre la carcasa y los fluidos del tubo. Adecuado para enfriar fluidos volátiles o tóxicos.

- Tipo AET, BET: haz de tubos desmontable, cabeza flotante extraíble. Ideal para aplicaciones que requieren desmontaje frecuente de haz de tubos para

inspección y limpieza, ya que la cabeza flotante está ajustada directamente en la parrilla. Esto evita tener que desmontar la cabeza flotante para sacar el haz de tubos. Su diseño de cabeza flotante también permite expansiones térmicas por diferencias de temperaturas entre la carcasa y el haz de tubos. Adecuado para enfriar fluidos volátiles o tóxicos y condensadores de hidrocarburos.

- Tipo AEU, BEU: haz de tubos desmontable, en forma de U. Especialmente adecuado para requisitos severos de expansión térmica. Debido a que cada tubo se puede extraer y contraer independientemente, este diseño es adecuado para aplicaciones a grandes temperaturas. Además de poderse desmontar igual que los anteriores, es más económico que los de cabeza flotante. Los únicos problemas es que los tubos por su forma de U sólo pueden limpiarse con productos químicos y son complicados de reemplazar.

Dentro de las posibilidades más adecuadas de designación TEMA (Tubular Exchangers Manufacturers Assosiation), dada las altas temperaturas de los gases de pirólisis, se opta por un intercambiador de carcasa y tubos tipo AEU o BEU, más en concreto BEU al ser más disponibles.

La presión de diseño del equipo diseñado en el proyecto es de sólo 5 bares en las tuberías y casi presión atmosférica (1 bar) en la carcasa, luego al usarse como material de construcción acero inoxidable tipo Inconel, cuya temperatura de fusión es 1500º C, podrá soportar la temperatura de 740º C de los gases de pirolisis.

2.2.2.g. Tipo de separador gas-partícula:

El régimen de fluidización calculado para el reactor es de transición, de forma que la velocidad de fluidización del lecho de arena es ligeramente mayor que la de arrastre para poder mantener fluidizado al residuo plástico. Como consecuencia, el proceso que ocurrirá en el reactor se divide en dos etapas:

- Los sólidos son eyectados desde el lecho fluidizado al freeboard (espacio por encima del lecho dentro del reactor) debido a la erupción producida por las burbujas al llegar a la superficie (Levy et al., 1983).

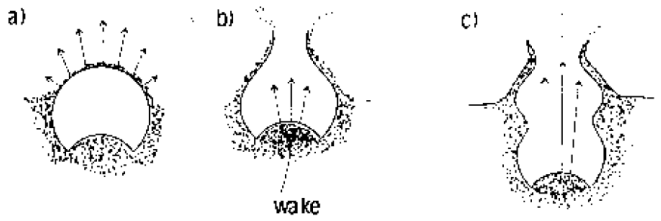


Figura 24 – Diferentes mecanismos propuestos de estallido de burbujas en la superficie de lechos fluidizados. (a) desde la nariz, (b) desde la estela, (c) desde la estela de dos burbujas coalescentes. Handbook of particle fluidization.

- Entonces los sólidos se elevan debido a su velocidad inicial, ajustando su velocidad a la del gas en el freeboard y entonces se deceleran y una fracción de ellos vuelve a caer (disengage) al lecho fluidizado y la otra es transportada por el flujo del gas hacia la salida del reactor.

Observaciones experimentales muestran que por encima del lecho donde las burbujas explotan, la fracción en volumen de sólidos disminuye con la altura hasta hacerse constante o casi constante. La distancia entre la superficie del lecho fluidizado y el punto en el que la concentración de sólidos se hace casi constante es conocida como altura de transporte libre (TDH):

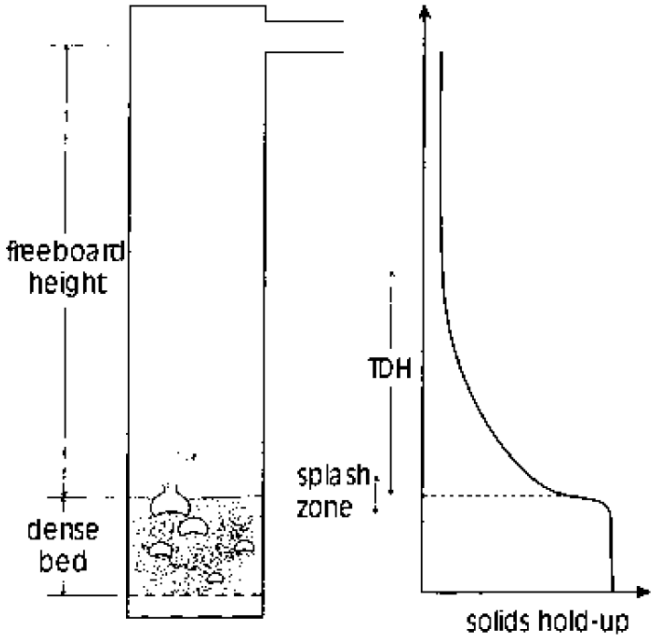


Figura 25 – Zonas dentro de un depósito con un lecho fluidizado. Handbook of particle fluidization.

Aquellas partículas que tras superar la TDH sigan siendo arrastradas por el gas en el freeboard estarán en un estado similar al transporte neumático (Zenz and Weil, 1958).

Otro aspecto a considerar es que en cualquier lecho fluidizado, los impactos y el roce constante de las partículas sólidas en movimiento hacen que éstas se vayan descomponiendo en trozos más pequeños en un fenómeno conocido como "atrición". Al surgir diferentes tamaños de partículas para unas condiciones de fluidización preestablecidas, unas serán arrastradas con mayor facilidad que otras, separándose así en un fenómeno de clasificación conocido como "elutriación".

Por todos los fenómenos mencionados anteriormente, se va a producir un arrastre progresivo del lecho con la corriente del gas de pirólisis que dejará al reactor sin lecho y además puede perjudicar los equipos de postratamiento. Es necesario, por tanto, separar la arena arrastrada de la corriente gaseosa y reintroducirla al reactor. Un separador de primer uso utilizado en la mayoría de procesos con lecho fluidizado es el ciclón.

Un ciclón es un equipo que separa partículas sólidas de una corriente de un fluido entrante, a través de una fuerza centrífuga radial aplicada a las partículas. Esta fuerza separa los sólidos del gas conduciéndolos a la pared del ciclón, donde se van deslizando hacia la parte inferior del ciclón y son recogidos.

Las ventajas que presentan es que no poseen partes móviles, su construcción no es cara, trabajan a presiones bajas y su coste de mantenimiento es bajo. Si la corriente fluida a tratar es seca y las partículas son grandes y fluyen libremente, su separación es relativamente sencilla. En cambio, el ciclón encontrará limitaciones si las partículas miden menos de 10 micras de diámetro o la corriente fluida tiene alguna restricción o temperaturas extremas. En tales casos, se deben colocar varios ciclones en línea en caso de partículas tan pequeñas, y para altas temperaturas se debe recubrir el interior de los ciclones con materiales refractarios para minimizar las pérdidas de calor y proteger las superficies metálicas de la abrasión.

Los ciclones pueden clasificarse de diversas formas:

- Según el sentido del fluido que circula por ellos: pueden ser ciclones de flujo invertido o de flujo unidireccional. Los de flujo invertido son los más comunes y se van a utilizar para el diseño. En este tipo de ciclón la corriente gaseosa que arrastra los sólidos que entran tangencialmente en el ciclón por su periferia, formando espirales hacia abajo en su interior y la corriente de gas limpia sale hacia arriba. Los sólidos siguen el recorrido de la espiral por el cuerpo del ciclón con una inclinación de unos 15º para salir proyectados por abajo. Hay diversos tipos de ciclones de flujo invertido con entrada tangencial:

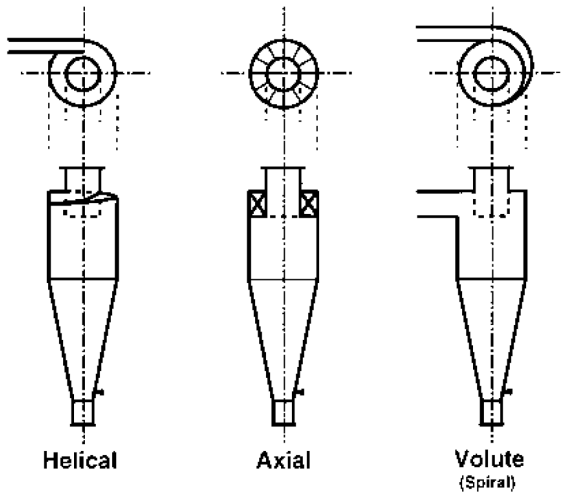


Figura 26 – Tipos comunes de ciclón de flujo invertido. Handbook of particle fluidization.

Los que poseen el techo helicoidal suelen usarse para evitar la acumulación de material pegajoso, al forzar los sólidos entrantes a deslizarse por el techo en lugar de colisionar. Por tanto, para evitar acumulaciones en caso de arrastre de posibles partículas de plástico, se elige este modelo.

- Según sus dimensiones los ciclones tienen tres posibles configuraciones, referidas a sus dos partes principales: la parte superior cilíndrica (barril) y la parte inferior cónica. Para ello, se usa una nomenclatura de cuatro dígitos, de forma que los dos primeros representan la longitud del cilindro y los dos últimos la longitud del cono (D es el diámetro del barril):

  - 1D3D: la parte cónica es el tripe de larga que la del barril (ciclón alargado)
  - 1D2D: la parte cónica es el doble de larga que la del barril.
  - 2D2D: la parte del barril y la parte cónica son igual de largas.

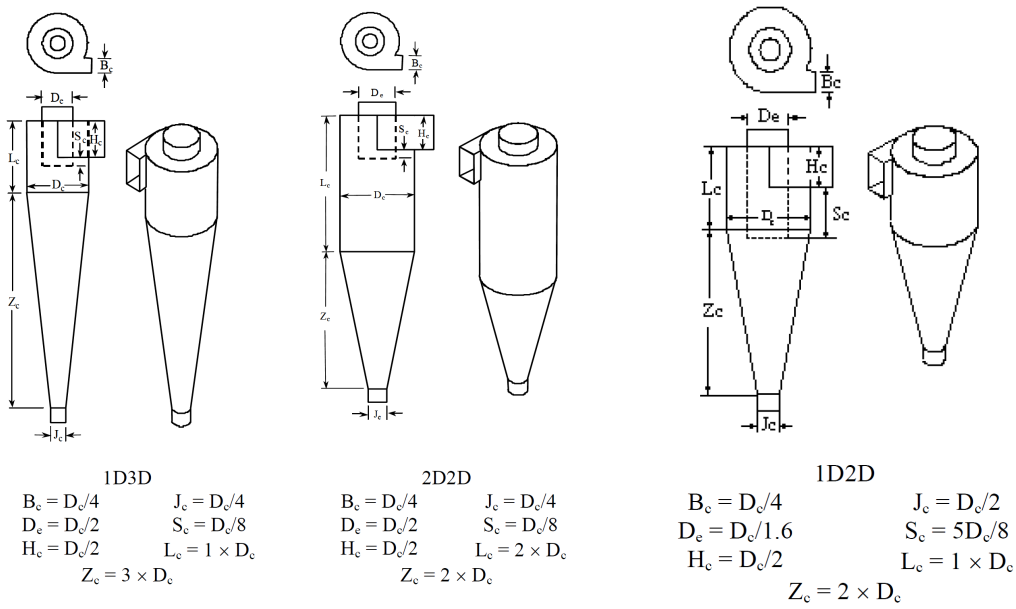


Figura 27 – Configuraciones de ciclones 1D3D, 2D2D y 1D2D.

- Según su lugar de colocación: pueden situarse tanto en la parte superior del lecho, dentro del reactor, como fuera del reactor:

  - Los ciclones internos no requieren tuberías de entrada ni carcasa a presión, y pueden tener tuberías de salida de los sólidos rectas. Lo malo es que deben ser pequeños para caber dentro del reactor.
  - Los ciclones externos pueden ser mucho mayores en tamaño, son más accesibles en caso de avería, aunque requieren una carcasa a presión y un tubo de salida de sólidos con un codo para reintroducirlos en el reactor.

2.2.2.h. Ejemplos comerciales:

En la siguiente tabla, figuran algunos casos de empresas, que aunque emplean biomasa como materia prima, su tecnología es por pirólisis:

Reactor Design	Capacity (Dry Biomass Feed)	Organization or Company	Products
Fluidized bed	400 kg/hr (11 tons/day)	DynaMotive, Canada	Fuel
	250 kg/hr (6.6 tons/day)	Wellman, UK	Fuel
	20 kg/ hr (0.5 tons/day)	RTI, Canada	Research / Fuels
Circulating Fluidized Bed	1500 kg/hr (40 tons/day)	Red Arrow, WI Ensyn design	Food flavorings / chemicals
	1700 kg/hr (45 tons/day)	Red Arrow, WI Ensyn design	Food flavorings / chemicals
	20 kg/hr (0.5 tons/day)	VTT, Finland Ensyn design	Research / Fuels
Rotating Cone	200 kg/hr (5.3 tons/day)	BTG, Netherlands	Research / Fuels
Vacuum	3500 kg/hr (93 tons/day)	Pyrovac, Canada	Pilot scale demonstration / Fuels
Other Types	350 kg/hr (9.3 tons/day)	Fortum, Finland	Research / Fuels

Tabla 10 - Empresas comerciales que emplean pirólisis. NREL

Todas estas empresas, con modificaciones, presentan un diagrama de procesos muy similar al del proyecto:

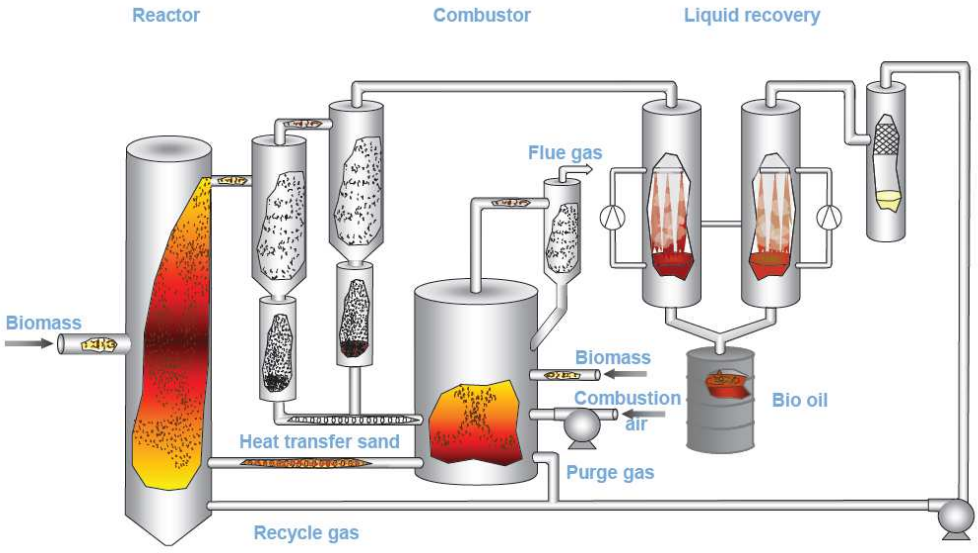


Figura 28 - Pirólisis de biomasa. VTT.

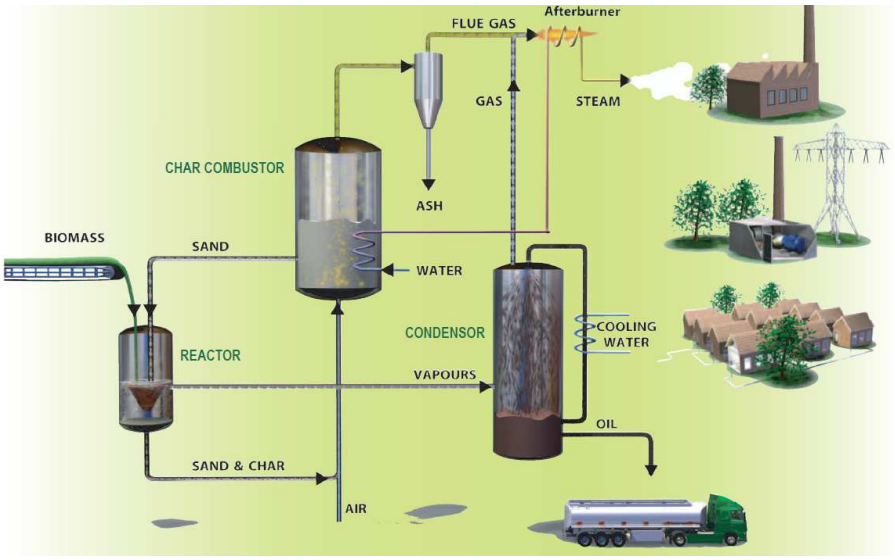


Figura 29 - Pirólisis de biomasa. BTG.

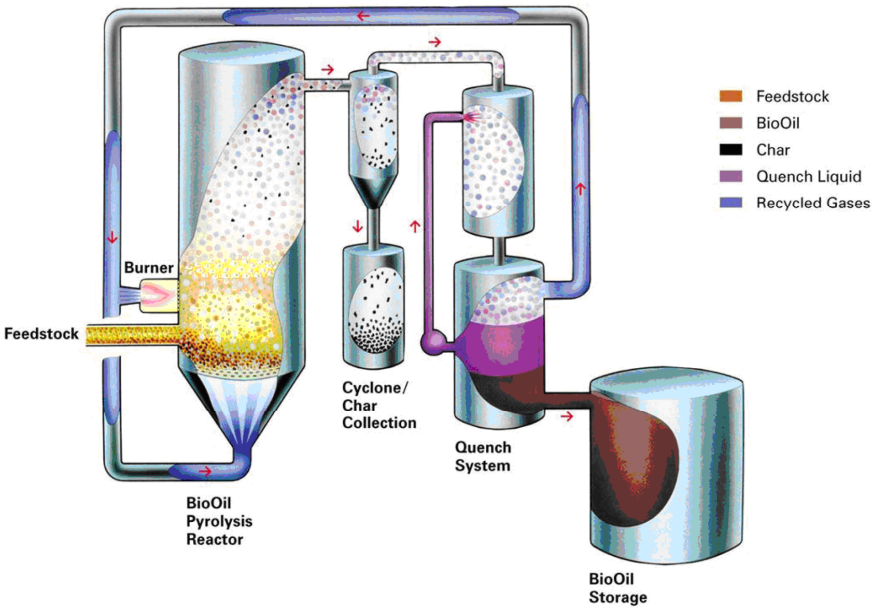


Figura 30 - Pirólisis de biomasa. Dynamotive.

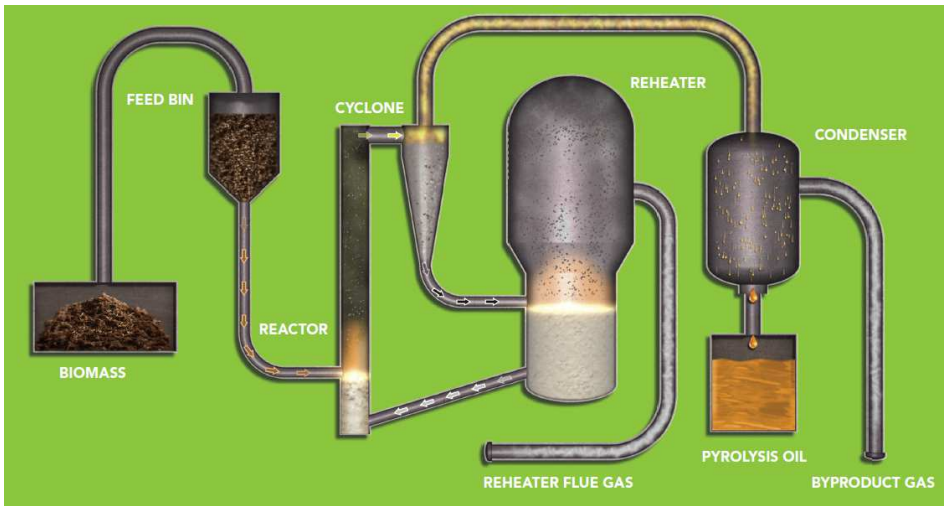


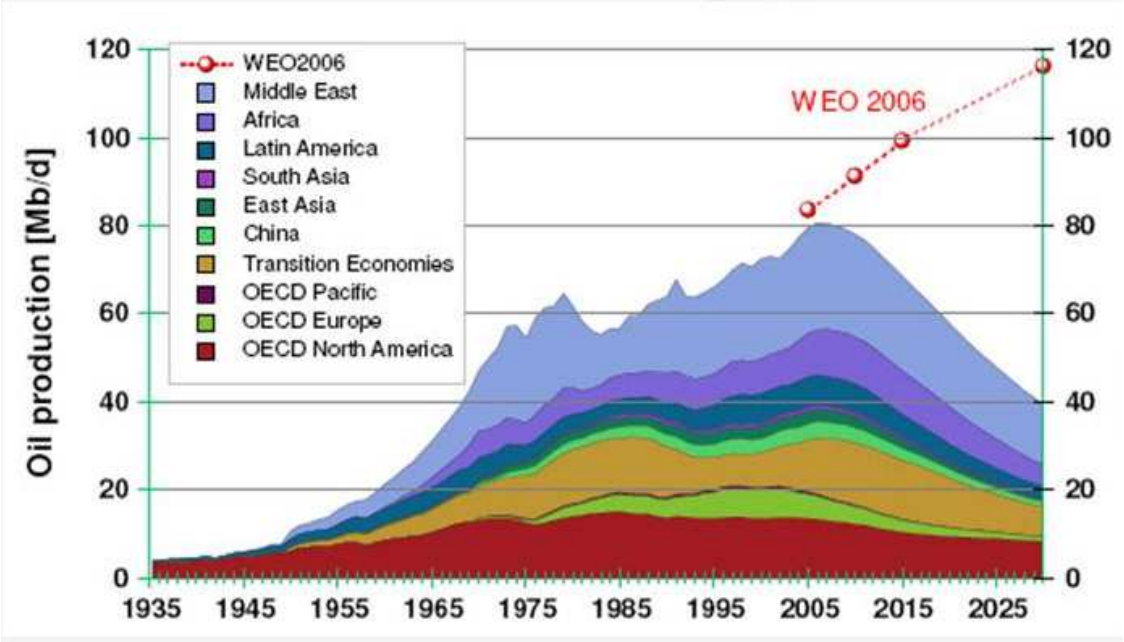
Figura 31 - Pirólisis de biomasa. Envergent

Otras empresas que sí depolimerizan térmicamente residuos plásticos son Cynar, Agilyx, Alphakat, Polymer Energy, etc., pero se encuentran en estados tecnológicos más prematuros (plantas piloto o demostración).

2.2.3. Justificación económica:

La utilización de la pirólisis como pretratamiento antes de la combustión a alta temperatura posee justificaciones ambientales y económicas, especialmente si se potencia la política de restricción en el uso de los vertederos y en la recuperación de materiales a partir de los residuos.

El plástico es un producto creado a partir del petróleo, el cual es un recurso no renovable y cada vez estará más cerca el día en que sus reservas se agoten:



Gráfica 32 - Evolución de la producción de petróleo en el tiempo. Agencia Internacional de la Energía.

La línea representa la previsión energética mundial, donde se prevé que la demanda de petróleo aumentará de 85 millones de barriles al día hasta unos 120 en 2030. Esto implica que la demanda de petróleo será mayor que aquel producido el cual cada vez escaseará más, y serán necesarias otras fuentes de energía para abastecer la población mundial (i.e. renovables). A día de hoy puede resultar poco económico mientras exista el petróleo, pero la incentivación de empresas de procesado termoquímicos de residuos para producción de energía eléctrica y aceites pirolíticos podría ayudar a suavizar la perspectiva si los gobiernos le dedicaran la atención necesaria.

Ya actualmente existe cierta concienciación, y por obtener dicho rendimiento energético a partir de un residuo existen diversas bonificaciones económicas en el marco legislativo (ver además anexo D – Trámites administrativos, el apartado de Subvenciones y ayudas):

- En España, la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial se caracteriza por la posibilidad de que su régimen retributivo se complemente mediante la percepción de una prima en los términos que

reglamentariamente se establezcan. Según el R.D. 661/2007, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, en su artículo 2.1 dice “Podrán acogerse al régimen especial establecido en este real decreto las instalaciones de producción de energía eléctrica contempladas en el artículo 27.1 de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre:

Subgrupo a.1.4. Resto de cogeneraciones que incluyen como posibles combustibles a emplear, gases residuales de refinería, coquería, combustibles de proceso, carbón y otros no contemplados en los subgrupos anteriores.”

- En España, se realizaron inversiones en el periodo 2000-2003 para la ejecución de las medidas correspondientes al I Plan Nacional de Residuos Urbanos (I PNRU). De estos valores puede deducirse que en los cuatro primeros años de vigencia del I PNRU, se ejecutó el 74,60 % del total de las inversiones previstas para el periodo 2000-2006, entre las que destacan las realizadas en el Programa Nacional de Compostaje, Recuperación y Reciclaje, Valorización Energética y Eliminación. Las CC.AA. que realizaron mayores inversiones fueron Madrid, Cataluña y Andalucía.

  Por otro lado, en la versión Preliminar del PNIR 2008-2015 en su Anexo 1 se encuentra el presupuesto fijado para este periodo de tiempo. En él se puede observar que la mayor parte de las inversiones previstas van destinadas a los programas de prevención y reciclaje (36 y 22 %, respectivamente), centrándose principalmente en el desarrollo de una red más amplia de puntos limpios, el apoyo a los programas de I+D+i y el reciclaje de residuos de envases y residuos biodegradables.

- En Andalucía, el Consejo de Gobierno ha aprobado el *Plan Director Territorial de Gestión de Residuos no Peligrosos de Andalucía 2010-2019*, que prevé unas inversiones de 2.184 millones de euros para construcción y mejora de instalaciones, así como para alcanzar en la comunidad autónoma

el objetivo de las 'tres R' (reducir la producción, reciclar lo recogido y reutilizar y revalorizar el resto). Por otra parte, el Consejo de Gobierno ha autorizado a la Agencia Andaluza de la Energía (AAE) una inversión de 55,16 millones de euros durante los próximos cuatro años para apoyar proyectos de mejora de la eficiencia energética; implantación de instalaciones de energías renovables y producción eléctrica en *régimen especial* mediante tecnologías innovadoras; biocombustibles y logística de biomasa; transporte, distribución y transferencia de energía, sustitución de combustibles tradicionales por otros sostenibles, etc. Con la cantidad aprobada, las líneas de ayudas de este organismo sumarán un total de 398,1 millones en el periodo 2005-2013 para las iniciativas acogidas en la Orden del 4 de Febrero 2009 de *Incentivos al Desarrollo Energético Sostenible*:

PROYECTOS INCENTIVABLES		SUBCATEGORÍAS
OBJETO	CATEGORÍAS	
PROYECTOS ENERGÉTICOS RELACIONADOS CON LA MEJORA DE LA PROTECCIÓN AMBIENTAL		
2.1. Ahorro y eficiencia energética	2.1.1. Proyectos de ahorro y eficiencia en procesos o equipos 2.1.2. Proyectos de ahorro y eficiencia en edificios y sus instalaciones 2.1.3. Proyectos de ahorro y eficiencia en instalaciones de alumbrado exterior 2.1.4. Proyectos de ahorro y eficiencia en transporte 2.1.5. Sustitución de combustibles o energías tradicionales por otros menos contaminantes	Proyecto integral Contrato de servicios energéticos Relevancia del ahorro energético Actuaciones para uso público o que den servicio a una comunidad o colectivo Especial interés ambiental
2.2. Instalaciones de energías renovables	2.2.1. Producción de electricidad 2.2.2. Producción de energía térmica 2.2.3. Producción conjunta de electricidad y energía térmica 2.2.4. Producción y/o logística de biomasa y biocombustibles	Proyecto integral Contrato de servicios energéticos Ecoinnovación Grado de implantación de la tecnología usada en la zona geográfica o sector de actividad Generación distribuida en parques empresariales Especial interés ambiental
2.3. Instalaciones de aprovechamiento energético	2.3.1. Proyectos de cogeneración 2.3.2. Aprovechamiento de calor residual 2.3.3. Valorización energética de residuos no biomásicos	Proyecto integral Contrato de servicios energéticos Grado de implantación de la tecnología usada en la zona geográfica o sector de actividad Generación distribuida en parques empresariales Cooperación empresarial Especial interés ambiental
2.4. Estudios energéticos y acciones de difusión	2.4.1. Estudios para ahorro energético 2.4.2. Estudios para implantación de energías renovables 2.4.3. Auditorías y consultoría energéticas 2.4.4. Acciones de difusión	Estudios integrales de potencial de ahorro o energías renovables Compromiso de seguimiento y ejecución Aplicación a un municipio o proyectos con interés social supramunicipal Grado de desarrollo de la actuación objeto del estudio

Tabla 11 - Proyectos Incentivables. Fuente: BOJA.

2.2.4. Justificación ambiental:

Las razones por las que el proyecto es justificable ambientalmente son variadas, entre ellas:

- Disminución de la cantidad de residuos enviados a vertido en depósito controlado y, por tanto, mayor recuperación y valorización de los mismos.

- Producción de energía eléctrica, a partir de residuos. Ahorro anual de energías no renovables.
- Reducido consumo de agua, dada la integración con otros sistemas de la planta que permiten la recirculación y aprovechamiento de agua residual como agua de proceso. Si el agua consumida es posteriormente reutilizada, tras depuración, en los diferentes procesos, especialmente en la refrigeración, se trataría, por tanto, de una planta de vertido cero.
- Ahorro de emisiones de CO2, al evitar el consumo de recursos fósiles.

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

CAPÍTULO 3:

UBICACIÓN DE LA PLANTA

Una vez realizado el estudio de mercado (Anexo B), para la ubicación de la planta la alternativa más interesante es en el Parque de Actividades Medioambientales de Aznalcóllar (PAMA), en la provincia de Sevilla. Dicho parque industrial se encuentra a aproximadamente 1 km al Suroeste del Municipio de Aznalcóllar, con las coordenadas siguientes: X: 743.374, Y: 4.154.406. Según la disponibilidad de terreno existente en el parque industrial a la fecha de realización del proyecto, se ha seleccionado la parcela nº 56 de la manzana 3, en la calle El Matorral, con una superficie de 17.953 m^2.

Según datos de anteriores de ofertas de suelo industrial en el PAMA, con titularidad de la Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía (IDEA), se estima el precio del suelo industrial por metro cuadrado en 45 €, por lo que el precio de la parcela (17.953 m^2) sería de 807.885 €. En el Anexo 3 se detallan las características de la zona.

Los factores tenidos en cuenta para seleccionar esta ubicación son los siguientes:

- La situación geográfica del PAMA, a 30 km. de Sevilla, lo convierte en un emplazamiento clave desde el punto de vista estratégico. El fácil acceso a esta zona del área metropolitana, el precio competitivo de las parcelas y la adaptación a las actividades medioambientales, energéticas y otras, hacen del PAMA un espacio capaz de generar oportunidades para las empresas de los sectores emergentes.

Figura 33 - Situación del PAMA. Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía.

- Estos terrenos fueron propiedad de la empresa minera *Bolidén*, y después del desastre medioambiental provocado por la rotura de la balsa de residuos mineros, pasaron a titularidad de la Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía, la cual intenta restaurar la zona acogiendo a empresas del sector medioambiental, y ofreciendo suelo industrial a muy buenos precios, en este caso se estiman de 45 €/m^2.

- El PAMA está próximo al acceso de la autovía A-49 (15 km), que comunica Huelva con Sevilla, y con ello se facilita la conexión a estas dos grandes aglomeraciones urbanas. La zona metropolitana de Sevilla es de los principales puntos generadores de residuos plásticos de envases, por lo que un gran número de plantas de clasificación, recuperación, y transferencia se ubican en la zona. El nuevo trazado de la autovía SE-40 (en construcción), hace que esta ubicación sea favorable para trabajar en el ámbito metropolitano de Sevilla, facilitando los accesos y tiempos de viaje tanto en transporte de residuos plásticos a la planta como en la distribución de los distintos productos que salgan. La proximidad al acceso a la A-66, autovía de la plata, facilita la conexión con regiones situadas al norte.

- Hay una proximidad a los principales puntos de acopios de residuos plásticos agrícolas, distribuidos por municipios de Huelva, Sevilla y Cádiz, y así se reducen los costes de transporte y las emisiones de CO_2.

- De igual forma es favorable la conexión con la zona industrial de Huelva (aproximadamente a 90 km) para un posible comercio de los productos generados en refinerías y cogeneradoras, y con el área metropolitana de Sevilla, para venderle productos a empresas que trabajen con alquitrán.

- De cara a la venta de electricidad producida por los motores de cogeneración, existen líneas eléctricas próximas de 400 KV y 220 KV, a las que se podrían transferir dicha electricidad, tal y como se ve en el plano del anexo 6.

- En el mismo parque industrial se localizan empresas del sector medioambiental de la gestión de residuos, que podrían prestar servicios a la planta: transferencia de residuos plásticos agrícolas, tratamiento de lodos de depuradora, de neumáticos fuera de uso, de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, regeneración de aceites usados, etc.

- En el ámbito geográfico andaluz, La Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía concede incentivos a proyectos o actuaciones empresariales que tengan por finalidad el fomento de la innovación y el desarrollo empresarial en Andalucía y que contribuyan a la creación y/o al mantenimiento del empleo estable, entre los que se encuentran los del sector medioambiental. El reciclaje químico de plásticos reúne con creces las características de un proyecto innovador en el sector del reciclaje.

- Es una zona donde no existen masas de aguas subterráneas, o con sustrato permeable. No existen espacios naturales protegidos en la ubicación de la planta ni yacimientos arqueológicos.

CAPÍTULO 4:

DEFINICIÓN DEL PROYECTO

Objeto

El objeto del proyecto es el dimensionado de la unidad pirolítica de una planta de valorización energética de residuos plásticos en Aznalcóllar (Sevilla). La unidad pirolítica está conformada por el reactor de lecho fluidizado, un ciclón y un intercambiador de calor de carcasa y tubos.

Ámbito de actuación

La planta se va a instalar en la provincia de Sevilla, y el radio de acción engloba la propia provincia y las colindantes, conformando Andalucía Occidental: Sevilla, Huelva y Cádiz.

Materia prima

La materia prima usada es cualquier residuo plástico de procedencia urbana, industrial, agrícola, construcción, automoción, etc. El tipo de residuos plásticos para el que se ha diseñado el proyecto de la unidad pirolítica es para el PEAD, aunque también puede añadirse cualquier otro sintetizado por adición (al ser este grupo susceptible de craquearse térmicamente) como son otras poliolefinas (PEBD,PP), o resinas vinílicas (PVC). Para este último plástico habría que incorporar una etapa de separación del ácido clorhídrico posterior a la pirólisis para así evitar la formación de dioxinas en caso de cogeneración (por ejemplo con un scrubber).

Proveedores de materia prima

La materia prima es suministrada fundamentalmente por dos fuentes: las primeras son las llamadas “plantas de transferencia de residuos”, donde se valorizan los residuos plásticos mediante separación y clasificación a partir de los residuos urbanos y los asimilables a urbanos. La otra fuente son los centros

de acopio de los residuos plásticos agrícolas, repartidos por la geografía agroindustrial andaluza. Existen otros posibles proveedores de residuos plásticos, los procedentes de la construcción y de la industria automovilística.

Tecnología utilizada

Tras una etapa de pretratamiento, se les aplica a los residuos una pirólisis térmica mediante un reactor de lecho fluidizado con arena, para luego realizar un postratamiento que separa gases de líquidos pirolíticos y poder obtener energía eléctrica de los gases mediante cogeneración, y aceites pirolíticos condensados. Así, según las condiciones del mercado vender los productos resultantes como electricidad, combustibles o materia prima para otros productos.

Capacidad de tratamiento

La planta puede tratar anualmente unas 15.000 toneladas de residuos plásticos de polietileno de alta y baja densidad, además de incluir PP y PVC con las modificaciones pertinentes para evitar la formación de dioxinas.

Productos generados

La pirólisis térmica generará una fracción gas no condensable, que se valorizará en una cogeneradora, y una fracción líquida de aceites pirolíticos, susceptible de venderse como combustible o para reformado en otros productos químicos.

Clientes potenciales

La energía eléctrica generada en la planta se puede vender a los clientes que la soliciten mediante su distribución por la red. Los productos combustibles generados (aceites pirolíticos) también pueden ser comercializados a plantas

de cogeneración para sustituir al gas natural o petroquímicas como materia prima.

Beneficios socioeconómicos

La actividad genera puestos de trabajo directos en la planta, e indirectos en servicios auxiliares (proveedores, transportistas, comerciales), contribuyendo con ello a levantar la economía de la zona con una tecnología novedosa y apoyada por la normativa europea y española a través de incentivos y subvenciones.

Principales impactos ambientales (residuos, vertidos y emisiones).

Aunque la actividad de la empresa se encuadre dentro de la actividad de gestión de residuos, es inevitable que genere algunos impactos ambientales. Estos son las emisiones atmosféricas procedentes en mayor parte del proceso de cogeneración y el horno que calienta al reactor, aguas residuales industriales procedentes de la etapa del lavado de los plásticos, cenizas procedentes del reactor de pirólisis, lodos del tratamiento de aguas residuales en la depuradora y residuos peligrosos con restos de hidrocarburos en menor cantidad.

CAPÍTULO 5:

MARCO LEGAL APLICABLE

Indice:

5.1. Normativa comunitaria……pág. 1

5.2. Normativa estatal……pág. 3

5.3. Normativa autonómica……pág. 6

5.4. Normativa municipal……pág. 7

5.5. Normativa técnica……pág. 7

5.6. Consideraciones sobre la ley RD 653/2003……pág. 8

5.1. Normativa comunitaria:

- Directiva 2008/98/CE sobre residuos:
  - Directiva 75/442/CEE, de 15 de julio de 1975, relativa a los residuos. Es la norma marco que sirve de base al desarrollo de las posteriores normativas europeas y nacionales.
  - Directiva 91/156/CEE, de 18 de marzo de 1991, por la que se modifica la Directiva 75/442/CEE, relativa a los residuos.
  - Resolución del Consejo, de 24 de febrero de 1997, sobre una estrategia comunitaria de gestión de residuos.
- Directiva 94/31/CE, de 27 de junio, que modifica a la Directiva 91/689/CEE, relativa a los residuos peligrosos.
- Reglamento (CE) nº 1013/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de junio, relativo a los traslados de residuos.
- Directiva 96/61/CE, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación (IPPC).
- Directiva del Consejo 1999/31/CE, 26 de abril, relativa al vertido de residuos, dirigida a limitar el vertido de determinados residuos.
- Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de diciembre de 2000, relativa a la incineración de residuos.
- Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa.
- Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de enero de 2008, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación.
- Decisión 2006/329/CE de la Comisión, de 20 de febrero de 2006, por la que se establece el cuestionario que se utilizará en los informes sobre la aplicación de la Directiva 2000/76/CE relativa a la incineración de residuos.

- Directiva 94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre, relativa a los envases y residuos de envases:
  - Directiva 2004/12/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de febrero de 2004, por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases.
  - Directiva 2005/20/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2005, por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases.
- Directiva 2002/96/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de enero de 2003 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.
- Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.
- Directiva 2000/14/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 8 de mayo de 2000, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre emisiones sonoras en el entorno debidas a las máquinas de uso al aire libre
- Decisiones de la Comisión, 2001/118, de 16 de enero de 2001; 2001/119, de 22 de enero de 2001; 2001/573, de 23 de julio de 2001, por las que se modifica la Decisión 2000/532/CE en lo que se refiere a la lista de residuos.
- Reglamento 2037/2000 Sobre sustancias que agotan la capa de ozono:
  - Reglamento 2077/2004 que modifica el Reglamento 2037/2000 sobre las sustancias que agotan la capa de ozono.
- Directiva 2008/68/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 24 de septiembre de 2008 sobre el transporte terrestre de mercancías peligrosas.
- Directiva 2004/8/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de febrero de 2004, relativa al fomento de la cogeneración sobre la base de la demanda de calor útil en el mercado interior de la energía y por la que se modifica la Directiva 92/42/CEE.

5.2. Normativa estatal:

- Ley 22/2011 de 28 de Julio, de residuos y suelos contaminados; traspuesta de la Directiva Europea 2008/98/CE sobre residuos, y que deroga la anterior Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos, traspuesta a su vez de la anterior Directiva Europea 91/156/CEE, donde se definen los diferentes tipos de residuo, se regulan las competencias en materia de recogida y tratamiento de los mismos y se enuncia la jerarquía de gestión de los mismos.
- Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.
- Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.
- Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases, que transpone la Directiva 94/62/CE.
- Real Decreto 782/1998, de 30 de abril, por el que se apruebe el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 11/1997, de Envases y Residuos de Envases.
- Real Decreto 252/2006, de 3 de marzo, por el que se revisan los objetivos de reciclado y valorización establecidos en la Ley 11/1997 y por el que se modifica el Reglamento para su ejecución.
- Ley 37/2003, de 17 de noviembre, de Ruido.
- Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental.
- Real Decreto 1367/2007 que desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, de Ruido.
- Real Decreto 212/2002, de 22 de febrero, por el que se regulan las

emisiones sonoras en el entorno debidas a determinadas máquinas de uso al aire libre.

- Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.
- Real Decreto 1315/2005, de 4 de noviembre, por el que se establecen las bases de los sistemas de seguimiento y verificación de emisiones de gases de efecto invernadero en las instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación de la Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.
- Real Decreto 1030/2007, de 20 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012.
- Decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico.
- Orden de 18 de octubre de 1976 sobre prevención y corrección de la contaminación industrial de la atmósfera.
- Ley 26/2007, de 23 de Octubre, de Responsabilidad Medioambiental.
- Real Decreto 2090/2008, de 22 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo parcial de la Ley 26/2007, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental.
- Ley 4/2007 que Modifica el texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo1/2001.
- Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.
- Real Decreto 833/1988 de 20 de julio por el que se aprueba el reglamento para ejecución de la ley 20/1986, de 14 de mayo, básica de residuos tóxicos y peligrosos.

- Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, por el que se modifica el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, de 14 de mayo, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos, aprobado mediante Real Decreto 833/1988, de 20 de julio.
- Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos.
- Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.
- Real Decreto 679/2006, de 2 de Junio, por el que se regula la gestión de los aceites industriales usados.
- Real Decreto 208/2005 sobre aparatos eléctricos y electrónicos y la gestión de sus residuos.
- Real Decreto 1/2001 Texto refundido de la Ley de aguas.
- Real Decreto 551/2006, de 5 de mayo, por el que se regulan las operaciones de transporte de mercancías peligrosas por carretera en territorio español.
- Ley 54/1997, de 27 noviembre, del Sector Eléctrico.
- Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.
- Real Decreto 616/2007, de 11 de mayo, sobre fomento de la cogeneración.
- Real Decreto 919/2006, de 28 de julio, por el que se aprueba el Reglamento técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos y sus instrucciones técnicas complementarias ICG 01 a 11.
- Real Decreto 393/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de Autoprotección de los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia.
- Real Decreto 2267/2004 de 3 de diciembre por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.

– Real Decreto 379/2001, de 6 de abril por el que se aprueba el Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias MIE-APQ-1, MIE-APQ-2, MIE-APQ-3, MIE-APQ-4, MIE-APQ-5, MIE-APQ-6 y MIE-APQ-7.

5.3. Normativa autonómica:

- Decreto 283/1995, de 21 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Residuos de la Comunidad Autónoma de Andalucía. (BOJA nº 161, de 19.12.95).
- Decreto 134, de 23 de junio de 1998, por el que se aprueba el Plan de Gestión de Residuos Peligrosos de Andalucía.
- Acuerdo de 3 de agosto de 2010, del Consejo de Gobierno, de formulación del Plan de Prevención y Gestión de Residuos Peligrosos de Andalucía (2011-2020).
- Decreto 99/2004, de 9 de marzo, de revisión del Plan de Gestión de Residuos Peligrosos de Andalucía, Plan de prevención y gestión de residuos peligrosos de Andalucía, 2004-2010.
- Decreto 218/1999, de 26 de octubre, por el que se aprueba el Plan Director Territorial de Gestión de Residuos Urbanos de Andalucía. (BOJA nº 134, de 18.11.99).
- Decreto 104/2000, de 21 de marzo de Andalucía, que regula las actividades de valorización y eliminación de residuos y gestión de residuos plásticos agrícolas.
- Ley 7/2007, de 9 de julio, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental.
- Decreto 356/2010, de 3 de agosto, por el que se regula la autorización ambiental unificada, se establece el régimen de organización y funcionamiento del registro de autorizaciones de actuaciones sometidas a los instrumentos de prevención y control ambiental, de las actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y de las instalaciones que emiten compuestos orgánicos volátiles, y se modifica el contenido del

Anexo I de la Ley 7/2007, de 9 de julio, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental.

- Decreto 297/1995, de 19 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Calificación Ambiental.
- Ley 2/2007, de 27 de marzo de fomento de las energías renovables y del ahorro y eficiencia energética de Andalucía.
- Decreto 279/2007, de 13 de noviembre por el que se aprueba el Plan Andaluz de Sostenibilidad Energética (PASENER 2007-2013).
- Decreto 74/1996, de 20 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento de Calidad del Aire.
- Decreto 23/2009, de 27 de enero, por el que se establece el marco regulador de las ayudas a favor del medio ambiente y del desarrollo energético sostenible que se concedan por la Administración de la Junta de Andalucía.
- Orden de 4 de febrero de 2009, por la que se establecen las bases reguladoras de un programa de incentivos para el desarrollo energético sostenible de Andalucía y se efectúa su convocatoria para los años 2009-2014.

5.4. Normativa municipal (Aznalcóllar):

- PGOU de Aznalcóllar con fecha de publicación 18 de marzo de 2002, y se aprueba el documento complementario CE/AD del 26 de septiembre de 2008, con fecha de publicación en el BOJA el 28 de enero de 2009.
- Ordenanza municipal de vertidos de Aznalcóllar.

5.5. Normativa técnica:

ISO 15270:2008: Plásticos. Guía para la recuperación y el reciclaje de residuos plásticos.

UNE-EN 13437:2004: Envases y embalajes y reciclado de material. Criterios para los métodos de reciclado. Descripción de los procesos de reciclado y diagramas de flujo.

UNE-EN 15347:2007: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de residuos plásticos. (Versión española de EN 15347: 2007, Prueba de Composición).

UNE-EN 15344:2007: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de reciclados de polietileno (PE).

UNE 53978:1997 EX: Plásticos. Materiales de polietileno (PE) reciclado. Características y métodos de ensayo. (Revisada, en Información Pública).

UNE-EN 15345:2007: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de reciclados de polipropileno (PP).

UNE 53972:1996 EX: Plásticos. Polipropileno (PP) reciclado. Características y métodos de ensayo. (Revisada, en Información Pública).

UNE-EN 15346: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de reciclados de poli(cloruro de vinilo) (PVC). (Versión española de EN 15346: 2007, Prueba de Composición).

UNE 53979:2001: Plásticos. Poli(cloruro de vinilo) (PVC) reciclado. Características y métodos de ensayo. (Revisada, en Información Pública).

UNE-EN 15342:2007: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de reciclados de poliestireno (PS).

5.6. Consideraciones sobre la ley RD 653/2003, de incineración de residuos:

En la redacción de la Directiva 2000/76/CE (de la que se ha traspuesto el R.D. 653/2003) se realizó una simplificación conceptual de las instalaciones de gasificación, plasma y pirólisis que pueden impedir el desarrollo de estos procesos en su aspecto mas prometedor, como forma alternativas de obtención de un combustible gaseoso alternativo al gas natural.

El artículo 3.4 del mismo, al definir las instalaciones de incineración incluye a todas aquellas en las que tienen lugar tratamientos térmicos de los residuos mediante operaciones de valorización o eliminación; dentro de estos

tratamientos térmicos incluye, explícitamente, la gasificación, la pirólisis y otros procesos de tratamiento térmico, como el proceso de plasma, en la medida en que todas o parte de las sustancias resultantes del tratamiento se destinen a la combustión posterior en las mismas instalaciones.

En el caso de procesos que dan lugar a combustibles para su uso externo debe analizarse detalladamente la calidad del combustible producido y su clasificación como residuo o como producto, porque esto condicionará, de forma determinante, las posibilidades de utilización real. En general, es posible la clasificación de este combustible como subproducto; la posible presencia de sustancias peligrosas en el subproducto no modificaría su status como subproducto, pero condicionaría las posibilidades de utilización en otras instalaciones.

El punto 8.1.b) establece las temperaturas mínimas de tratamiento térmico, (850 ºC o 1150 ºC, según el contenido de cloro orgánico de los residuos), y el tiempo de permanencia de los gases de combustión a esta temperatura, (2 segundos). Esta imposición está relacionada con la presencia de determinados contaminantes, especialmente de dioxinas y furanos, en los gases emitidos a la atmósfera desde las instalaciones de tratamiento térmico de residuos, procedentes de los propios residuos.

¿Qué sucede a las plantas de pirólisis?

En general, la temperatura de los gases en las planta de pirólisis es inferior a los límites mínimos señalados en el Real Decreto 653/2003 y las condiciones dentro de los reactores de tratamiento tampoco son favorables a la destrucción de los contaminantes señalados. En consecuencia, no podrá asegurarse que los gases de salida de los reactores están exentos de estos contaminantes, especialmente si están presentes en los residuos tratados.

A efectos del cumplimiento de las condiciones operativas, y en tanto se incinere la totalidad del gas producido en un sistema convencional, debería bastar que en la etapa de incineración del gas crudo se cumplan la exigencia combinada de los valores mínimos de temperatura y tiempo de residencia, aunque las condiciones de funcionamiento en los reactores de pirólisis sean diferentes.

En definitiva, las plantas de pirólisis que incineren sus propios gases deberán cumplir las condiciones de tiempo de residencia y temperatura establecidos por el Real Decreto 653/2003 en el sistema de incineración del gas crudo, no en el reactor de tratamiento.

Por tato se deriva la necesidad en artículo 8.1.d) de incluir un sistema de combustión de emergencia (antorchas), aguas abajo del sistema de depuración de gases, que permita el quemado completo del gas de síntesis cuando éste no pueda ser transferido a otras instalaciones para su valorización (principalmente por diseño adecuado de la instalación más que por exigencia del RD 653/2003).

CAPÍTULO 6:

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Indice:

6.1. Caracterización de materias primas……..pág. 1
6.2. Descripción del proceso global
6.2.1. Recepción de material……..pág. 2
6.2.2. Almacenamiento……..pág. 3
6.2.3. Pretratamiento……pág. 3
6.2.4. Tratamiento…….....pág. 7
6.2.5. Postratamiento…….....pág. 13
6.2.6. Disposición de productos…….....pág. 15
6.3. Descripción de la unidad pirolítica
6.3.1. Reactor de lecho fluidizado……pág. 18
6.3.2. Ciclón……..……pág. 24
6.3.3. Intercambiador de calor…….....pág. 25
6.3.4. Diseño de la Unidad de pirólisis……pág. 27

6.1. Caracterización de materias primas:

Empleando el código de la Lista Europea de Residuos (código LER) los tipos de residuos plásticos que la empresa va a recibir son:

SECTOR DE GENERACIÓN RESIDUOS PLÁSTICOS	CÓDIGO LER	DESCRIPCIÓN
Residuos plásticos agrícolas	020104	0201: Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca. 020104: Residuos de plástico (excepto embalajes).
Residuos plásticos industriales	12 01 05	12 01: Residuos del moldeado y tratamiento físico y mecánico de superficie de metales y plásticos 12 01 05 Virutas y rebabas de plástico
Residuos plásticos urbanos	150102	1501: Envases (incluidos los residuos de envases de la recogida selectiva municipal). 150102: Envases de plástico.
Residuos plásticos de automóviles	160119	1601: Vehículos de diferentes medios de transporte (incluidas las máquinas no de carretera) al final de su vida útil y residuos del desguace de vehículos al final de su vida útil y del mantenimiento de vehículos. 160119: Plástico.
Residuos plásticos de la construcción	170203	17: Residuos de la construcción y demolición. 1702: Madera, vidrio y plástico. 170203: Plástico.
Residuos del tratamiento de residuos	191204	19 12: Residuos del tratamiento mecánico de residuos (por ejemplo, clasificación, trituración, compactación, peletización) no especificados en otra categoría. 19 12 04 Plástico y caucho

Tabla 12 - Codificación y descripción de residuos plásticos. Código LER.

Una de las aplicaciones de los residuos plásticos es su aprovechamiento energético, por lo que a continuación se exponen los poderes caloríficos de los diferentes plásticos a tratar y se comparan con el del gas natural, combustible habitual de las cogeneradoras.

TIPO DE COMBUSTIBLE	PODER CALORÍFICO (kJ/kg)
POLIETILENO	40.000-44.000
POLIPROPILENO	43.000-44.000
PVC	~18.900
GAS NATURAL	39.000-44.000

Tabla 13 - Poderes caloríficos de los residuos plásticos usados. Fuente: Cicloplast.

6.2. Descripción del proceso global:

6.2.1. Recepción de material:

Los residuos plásticos agrícolas y de envases urbanos vendrán comprimidos en balas y transportados en camiones desde los puntos de recogida, de clasificación y de transferencia, y se dispondrán en la zona de recepción para posteriormente ser llevados mediante carretillas elevadoras a la zona de almacenamiento.

Imagen 1 - Plásticos apilados. Ecoembes.

Previamente a su almacenamiento, los camiones pasan por una báscula industrial para tener un control de la cantidad de materia prima que entra en la planta.

6.2.2. Almacenamiento:

Los operarios colocan ordenadamente los palés con las balas de residuos plásticos desde los camiones hasta la zona de recepción usando carretillas, luego se colocan ordenadamente en la nave de almacenamiento. Debido al carácter combustible de estos residuos, se ha de preparar medidas de seguridad contra posibles incendios.

Imagen 2 - Vista nave almacenamiento. Cicloplast.

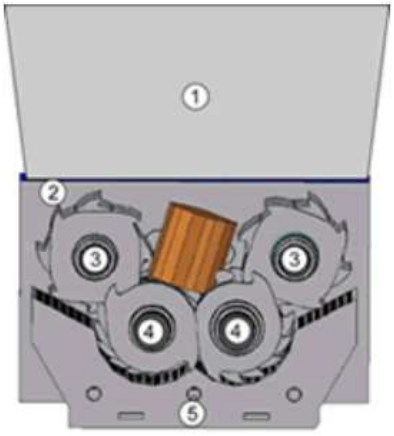
6.2.3. Pretratamiento:

Cuanto más limpios, triturados y secos estén los residuos de partida, mejor será la calidad de los productos obtenidos del tratamiento:

a) Mezcla de plásticos: el proceso de pirólisis permite el craqueado térmico del tipo de plástico producido por reacciones de “adición”, las cuales incluyen las poliolefinas (PEAD, PEBD, PP) y los vinílicos (PVC). Todos estos plásticos son los que la planta recibe en palés, por lo que en función de las cantidades almacenadas se pueden mezclar en diferentes proporciones, para así regular el flujo de procesamiento.

b) Triturado: facilita su posterior lavado y favorece la transmisión de calor y de humedad para así reducir la energía necesaria para evaporarla. De lo contrario se producirán pérdidas energéticas significativas, disminuyendo el rendimiento de la gasificación y aumentando la producción de alquitranes. Además, en el reactor deben mezclarse con un lecho en fluidización, y se trituran para homogeneizarse mejor.

   Para ello, los residuos se disponen en unas cintas transportadoras donde usando una ducha de agua se separan groseramente partículas de cierto volumen que pueden dañar las cuchillas de la trituradora: pequeñas piedras, tierra y cualquier sólido que inicialmente pueda estar adherido a las paredes de los recipientes, en su interior o mezclados con ellos. Entonces los plásticos pasan a una tolva y caen hacia unas cuchillas de acero indeformable de grandes dimensiones, y unas rejillas seleccionadoras que se reemplacen fácilmente para variar la dimensión del plástico triturado.



1. Tolva.
2. Garfios.
3. Cantos agudos.
4. Fresas.

Figura 34 - Detalles trituradora de plásticos. Fuente: Trituradores industriales ISVE.

c) Lavado: gran parte de los residuos plásticos procede del ámbito agrícola, donde el contacto con la tierra, los pesticidas y los fertilizantes es elevado hasta el punto de que a veces suelen contener un 70% de su peso en estas

impurezas, las cuales pueden aumentar una producción indeseable de cenizas o peor aún, gases peligrosos no deseados al descomponerse. Por otro lado, los residuos plásticos de envases traen etiquetas que se deben retirar, y muchas veces traen altas cantidades de productos químicos o materia orgánica.

Se introducen los trozos triturados en un tanque de lavado continuo constituido por un tambor cilíndrico rotatorio de rejilla que se encuentra parcialmente sumergido en agua. Para facilitar el lavado de los residuos plásticos se añade una cierta cantidad de detergente. El giro del tambor, que posee en su interior un tornillo sinfín, agita en el agua a los trozos de plástico y los hace avanzar a lo largo del tanque durante el tiempo que sea necesario para conseguir un lavado efectivo. El tiempo de lavado va a depender de la longitud de la hélice del sinfín y de la velocidad de giro del tambor.

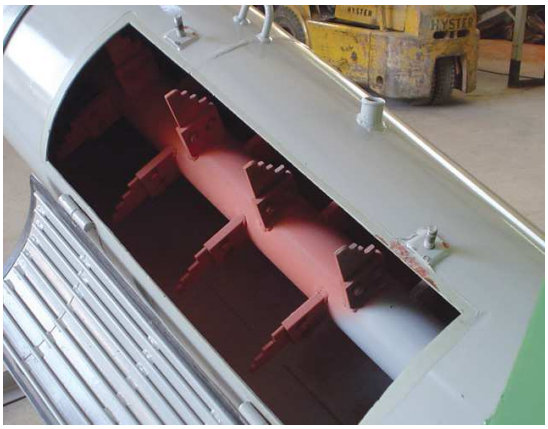


Imagen 3 – Tambor rotatorio con hélice para lavado de plásticos. Elreciclajedeplástico.com

d) Secado: el proceso de pirólisis se hace en ausencia de oxígeno, los trozos de plástico triturados y lavados deben entrar secos en el reactor para evitar la formación de vapor con el incremento de temperatura. Una de las formas de secado es aplicarles un centrifugado introduciéndolos en un tambor

cilíndrico de malla metálica que gira gracias a una bomba centrífuga que mueve un eje acoplado al tambor.

Imagen 4 - Secadora por centrifugación. LANNER.

Se puede aprovechar el calor que desprenden las cogeneradoras si se encuentran próximas para así favorecer el proceso, ayudándose de ventiladores industriales que dirijan el flujo de aire caliente. También se puede hacer pasar a los residuos triturados la corriente de gases de combustión de otros procesos, que gracias a su calor residual eliminan el agua y además desplazan el oxígeno en la atmósfera previa a la entrada en el reactor.

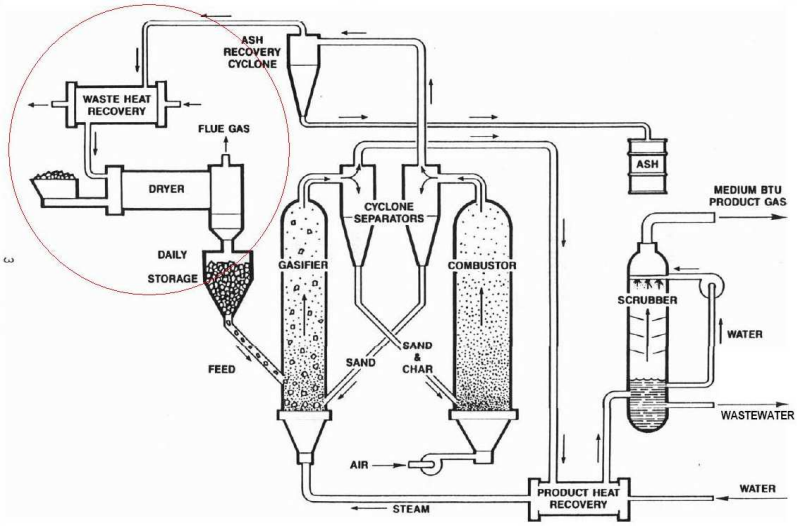


Figura 35 - Esquema proceso Battelle de gasificación.

6.2.4. Tratamiento:

a) Alimentación al reactor de pirólisis: los residuos plásticos triturados, limpios y secos se pasan a una cinta transportadora y se vierten en una pequeña tolva que conecta con la base inclinada de un tornillo sinfín accionado por una bomba. Es un dispositivo que permite el transporte de los residuos plásticos gracias a su hélice giratoria que los empuja hacia el interior del reactor de pirólisis.

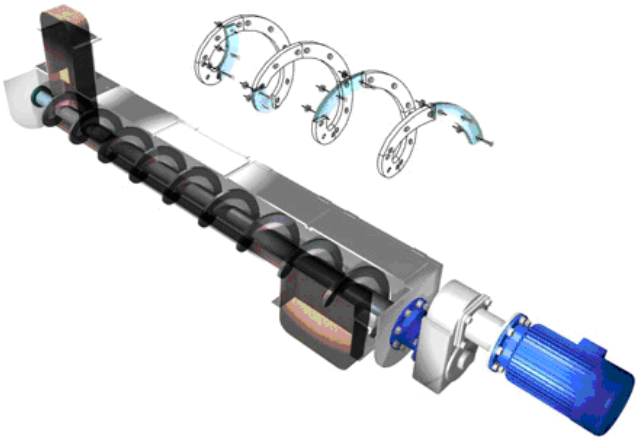


Figura 36 - Tornillo sin-fin.

Otro sistema es con un juego de depósitos que abren y cierran para así mantener el sistema anóxido. Es empleado en gasificadores con biomasa:

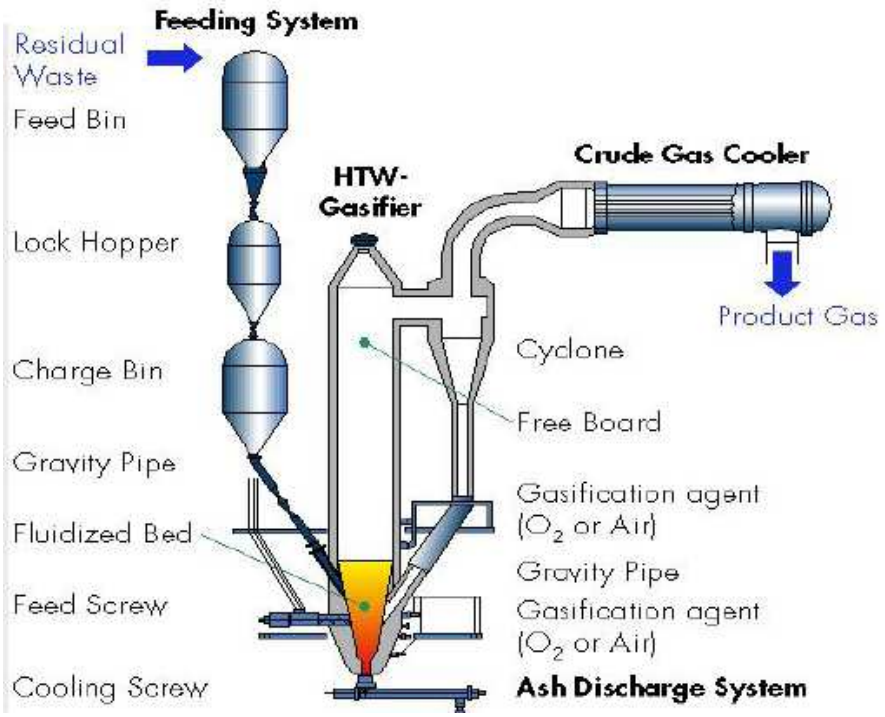


Figura 37 - Sistema de alimentación al reactor. Uhde.

b) Pirólisis de los plásticos en un reactor de lecho fluidizado: es un calentamiento a temperaturas entre los 400 y 800º C realizado en ausencia de oxígeno con una atmósfera inerte, y cuyo fin es la ruptura de las moléculas de los compuestos tratados, obteniéndose productos en diferentes fracciones líquidas, gaseosas y sólidas. No emite contaminación atmosférica como en la incineración al no haber presencia de oxígeno en el proceso. Un *reactor de lecho fluidizado* empleando arena para transferir el calor homogéneamente y un gas como elemento fluidizante, hace más eficaz el aprovechamiento de la energía suministrada al reactor al homogeneizar la temperatura.

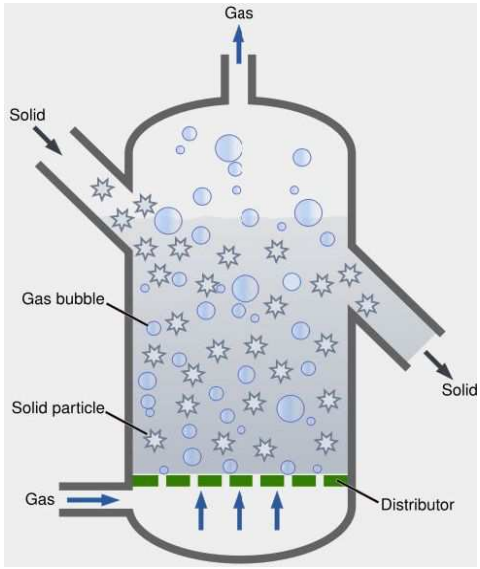


Figura 38 - Reactor de Pirólisis. YassineMrabet.

El gas fluidizante debe ser carente de oxígeno para impedir que los gases de pirólisis combustionen en una atmósfera oxidativa. Es recomendable también que el gas fluidizante esté precalentado antes de inyectarlo al reactor, para así favorecer el proceso de pirólisis, por lo que normalmente se hace es recircular parte de los gases de pirólisis como gases de fluidización.

El reactor es un depósito preferentemente de forma cilíndrica para facilitar la circulación de sólidos y gases y así evitar las zonas muertas; con una rejilla en su parte inferior para evitar que precipiten partículas y desde donde se inyecta el gas de fluidización. Tiene una abertura lateral para que entre la alimentación (los residuos plásticos desde el tornillo sinfín) y otras dos de salida; una arriba para que los gases que se van produciendo y el fluidizante salgan y otra lateral para que salgan las cenizas y el material no pirolizado. En el interior, el gas ascendente forma burbujas a través del medio de fluidización (arena) y va recogiendo los volátiles de los plásticos que se van craqueando debido a las altas temperaturas alcanzadas dentro.

La forma de craqueo molecular no está completamente predeterminada, sino que todos los enlaces químicos de cualquier estructura molecular

orgánica son susceptibles de ser rotos por efecto de la temperatura, aunque la probabilidad no sea la misma para todos. En general, cuanto más enérgicas son las condiciones de tratamiento, más homogéneos (y de mayor sencillez molecular) son los productos obtenidos. La mayor o menor presencia de cada una de las especies suele depender del tipo de materia prima, del tiempo de residencia de los volátiles formados y de la temperatura de operación, que es la variable usada para orientar los resultados del tratamiento hacia los productos deseados.

- Una corriente gaseosa, constituida por los componentes más volátiles separados por destilación y por las moléculas de menor tamaño procedentes del craqueo térmico de los componentes más complejos. Cuanto más severo es el tratamiento (a temperatura más elevada), mayor es la proporción de gases e hidrocarburos ligeros, correspondiendo a una mayor extensión de las reacciones de craqueo térmico.

- Una fracción líquida: corresponde a mezclas de compuestos de mayor peso molecular procedentes del craqueo térmico. Pueden estar constituidos por una gama muy elevada de compuestos orgánicos y los volátiles que se han evaporado en el horno sin modificación de su estructura molecular.

- Una fracción sólida: carbón pirolítico (coque), compuesto por todos aquellos materiales que no han sido transformados o que proceden de una condensación molecular; tienen un elevado contenido de carbón, junto con los componentes inertes de los residuos.

En el proyecto se trabaja a unas condiciones de pirólisis “flash” que no rinden productos sólidos, sino un 70% de gases y un 30 % de líquidos.

c) Horno calefactor del reactor: para que sea posible el craqueo térmico de los residuos plásticos se debe alcanzar en el interior elevadas temperaturas (740º C), por lo que si dentro no se producen reacciones exotérmicas de combustión el reactor debe calentarse exteriormente a través de un horno.

El horno convierte energía química (combustible) o eléctrica en calor, y se diseña en función del tipo de carga que se desee calentar, con qué tipo de energía se calienta y a qué temperatura se quiere llevar. Respecto a usar la propia electricidad producida en la planta, al ser una cogeneración en régimen especial sería más beneficioso venderla que gastarla, al tener una bonificación por primas en régimen especial

Debido a que se tiene que usar para calentar un reactor cilíndrico dentro del cual está el lecho fluidizado, se puede considerar similar a los hornos rotatorios y a los tubulares verticales, aunque con adaptaciones. En este caso, se van a considerar dos cilindros verticales concéntricos, y en el espacio entre ellos se introducirían haces de tubos enrollados que ascenderán desde abajo y por cuyo interior ascenderán los gases de combustión desde abajo que es donde se hará la combustión.

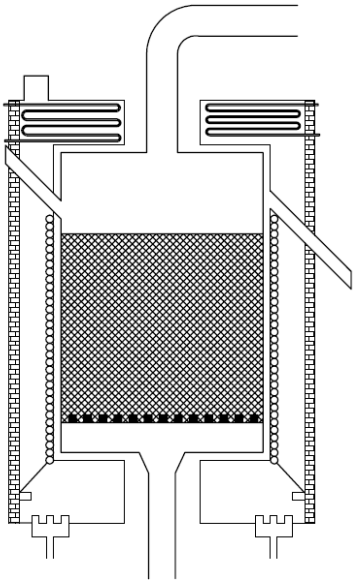


Figura 39 - Esquema de horno calefactor. Fuente: Elaboración propia.

Es importante que los gases calientes de combustión que abandonan el horno se aprovechen tanto como se pueda, de forma que tras calentar toda la longitud del reactor van a seguir ascendiendo hasta llegar a una zona llamada “de recuperación”, para aprovechar su calor residual. De esta forma, en la zona superior del horno justo antes de la chimenea se van a disponer dos cambiadores de calor tubulares por donde van a circular gases que sea conveniente precalentar:

d) Ciclón: debido al arrastre del gas de fluidización será inevitable que algunas partículas del lecho salgan con la corriente de los gases a su salida del reactor. Dichas partículas pueden perjudicar los equipos posteriores y acumularse en tanques de almacenamiento. Por eso se dispone este dispositivo en línea justo después del reactor, diseñado de forma que la corriente del gas sale impulsada hacia arriba mientras que las partículas sólidas son arrastradas hacia abajo. Este ciclón en concreto debe estar hecho de un material capaz de soportar las elevadas temperaturas de salida de los gases.

Figura 40 - Ciclón de flujo invertido.

6.2.5. Postratamiento:

a) Intercambiador de calor: de carcasa y tubos, se encarga de aprovechar el calor sensible que portan los gases de salida, bajándoles la temperatura de 740º C a 375º C para a su vez generar un vapor de agua a 5 atmósferas desde los 25 a los 170º C. A esta temperatura los aceites pirolíticos todavía no están a temperatura de condensación.

b) Aerocondensador del vapor de agua de los diferentes procesos: empresas grandes, de gran capacidad, se sitúan junto a ríos, lagos o mares y suelen montar grandes torres de refrigeración para las aguas de proceso. En este caso, el pequeño caudal de las aguas y la falta de aporte natural hace factible la instalación de aerocondensadores, que aunque consuman más electricidad, no gastan agua.

c) Torre de condensación de aceites pirolíticos: el rendimiento de los gases de hidrocarburos no condensables y los aceites producidos en la pirólisis van a depender de la extensión de craqueo que sufran los polímeros en el reactor, de forma que por las condiciones empleadas se espera una condensación del 30% del gas de pirólisis en aceites. Debido a que se ha realizado una pirólisis tipo “flash”, se supone que no favorece la formación de aceites pesados que precipiten en el tanque.

   Se va a utilizar para ello una “quench tower” o torre de enfriamiento, donde los gases de pirólisis calientes entran por la parte inferior y en su ascenso se ponen en contacto con una corriente de agua fría pulverizada que cae desde arriba. Los gases no condensables saldrán por su parte superior enfriados, arrastrando en su ascenso algo de vapor de agua y ácidos que se eliminarán posteriormente en una segunda torre “scrubber”. Los aceites que condensan en el ascenso del gas salen por abajo junto con el agua. Esta mezcla de agua y aceite de alquitrán lleva parte del calor cedido por

los gases de pirólisis en la torre, por lo que antes de enviarse al tanque de separación agua-aceites, puede hacerse circular por un intercambiador para pre-calentar otro fluido que nos convenga: el agua de lavado de residuos plásticos.

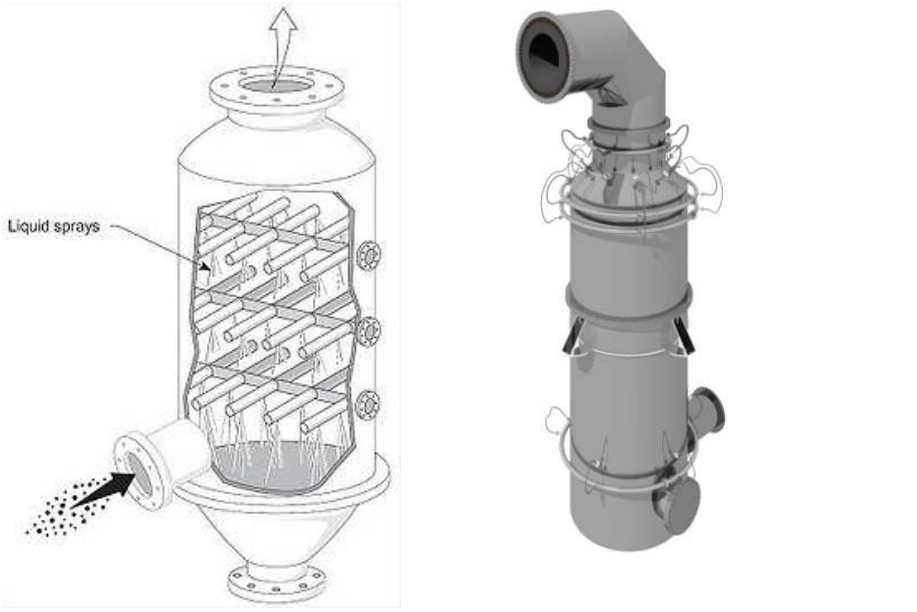


Figura 41 - Torre de condensación. Fuente: Airpol.

Existe otra forma de separación en la que no se mezclaría el agua con el condensado de aceites si ésta se hiciera pasar por unos tubos, pero entonces hay riesgo de que el condensado, debido a su viscosidad se acumulase y no circulara, por lo que se pone en contacto directo con el agua para que lo arrastre.

d) Tanque separador de aceites de pirólisis y agua: tras condensarse los aceites de pirólisis y salir de la torre de enfriamiento arrastrados con el agua, la mezcla pasa a un depósito donde las fracciones más pesadas precipitan al fondo (posibles PAH's, alquitranes, etc) y los aceites ligeros flotan sobre el agua. Posteriormente se recoge el alquitrán del fondo para gestionarlo como lodo peligroso. La fracción más ligera y se llevan a la unidad de envasado, y el agua con restos de hidrocarburos se conduce a la depuradora.

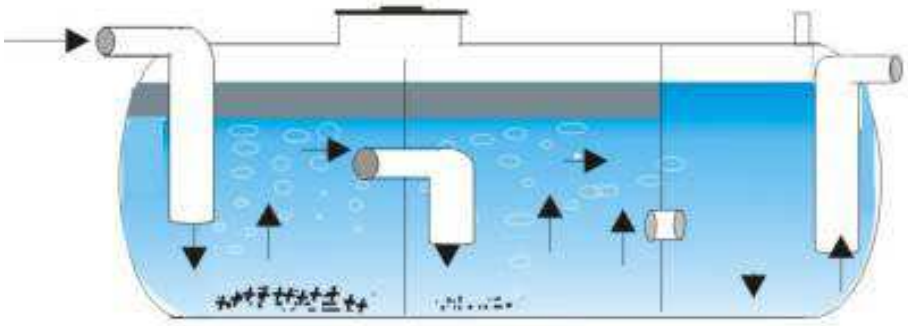


Figura 42 - Separador de hidrocarburos. Fuente: Repsol.

6.2.6. Disposición de productos:

a) Máquina envasadora de aceites de pirólisis: la fase ligera de aceites de pirólisis que flotaba sobre el agua en el separador de hidrocarburos lleva a un depósito con un dosificador, donde se van llenando bidones que se pueden almacenar para su almacenamiento en la planta o venta.

b) Cogeneración: debido al R.D. 653/2003, los gases de pirólisis deben ser sometidos al menos durante dos segundos a temperaturas de 850º C si no contienen compuestos clorados y 1100º si los contienen, por lo que se considera la mejor opción combustionarlos en la planta y así obtener energía eléctrica mediante equipos de cogeneración o motores de gas. La planta podría denominarse lo que es una instalación IPCC (Integrated Pyrolysis and Combined Cycle).

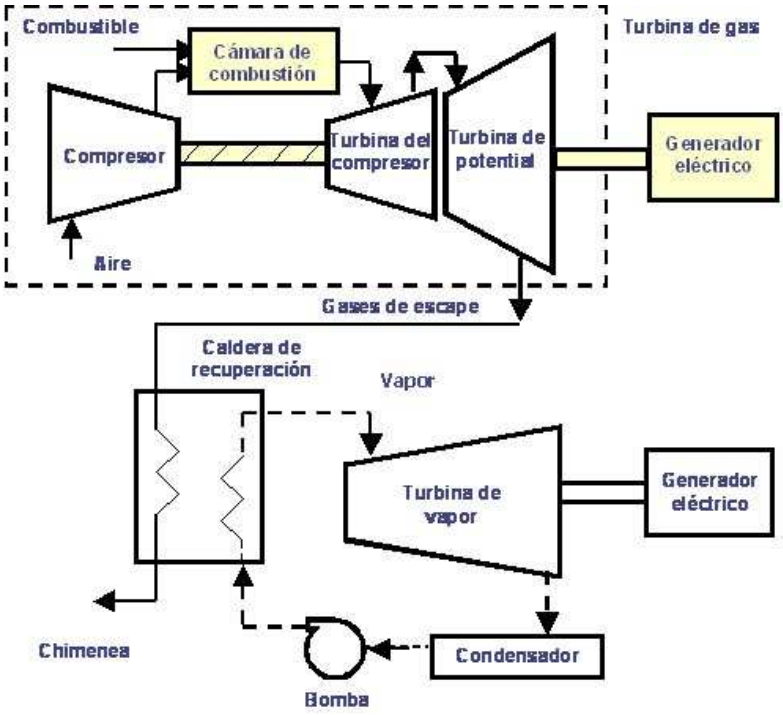


Figura 43 - Esquema de cogeneración en ciclo combinado. Fuente: Biblioteca SciElo.

En el proceso de cogeneración se obtiene energía eléctrica en dos etapas: en la primera los gases de pirólisis ayudados por un quemador combustionan en una cámara que aprovecha la liberación de energía para mover una turbina de gas y transformar la energía mecánica en eléctrica. La segunda etapa se hace en una caldera, donde los gases salientes de la combustión, muy calientes aún, circulan por dicha caldera que está llena de tuberías con una corriente de agua que se vaporiza y al salir a presión mueve otra turbina de vapor que también generará electricidad. Los gases de combustión, salen por una chimenea o se utilizan para secar los residuos triturados.

También se pueden emplear motores de gas, por ejemplo como los que la empresa General Electrics comercializa bajo el nombre “Jenbacher”. Incluye la chimenea para los gases fríos de combustión, una antorcha para purgar los posibles sobrantes del gas combustible y un filtro que evita emitir sustancias contaminantes a la atmósfera.

Imagen 5 - Motor de gas "Jenbacher". General Electrics.

La energía eléctrica generada por estos equipos, si se desea vender como otra posible opción, hay que adquirir un Centro Elevador de Tensión para poder introducirla y transportarla mediante una subida de tensión en la Red de Transporte a los diferentes clientes. Dicho elevador puede instalarse en la planta o enviar la electricidad producida directamente a uno de la compañía eléctrica en el exterior.

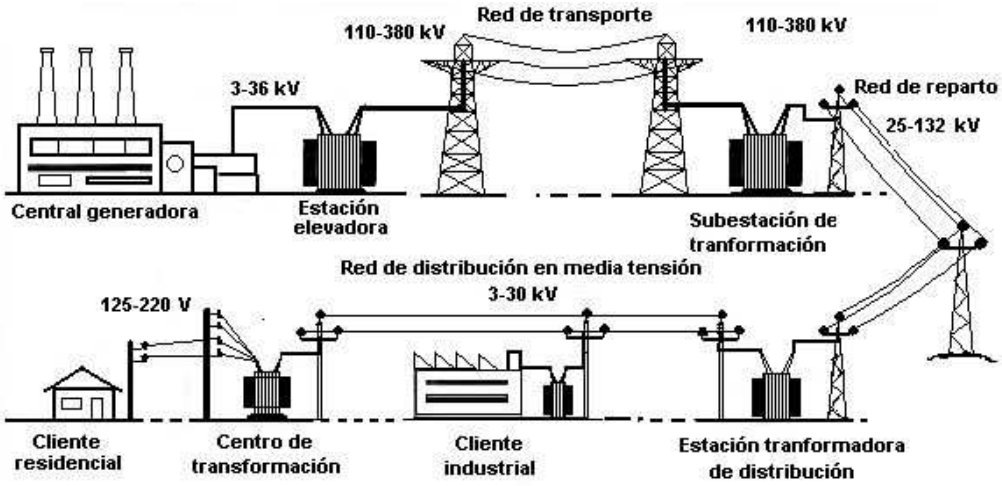


Figura 44 - Esquema de distribución de la energía generada en la planta. Fuente: General Electrics.

6.3. Descripción de la unidad pirolítica:

Se presenta a continuación una descripción detallada de las unidades del proceso proyectadas.

6.3.1. Reactor de lecho fluidizado:

a) Fenómeno de pirólisis en el interior del lecho fluidizado: para entender mejor el proceso, aunque el reactor trabaja isotérmico a 740º C, se va analizar el proceso de pirólisis de una muestra suponiendo un incremento gradual de temperatura:

- En un primer momento, los trozos de plástico son introducidos en el interior del reactor y llegan a mezclarse con el lecho, donde se calientan rápidamente. Debido a la transferencia de calor, la parte exterior de las partículas se calienta más rápidamente que el corazón de las mismas, convirtiéndose en partículas reblandecidas con un exterior pegajoso. Así, las partículas de arena del lecho se adhieren al plástico, formando un aglomerado polímero-arena cuyo interior está formado por polímero y cuyo exterior está constituido por partículas del lecho. El aglomerado puede estar formado por varias capas de material inerte del lecho unidas por partículas del polímero que todavía no se han volatilizado, o por el polímero degradado generado.

- Cuando la temperatura del medio se incrementa por encima del punto de fusión del plástico, se produce la rotura de los enlaces del mismo, situación que permite que el plástico fluya a través de las partículas de arena que forman la capa exterior del aglomerado. Dependiendo de la naturaleza del plástico y la presencia o no de plástico degradado, el paso del plástico a través de las partículas de la capa exterior puede conducir a dos situaciones:

- Calentamiento progresivo del polímero fundido, que llevará a la total rotura de los enlaces carbono-carbono de la cadena del polímero y comenzará el proceso de degradación por pirólisis.
- Defluidización del lecho debido al favorecimiento de la adhesión de nuevas capas de material del lecho, que podrían conducir a la formación de aglomerados de mayor tamaño.

- Al comenzar el proceso de pirólisis, la degradación del plástico tiene lugar en dos etapas repetitivas:
  - La primera etapa se produce en el lecho fluidizado del reactor, y se conoce como el craqueo primario. Es cuando el plástico genera los gases primarios y aceites/alquitranes.
  - La segunda etapa tiene lugar parcialmente en el lecho fluidizado, y en gran medida a lo largo del espacio libre del reactor, por encima del lecho, y se conoce como craqueo secundario. Los volátiles primarios de la etapa inicial que van ascendiendo por el reactor sufren más roturas de cadena. Cuanto más tiempo empleen los volátiles de la degradación primaria para abandonar el reactor, mayor será el efecto de craqueo secundario sobre ellos.

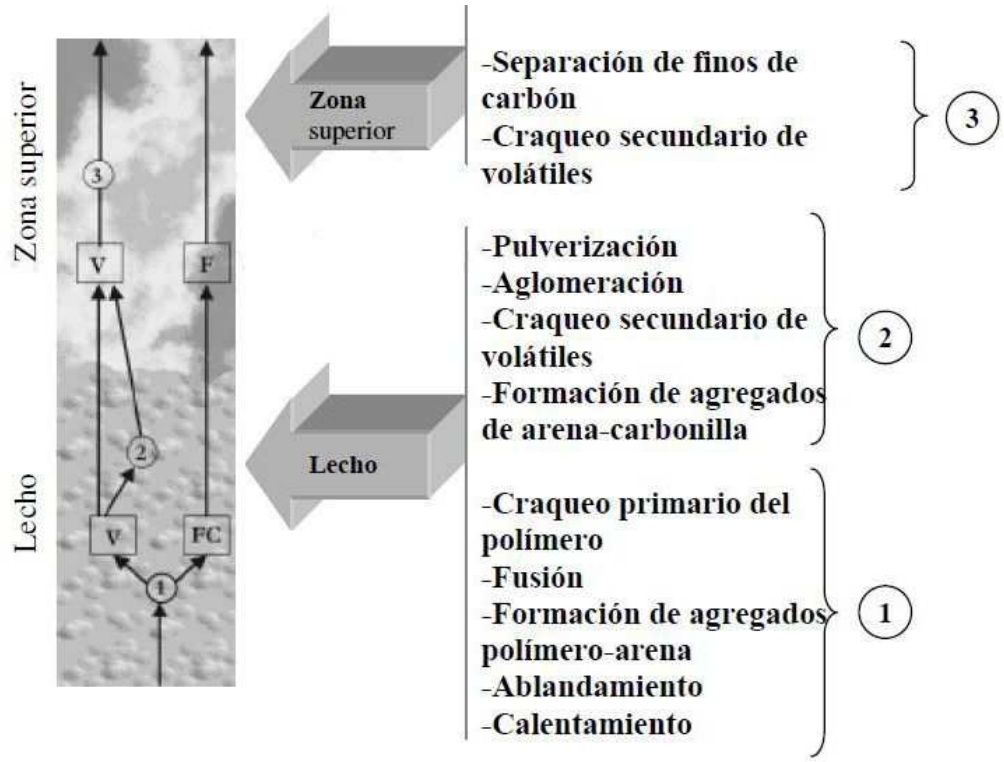


Figura 45 - Esquema de la pirólisis. Hernández. Tesis Doctoral Universidad de Alicante.

Las dos últimas etapas descritas antes se repiten sobre los residuos plásticos en intervalos de tiempo, de forma que se va degradando sucesivamente hasta que se consume en reacciones según la ilustración:

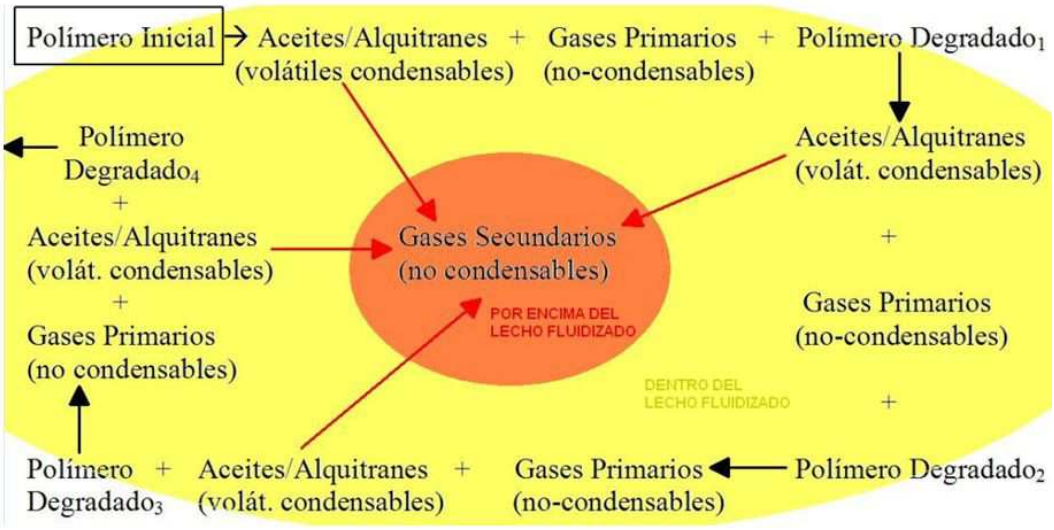


Figura 46 - Reacciones en el interior del reactor. Elaboración propia.

Considerando que se viera desde arriba, el área amarilla sería la zona inferior del reactor donde el polímero se va craqueando inicialmente y el área anaranjada sería la zona superior del reactor donde se producen las reacciones secundarias o directamente salen al exterior, según el tiempo de residencia. Una simulación en el reactor se representa por la siguiente figura:

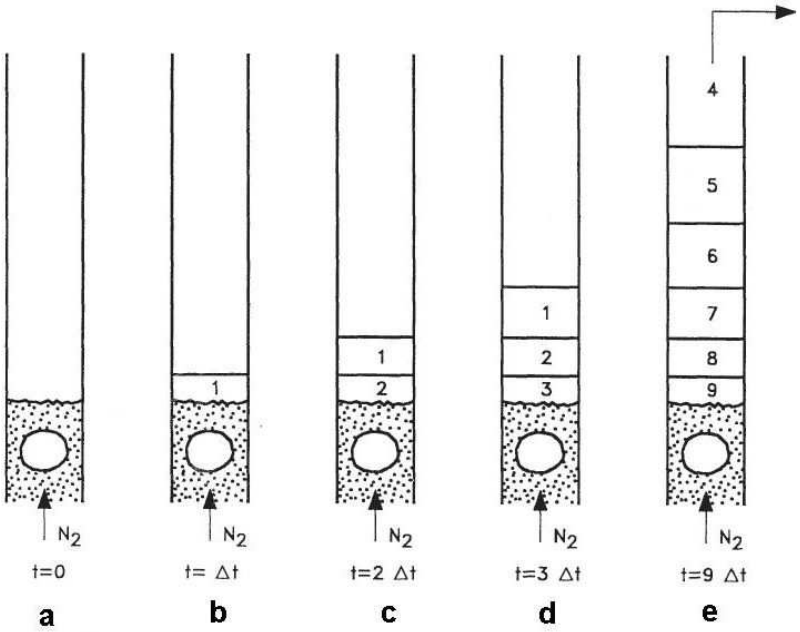


Figura 47 - Desarrollo de pirólisis en reactor de lecho fluidizado. Hernández. Tesis Doctoral Univ. de Alicante.

Como consecuencia de la reacción primaria que los plásticos sufren en el lecho de arena caliente, en un pequeño intervalo de tiempo, se genera una pequeña cantidad de volátiles ΔV_1 que es empujada por el gas fluidizante a través de la zona caliente del reactor, sobre el lecho fluidizado. En esta zona caliente, los volátiles se craquean como consecuencia de las reacciones secundarias y la mezcla se expande. En el siguiente Δt, se genera otro ΔV_2 abajo que, de nuevo, es empujado por el gas inerte hacia la zona superior del reactor. El ΔV_1 generado anteriormente continúa ascendiendo al ser empujado por la corriente del gas inerte y los nuevos volátiles generados. El proceso continúa hasta que la mezcla de plásticos se descompone prácticamente por completo y los correspondientes elementos de volumen generados abandonan el reactor.

En definitiva, los productos obtenidos en la pirólisis son una mezcla de hidrocarburos resultantes del craqueo primario junto con los generados en las reacciones secundarias de ascenso de la burbuja, cuya formación dependerá de la extensión que dichas reacciones tengan en el proceso global. Los productos del craqueo primario al salir del reactor forman la fracción gaseosa condensable, que son los hidrocarburos del tipo C_8-C_{30} y susceptibles de separarse por el empleo de sistemas que desciendan la temperatura; y los productos del craqueo secundario forman la fracción gaseosa no condensable, formada por los hidrocarburos de más bajo peso molecular (C_1-C_5).

b) Placa distribuidora del gas en reactores de lecho fluidizado:

Tienen como objetivo:

- Inducir una fluidización uniforme y estable a lo largo de toda la sección del lecho, previniendo regiones sin fluidizar.
- Minimizar el lloriqueo de sólidos en el plenum (cámara situada justo por debajo de la placa distribuidora y por donde entra el gas).
- Minimizar la atrición del material del lecho.
- Soportar el peso del lecho durante el comienzo y finalización del proceso.

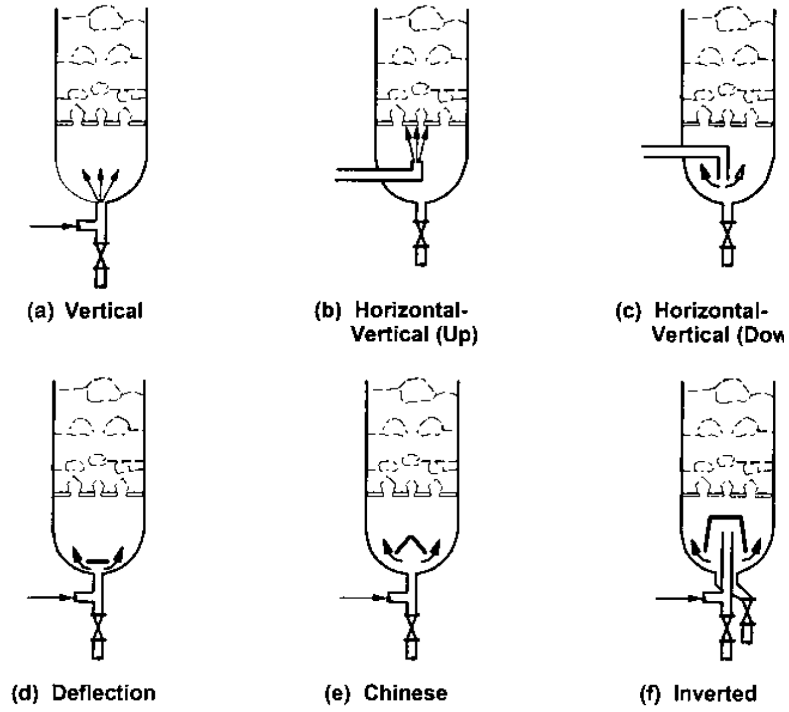


Figura 48 - Configuraciones de diferentes tipos de plenum. Handbook of fluidization and fluid-particle systems.

Los distribuidores pueden clasificarse fundamentalmente según la dirección de entrada del flujo de gas:

- Los platos perforados, hechos para flujos hacia arriba.
- Las capuchas de burbujeo, boquillas y los aspersores, se usan para flujos laterales o hacia abajo.
- Distribuidores cónicos o de láminas taladradas, para flujos laterales.

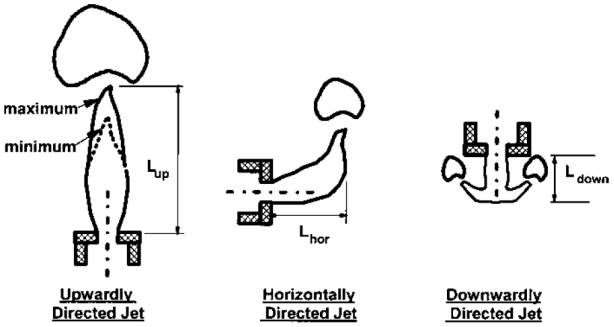


Figura 49 - Diferentes orientaciones de entrada del gas a través del distribuidor. Handbook of fluidization and fluid-particle systems.

De todos los distribuidores de fluidización, los más empleados a la hora de diseñar son los platos perforados, las capuchas de fluidización y las boquillas. Todos poseen una serie de ventajas y desventajas, pero los platos perforados sufren deformación térmica y lloriqueo, siendo ambas situaciones incompatibles con un proceso a elevada temperatura donde el plástico en proceso de pirolización se puede convertir en un sólido pegajoso que tapone las entradas. Las capuchas de burbujeo evitan el flujo de los sólidos hacia el plenum cuando orientan el flujo de salida hacia abajo, y favorecen una entrada lenta del gas respecto al flujo de gas inducido en las boquillas. Por tanto, se va a diseñar un distribuidor de gas formado por capuchas de fluidización con flujo de salida del gas hacia el plenum:

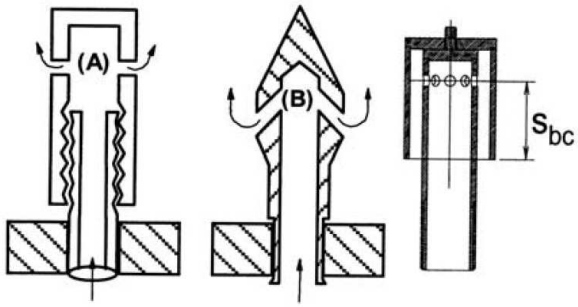


Figura 50 – Capuchas de burbujeo. (A) y (B) de flujo lateral, y la otra de flujo hacia abajo. Handbook of fluidization and fluid-particle systems.

6.3.2. Ciclón:

Bryant et al. (1983) informó que en tests realizados con partículas pegajosas que se adherían a la pared del ciclón, éstas se pegaban a la parte cónica a partir de distancias mayores que 1,6 veces el diámetro del barril por debajo del tubo de entrada del gas. Esto implica que cuando se desarrollen operaciones con partículas pegajosas es mejor disponer de ciclones cortos. Por tanto, de cara al diseño y para evitar problemas con los residuos plásticos degradados se va a considerar el ciclón más corto, es decir, configuración 1D2D.

En el diseño del reactor se considerará un ciclón externo, ya que así no cuenta con restricciones de tamaño y debido a la posibilidad de arrastrar partículas pegajosas debe ser fácilmente accesible.

Se va a diseñar por lo tanto un ciclón externo de flujo invertido con entrada del gas tangencial y un techo helicoidal, para una configuración 1D2D.

6.3.3. Intercambiador de calor:

En los intercambiadores de carcasa y tubos, un fluido circula por la carcasa y el otro a una temperatura diferente por dentro de los tubos, que a su vez están contenidos dentro de la carcasa. El intercambio de calor se produce por tanto en la superficie de los tubos. En este caso se van a poner en contacto una corriente caliente de gases de pirólisis salientes del reactor a 740º C con una corriente de agua a 25º C y 5 atmósferas. Normalmente, el fluido con la presión más elevada suele ir por el interior de los tubos, por lo que el agua circulará por los tubos interiores. Además, hacer pasar los gases de pirólisis por los tubos internos podría causar graves problemas por una posible condensación de alquitranes, generando frecuentes problemas de atascos.

Como resultado de la operación, la temperatura de los gases baja sustancialmente, a 375º C, mientras que el agua cambia de fase y sale como vapor a 170º C y a 5 atmósferas de presión. La temperatura de saturación del agua a esa presión es de 152º C, por tanto se obtiene un vapor sobrecalentado. Dichas variaciones de temperatura son fruto de dos fenómenos de transmisión de calor por convección:

- Convección forzada: debida al movimiento de un fluido a lo largo de una superficie de contacto por el interior de una conducción. Afecta tanto a los gases de pirólisis como a la corriente de agua.

- Ebullición: afecta sólo al agua. Inicialmente ésta entra subenfriada en los tubos y la transferencia es únicamente por convección forzada. Entonces se empiezan a formar burbujas sobre la superficie interna del tubo, y van siendo arrastradas por la corriente, extendiendo el calor latente de vaporización por el fluido y creciendo en su recorrido hasta que se unen y finalmente el vapor ocupa todo el volumen del tubo. Es una ebullición “en flujo interno” y de tipo “subenfriada”, ya que se da el cambio de fase con el agua en movimiento por el interior de un tubo y con la temperatura de la masa del agua por debajo de la de saturación, al haber una entrada constante de ella. El coeficiente de transferencia de calor va aumentando con el volumen de burbuja hasta que disminuye bruscamente cuando el vapor llena el interior por completo.

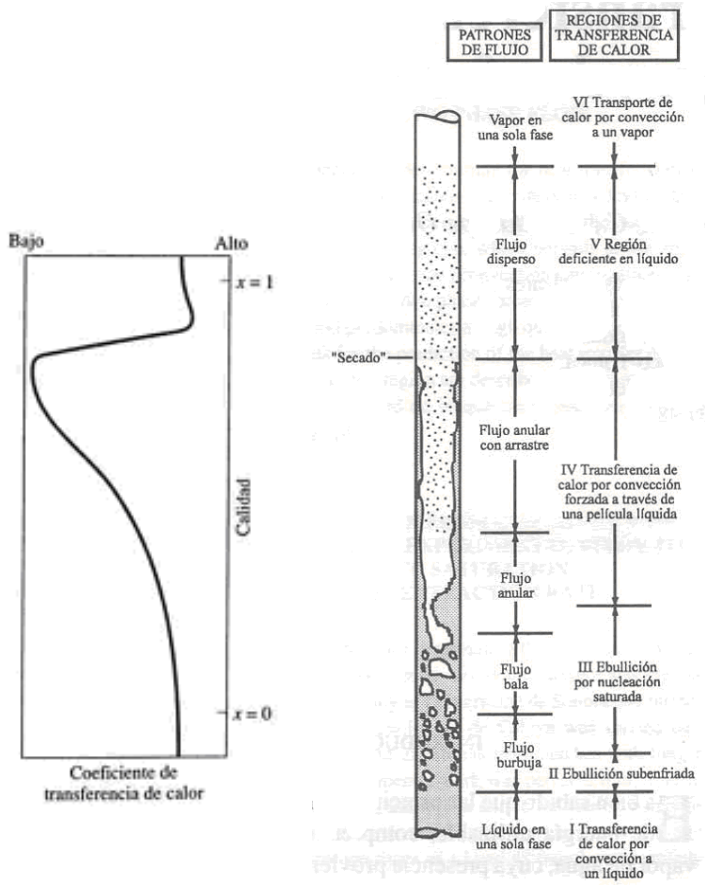


Figura 51 - Zonas de ebullición en flujo interno y evolución del coef. de transf. de calor. Del Valle et al. 1993.

6.3.4. Diseño de la Unidad de pirólisis:

La unidad de pirólisis del proyecto tiene una capacidad de trabajo de 15.000 t./año de residuos plásticos, con una disponibilidad de 343 días/año. El caudal másico de entrada al reactor es de 1,82 t./h de residuos plásticos de polietileno, el cual entra en un reactor de lecho fuidizado a 740º C gracias al aporte externo de 1.105,6 kW del horno. El reactor tiene 1,16 metros de ancho y 5,8 metros de alto, con un distribuidor de gas de 21 boquillas separadas entre sí a 24 cm. del centro y 3,92 cm. de espesor.

El reactor trabaja en régimen de transición, con un arrastre del lecho de arena a razón de 2,44 t/h, la cual es recirculada gracias a un ciclón tipo 1D2D de 1,05 metros de diámetro y un largo de 3,2 metros.

El fluido de fluidización es el propio gas de pirólisis recirculado con un coeficiente de recirculación de 0,76. Una vez dentro del reactor, éstos tienen un tiempo de residencia de unos 1,9 segundos, y pasan a través de un lecho de arena de unos 540 kg.

El gas de pirólisis que no es recirculado tiene un caudal de 1,82 t./h, el cual entra en un intercambiador de calor de carcasa y tubos de 3,37 m^2 a unos 740º C y sale a 375º C, gracias a un coeficiente global de intercambio de 469,6 w/m·K convierte en vapor a 170º C una corriente de agua a 25º C con un caudal de 51,74 kmol/h mediante el aporte de 693,26 kW.

La unidad de pirólisis forma parte de una planta de generación de energía eléctrica y aceites pirolíticos, que es denominada IPCC, similar a la figura a continuación.

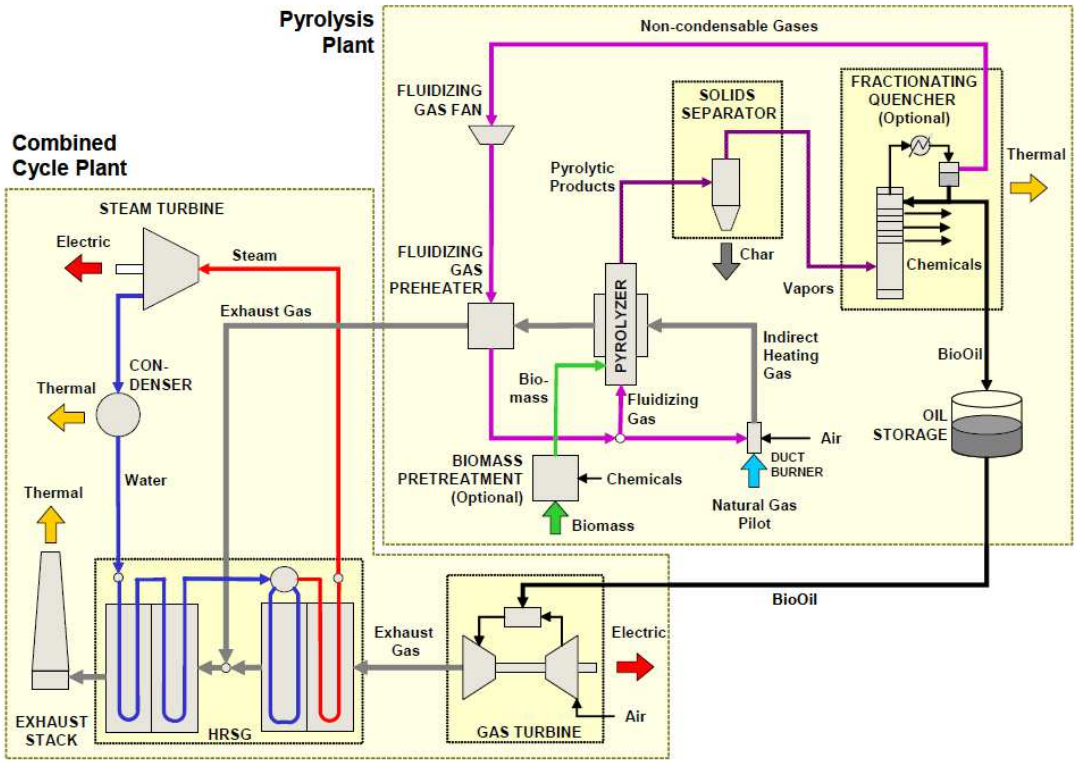


Figura 52 - Diseño planta IPCC. Alliant Energy

CAPÍTULO 7:

PRODUCTOS DEL PROCESO

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

Cuando se utiliza gasificación o pirólisis, con el fin de prevenir la generación de residuos mediante el desecho de los productos de reacción de estas técnicas, es MTD recuperar el valor energético de los productos utilizando una etapa de combustión, o suministrarlos para su uso (Documento de Referencia sobre Mejores Técnicas Disponibles para Incineración de Residuos Agosto de 2006)

Según las condiciones de operación, el tiempo de residencia de los gases y el tipo de materia prima, los rendimientos de productos en los procesos de pirólisis pueden ser de tres tipos:

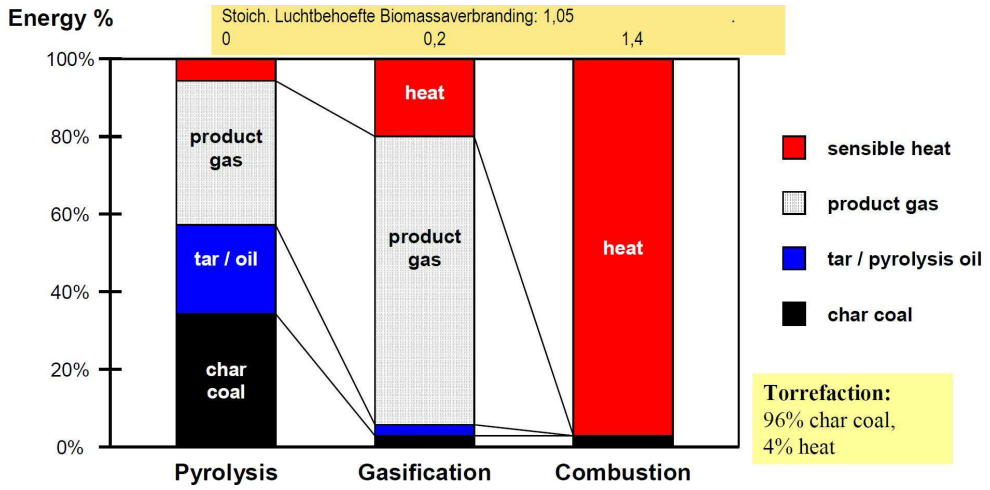
- Una corriente de gas: contiene fundamentalmente los hidrocarburos de bajo peso molecular y los compuestos orgánicos más volátiles procedentes del craking, junto con el agua procedente de la humedad de los mismos. En principio, recuerda al gas crudo procedente de los procesos de gasificación, pero la temperatura de la reacción de pirólisis es considerablemente inferior a la de gasificación, por lo que la generación de gases es menor y a cambio existe una mayor presencia de alquitranes.

- Una fracción líquida: aceites pirolíticos, alquitranes y compuestos orgánicos pesados con predominio de hidrocarburos C5 a C9. Son separados inicialmente como vapores pero luego condensan a temperatura ambiente, formando líquidos viscosos. La composición de este aceite tiene una relación muy directa con los tipos de residuos tratados.

- Una fracción sólida, formada por:

    - Los compuestos inorgánicos y metales que no sufren descomposición térmica.
    - Coque: formado por reacciones de condensación a bajas temperaturas y largos tiempos de residencia.
    - Los compuestos orgánicos más resistentes al tratamiento térmico. Esta fracción es completamente diferente a las escorias obtenidas en los

procesos de incineración, porque su contenido en materia orgánica es considerablemente más elevado, con presencia de compuestos condensados a partir de grupos aromáticos a elevada temperatura y que no estaban presentes en los residuos originales. Un ejemplo es el hollín.



Gráfica 7 - Fracciones de productos de diferentes procesos termoquímicos. ECN.

Aceites pirolíticos:

a) Como combustible: el octanaje o índice de octano de una sustancia mide la capacidad antidetonante del combustible a detonar cuando se comprime dentro del cilindro de un motor. Las dos referencias que definen la escala son el heptano, que es el hidrocarburo que más detona, al que se asigna un octanaje de 0, y el isoctano, que detona poco, al que se asigna un valor de 100. Su utilidad radica en que la eficacia del motor aumenta con altos índices de compresión, pero solamente mientras el combustible utilizado soporte ese nivel de compresión sin sufrir combustión prematura o detonación.

Hay distintos tipos de gasolinas comerciales, clasificadas en función de su número de octano. La gasolina más vendida en Europa (2004) tiene un octanaje mínimo de 90 (en España está la 95 y la 98 octanos).

COMPUESTO	ÍNDICE DE OCTANO	Comentarios
n-heptano	**0**	
2-hexeno	93	Producto de pirólisis, aunque en un rendimiento muy bajo.
Euro Súper en Europa	95	
SuperPlus	98	
Isooctano	**100**	
Benceno	101	Producto mayoritario del aceite pirolítico, rendimiento de un 19% en masa del total de polietileno tratado.
Tolueno	111	Producto de pirólisis, rendimiento de un 4% en masa del total de polietileno tratado.

Tabla 15 - Indice de octanos de diferentes compuestos. CEPSA.

Como puede observarse, la mezcla de hidrocarburos en el aceite pirolítico, con su proporciones de BTX tendrá un índice de octanos lo suficientemente alto como para emplearlo en la mezcla de una gasolina, tras sus operaciones de acondicionamiento y reformado.

b) Destilación de Benceno: gracias a su contenido elevado en benceno se puede destilar el aceite para obtener el benceno, el cual es un producto muy empleado en la fabricación de gran variedad de productos.

c) Reformado catalítico: el aceite puede someterse a reformado catalítico para obtención de aromáticos BTX.

d) Obtención de gas de síntesis: mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono. Se produce con una aportación parcial de oxígeno en forma de aire, oxígeno puro o vapor. Con este gas de síntesis pueden fabricarse gran cantidad de productos, por ejemplo vía Fischer-Tropsch.

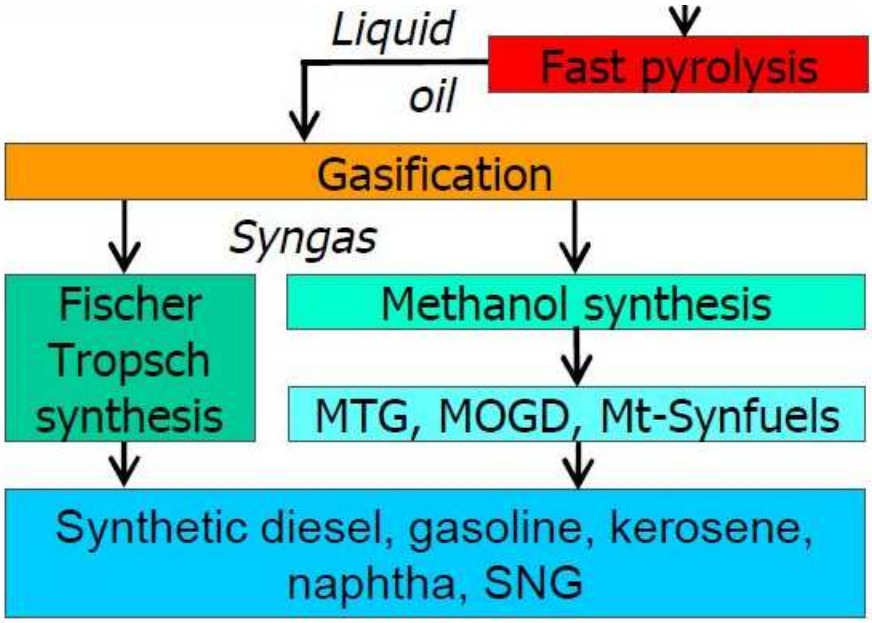


Figura 53 - Rutas de producción de sustancias a través de la gasificación de los aceites de pirólisis. Grupo I+D Universidad Ashton.

Gases pirolíticos:

Debido al R.D. 653/2003 de incineración, en el que está acogida la pirólisis, estos gases pirolíticos deben someterse en cualquier parte del proceso al menos durante dos segundos a temperaturas de 850º C o si contienen compuestos clorados al menos a 1100º C. La solución en el caso del proyecto ha sido incinerar en la propia instalación, antes de ser sometidos a ninguna etapa de depuración, para aportar el calor necesario para la transformación del residuo. El calor no utilizado en el proceso de pirolisis se transforma en energía eléctrica en la propia instalación, por un sistema clásico de producción de vapor y transformación en electricidad que se puede usar o vender (instalaciones IPCC o de Pirólisis Integrada en Ciclo Combinado). Los gases quemados deben ser sometidos a depuración antes de su descarga a la atmósfera.

También pueden gasificarse al igual que los aceites, ya que se superarían las temperaturas necesarias, y se obtendría un gas de síntesis con las mismas aplicaciones.

Sólidos (char):

Se puede buscar la obtención del combustible sólido para varias aplicaciones industriales, generalmente en plantas de cemento. En este último caso será una mezcla compleja, que exigirá tratamientos complementarios antes de su valorización o de su eliminación como subproducto del tratamiento.

ANEXO A:

CÁLCULOS

Indice:

A.1. CÁLCULOS PREVIOS.

A.2. DIMENSIONADO DEL REACTOR.

A.3. DIMENSIONADO DEL CICLÓN.

A.4. DIMENSIONADO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

ANEXO A.1:

CÁLCULOS PREVIOS

Indice:

A.1.1. Caracterización de la reacción de pirólisis del PEAD……pág. 1

A.1.2. Balance de materia……pág. 5

A.1.3. Balance de energía

A.1.3.1. Cálculo de la entalpía global de pirólisis……pág. 7

A.1.3.2. Balance de energía al reactor:……pág. 13

A.1.3.3. Balance de energía al intercambiador de calor…....pág. 14

A.1.1. Caracterización de la reacción de pirólisis del PEAD:

Respecto al PEAD, las dos propiedades básicas que se van a emplear en los cálculos son la densidad y el peso molecular. Se van a considerar aquellos encontrados en el "Polymer Data Handbook":

ACRONYMS, TRADE NAMES PE, HDPE, LPE

CLASS Poly(α-olefins)

STRUCTURE $-CH_2-CH_2-$ poly(ethylene) or $-CH_2-$ poly(methylene)

PREPARATIVE TECHNIQUES Type of polymerization: coordination polymerization.

TYPICAL COMONOMERS Alkenes, vinyl acetate, methacrylates, acrylates, methacrylic acid, acrylic acid.

PROPERTY	UNITS	CONDITIONS	VALUE	REFERENCE
Molecular mass weight of repeat unit	$g\,mol^{-1}$	Ethylene Methylene	28 14	–
Typical molecular mass range	$g\,mol^{-1}$	Very wide range available	1×10^3–8×10^6	–
Typical polydispersity (M_w/M_n)	–	Very wide range available	1.07 – >10	–
Density (crystalline)	$g\,cm^{-3}$	Orthorhombic unit cell Observed depends on molecular weight and crystallization conditions	0.996 0.92–0.99	

Tabla 16: Peso molecular y densidad del PEAD. Polymer Handbook Data.

Por tanto, se va a considerar como valores de cálculo:

- Peso molecular del PEAD: 200.000 g./mol.
- Densidad del PEAD: 935 $kg/m^{3.}$

La reacción de pirólisis no es una reacción de rendimientos y coeficientes constantes, sino que como se ha visto, depende de muchos factores. De ellos, la temperatura y el tiempo de residencia son los más importantes. Debido a la similitud de condiciones de operación se va a emplear los estudios de *Kaminsky, W.* 1993 "Recycling of polymers by pirólisis" como base de partida. En su estudio, Kaminsky emplea un reactor de lecho fluidizado con arena y

emplea el propio gas de pirólisis recirculado como gas fluidizante. Para favorecer un rendimiento de gases y aceites pirolíticos se ha elegido una temperatura de 740º C:

Components (wt.%) by the Pyrolysis of Different Plastic Wastes in a Fluidized Bed Process

Feed	Poly-ethylene	Plastics from household separation	Poly-ester	Poly-urethanes
Temperature (°C)	740	790	768	760
Hydrogen	0,75	0,70	0,30	0,23
Methane	23,6	17,5	3,8	3,5
Ethane	6,7	2,9	0,24	0,76
Ethene	19,8	9,8	1,5	5,4
Propane	0,08	0,08	0,01	0,01
Propene	5,5	1,3	0,08	1,7
Butenes	0,54	0,13	0,01	-
Butadiene	1,6	0,44	0,04	1,2
CO_2	-	2,3	17,2	14,4
CO	-	1,2	27,4	8,7
HCN	-	-	-	0,31
HCl ($CaCl_2$)	-	7,2	-	-
Hexenes	0,02	0,002	0,02	0,2
Benzene	19,1	13,8	18,3	5,0
Toluene	3,9	5,6	2,5	1,8
Styrene	0,5	3,1	2,1	0,01
Indene	0,25	1,0	0,41	1,1
Naphthalene	2,8	3,8	1,4	1,5
Methylnaphthalenes	0,63	0,84	0,25	0,69
Biphenyl	0,30	0,41	1,47	0,15
Fluorene	0,20	0,22	0,18	0,27
Phenanthrene/ Anthracene	0,52	0,66	0,08	0,62
Phenylnaphthalenes	0,08	0,36	0,21	0,01
Fluoranthene	0,08	0,26	0,02	0,01
Acetonitrile	-	-	-	0,58
Acrylnitrile	-	-	-	0,95
Benzonitrile	-	-	-	1,8
Ketones, Acetales	-	-	0,15	9,2
Acetophenone	-	-	1,4	0,3
Other compounds	11,3	9,0	11,7	34,1
Carbon black	1,75	6,4	7,1	0,5
Water	-	2,6	2,1	5,0
Inorganic compounds	-	5,3	-	-

Tabla 17: Rendimiento de pirólisis del PE. Kaminsky, W. 1993.

Debido al elevado número de compuestos producidos en la reacción se va a trabajar con aquellos que ofrezcan rendimientos significativos, es decir:

	Compuesto	**Rendimiento (% peso)**
Gases	Metano	23,6
	Etano	6,7
	Eteno	19,8
	Propeno	5,5
Aceites	Benceno	19,1
	Tolueno	3,9
	TOTAL	78,6%

Considerando casi el 80% del rendimiento total como significativo, se vuelve a hacer una base de cálculo sobre dicho porcentaje, de forma que:

	Compuesto	**Rendimiento (% peso)**
Gases 70,72%	Metano	30
	Etano	8,52
	Eteno	25,2
	Propeno	7
Aceites 29,26%	Benceno	24,3
	Tolueno	4,96
	TOTAL	**99,98%**

Respecto al tiempo de residencia, Kaminsky expresa en su estudio que el reactor fluidizado ofrece “tiempos de residencia cortos”. Para conocer el rango aproximado del tiempo de residencia se recurre a los estudios de Mastral et al. (2001) donde se comprueba que para la pirólisis de polietileno en lecho fluidizado los tiempos de residencia oscilan entre menos de 1 segundo y poco más de dos segundos para una temperatura y unos rendimientos similares de gases y aceites:

Pyrolysis of HPDE: product yields (wt.% of feed)

Temperature (°C)	645	640	650	650	685	685	700	685	715	730	780
Residence time (s)	0.82	0.99	1.46	2.57	0.79	1.3	1.69	2.12	1.38	2.27	0.7
Wax + oil (wt.%)	79.7	78.9	68.5	72.3	33.4	39.6	32.1	40.7	19.2	13.5	15.3
Gas (wt.%)	17.5	11.4	31.5	22.1	60.1	59.9	64.2	55.9	75.1	76.1	78.8
Total yield (wt.%)	97.2	90.3	100	94.4	93.5	99.5	96.3	96.6	94.3	89.6	94.1

Tabla 18- Tiempos de residencia. Mastral et al. 2001

Se va a considerar una media aproximada de dos segundos de tiempo de residencia de los gases en el reactor para generar un rendimiento de productos similar al obtenido por Kaminsky.

La capacidad de la planta es de 15.000 t/año de residuos de polietileno, y se va a suponer una disponibilidad anual de la planta de 343 días, con lo cual se obtiene un caudal de entrada másica y molar de:

$$15 \cdot 10^6 \frac{kg\,PEAD}{año} \cdot \frac{1\,año}{8.232 horas\,de\,trabajo} = 1.822{,}16 \frac{kg\ PEAD}{hora}$$

$$1.822{,}16 \frac{kg\,PEAD}{hora} \cdot \frac{1\,kmol\ PEAD}{2 \cdot 10^5\,kg\ PEAD} \cdot \frac{10^3\ mol\ PEAD}{1\,kmol\ PEAD} = 9{,}11 \frac{mol\ PEAD}{hora}$$

Luego con los caudales obtenidos anteriormente, para cada compuesto se obtiene para ese caudal de entrada la producción de cada uno de ellos, en caudal másico y molar:

	PORCENTAJE RENDIMIENTO (MASA)	**CAUDAL MÁSICO (kg/h)**	**PESO MOLECULAR (g./mol)**		**CAUDAL MOLAR (mol/h)**
Metano	30	546,65	CH_4	16	34.165,6
Etano	8,52	155,25	C_2H_6	30	5.175
Eteno	25,2	459,18	C_2H_4	28	16.400
Propeno	7	127,55	C_3H_6	42	3.036,9
Benceno	24,3	442,78	C_6H_6	78	5.676,67
Tolueno	4,96	90,4	C_7H_8	92	982,61

Ya puede obtenerse la reacción de pirólisis:

	REACTIVO	**PRODUCTOS**					
Reacción	$-(CH_2)_n-$	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_3H_6	C_6H_6	C_7H_8
Caudales (mol/h)	9,11	34.165,6	5.175	16.400	3.036,9	5.676,67	982,61
mol	1	3.750,34	568,06	1.800,22	333,36	623,125	107,86

$$-(CH_2)_n- \rightarrow 3.750{,}34\ CH_4 + 568{,}06\ C_2H_6 + 1.800{,}22\ C_2H_4 + 333{,}36\ C_3H_6 + 623{,}125\ C_6H_6 + 107{,}86\ C_7H_8$$

A.1.2. Balance de materia:

Con la reacción de pirólisis caracterizada ya se puede realizar el balance de materia, aunque para un balance global es necesario añadir cálculos obtenidos en anexos posteriores (ver anexo A.2.3.), como son el caudal de arena arrastrado en el reactor, el coeficiente de gas de pirólisis recirculado al reactor, o el caudal de agua empleado en el intercambiador de calor:

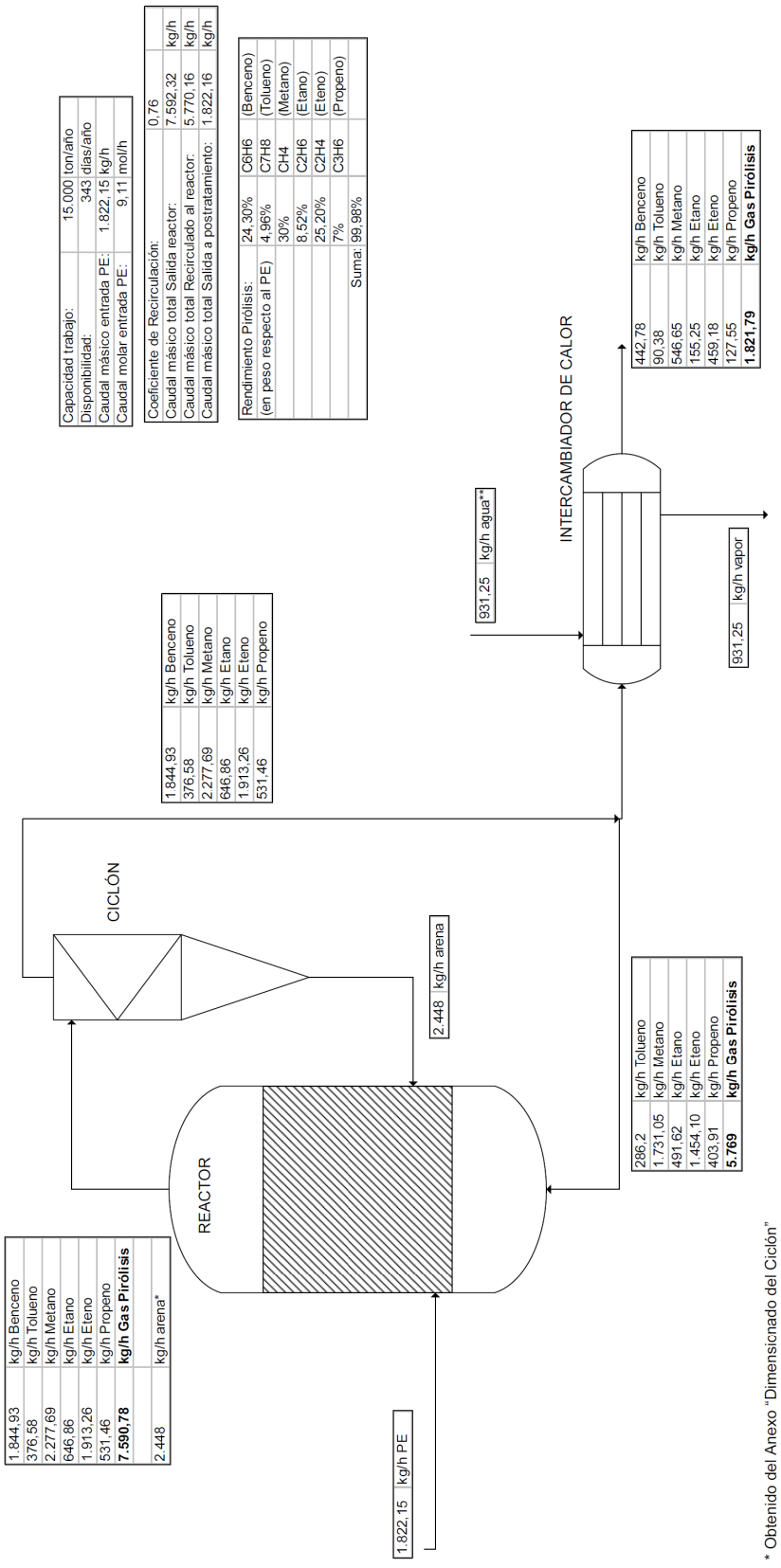


Figura 54 – Balance de materia global unidad pirolítica.

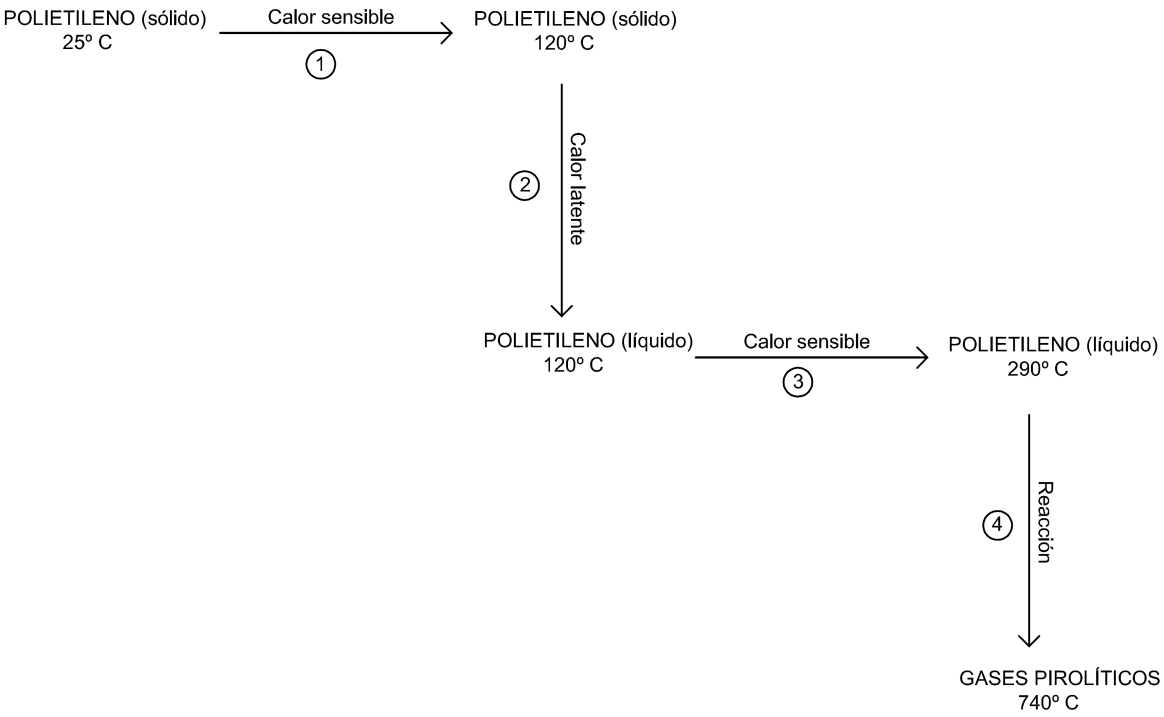
A.1.3. Balance de energía:

A.1.3.1. Cálculo de la entalpía global de pirólisis:

Desde que el polietileno es alimentado al reactor a 25º C (temperatura ambiente) hasta que se ha craqueado por completo en el reactor en forma de gases a 740º C hay una serie de etapas. El calor necesario para que el polietileno pase de su estado sólido a 25º C a su completa liberación en gases a 740º C se va a llamar Entalpía Global de Pirólisis, y equivale a la entalpía de la reacción de pirólisis completa (ΔH_R).

- Según el "Polymer Data Handbook", la temperatura observada de fusión del polietileno de alta densidad depende del peso molecular, la cristalización del polímero y el método de medida, y presenta un rango entre 391 y 419 K. Se empleará para los cálculos 393 K (120º C).

- Oakes et al. (1949) en su estudio sobre la degradación térmica de polímeros del etileno encontró que el polietileno es estable hasta 290º C. A partir de ahí el peso molecular empieza a disminuir. Por tanto se considera que la reacción de pirólisis del polietileno comienza a 290º C.



De forma que: $\Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_4 = \Delta H_R$. Se va a estimar cada sumando:

1) Es el calor sensible necesario para llevar al polietileno desde la temperatura ambiente a su punto de fusión:

$$\Delta H_1 = \int_{25^oC}^{120^oC} Cp_1 \cdot \partial T$$

Cp_1 es la capacidad calorífica del polietileno en estado sólido. Umesh et al. (1981) en su estudio “Capacidad calorífica y otras propiedades termodinámicas de macromoléculas lineales” le dedica el 2º capítulo al polietileno:

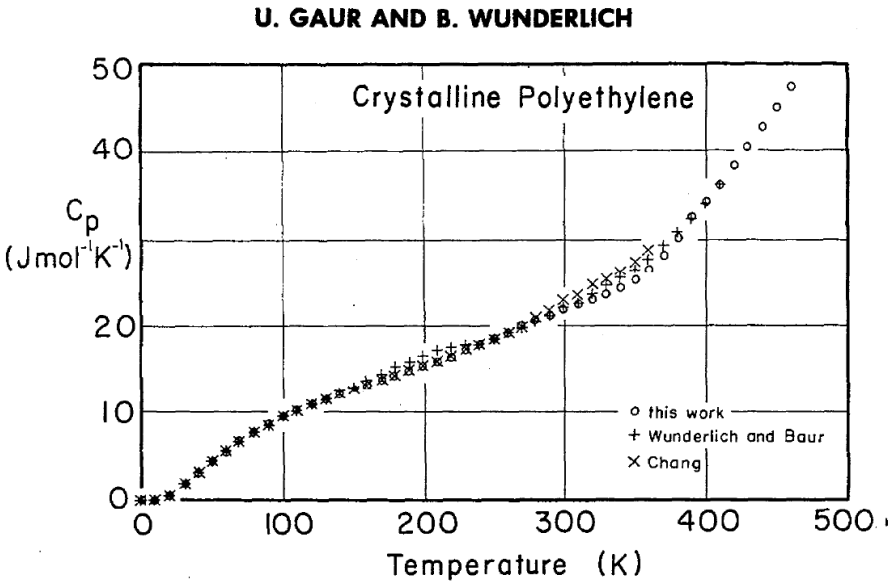


FIGURE 4. Heat capacity of crystalline polyethylene as a function of temperature.

Gráfica 8. Capacidad calorífica del PE cristalino en función de la temperatura. Umesh et al. 1981.

Calculando la función de Cp para la temperatura en el intervalo entre 25º C y 102º C se ha obtenido:

$$Cp = -14{,}336 + 0{,}117 \cdot T \quad \left(J/_{mol \cdot K}\right)$$

Por tanto:

$$\Delta H_1 = \int_{25^{\circ}C}^{120^{\circ}C} Cp_1 \cdot \partial T = \left(-14{,}336 \cdot T + 0{,}117 \cdot \frac{T^2}{2} \right)_{298}^{393} = 3.401{,}22 - 922{,}91 = 2.478 \; J/_{mol};$$

$$\Delta H_1 = 2{,}48 \; kJ/_{mol}$$

2) Es el calor latente para transformar el polietileno sólido en una masa fundida. Umesh et al. presenta una tabla donde figura el valor de dicha entalpía para un rango de temperatura:

Table 11. Heat of fusion of polyethylene

T(K)	ΔH_f(kJ mol^{-1})
260	3.050
270	3.149
280	3.244
290	3.338
300	3.430
310	3.520
320	3.609
330	3.696
340	3.781
350	3.861
360	3.936
370	4.000
380	4.051
390	4.084
400	4.101
410	4.105

Tabla 19- Entalpías de fusión del PE en función de la temperatura. Umesh et al. 1981.

Por tanto, se va a considerar la entalpía de fusión del polietileno a 120º C (393 K):

$$\Delta H_2 = 4{,}1\ {kJ}/{mol}$$

3) Es el calor sensible necesario para llevar al polietileno fundido a su temperatura de descomposición térmica:

$$\Delta H_3 = \int_{120^\circ C}^{290^\circ C} Cp_3 \cdot \partial T$$

Cp_3 es la capacidad calorífica del polietileno fundido. Umesh et al. aporta una gráfica con estos datos para polietileno fundido, entre 390 y 600 K:

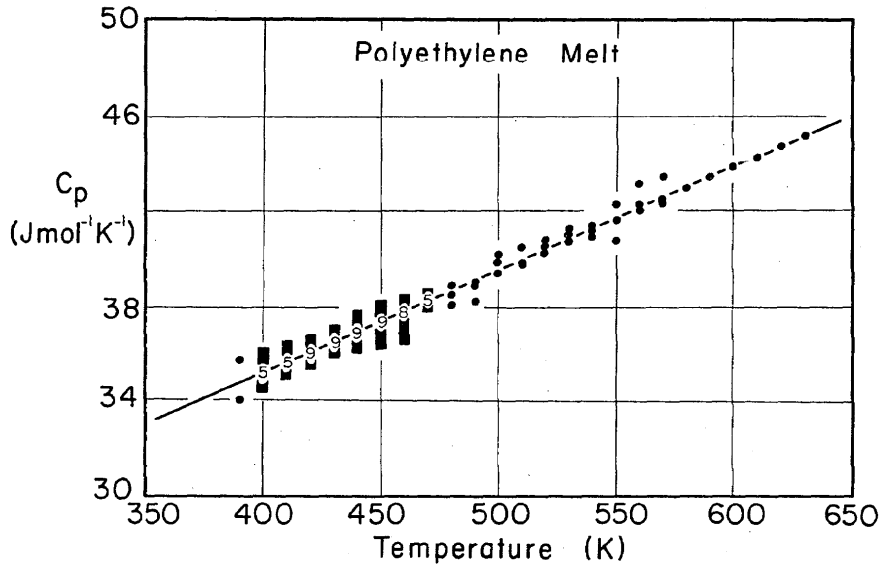


FIGURE 5. Heat capacity of molten polyethylene as a function of temperature (numerals in the figure denote number of overlapping points. Samples 15, 21–26, 30, 39–42. Drawn-out line represents eq (12)).

Gráfica 9. Capacidad calorífia del PE fundido en función de la temperatura. Umesh et al. 1981.

Ajustando los datos se obtiene la ecuación siguiente:

$$Cp = 17{,}919 + 4{,}325 \cdot 10^{-2} \cdot T \quad \left({}^{J}\!/_{mol \cdot K} \right)$$

Por tanto:

$$\Delta H_3 = \int_{120^{\circ}C}^{290^{\circ}C} Cp_3 \cdot \partial T = \left(17{,}919 \cdot T + 4{,}325 \cdot 10^{-2} \frac{T^2}{2} \right)_{393}^{563} = 16.942{,}85 - 10.382{,}13 = 6.560{,}72 \; {}^{J}\!/_{mol}$$

$$\Delta H_3 = 6{,}56 \; {}^{kJ}\!/_{mol}$$

4) Es la entalpía necesaria para que el polietileno se degrade desde su temperatura de descomposición térmica hasta conseguir el rendimiento de productos considerado a los 740º C. A efectos de cálculo, se va a considerar esta entalpía como la entalpía de activación del polietileno evaluada en estudios de termogravimetría, en donde se mide la variación de

peso por descomposición de una muestra en el tiempo para una temperatura determinada.

Westerhout et al. (1997) presentó un estudio cinético y mostró una tabla con las estimaciones de otros compañeros:

Table 1. Kinetic Parameters for the Pyrolysis of PE Reported in the Literature

authors	T (°C)	ξ (wt %)	order	k_0	E_{act} (kJ/mol)
Anderson and Freeman (1961)	246−480	<3	0		201[a,b]
		3−15	0		255[a,b]
		15−35	0 → 1		
		35−95	1		280[a,b]
Bockhorn and Knümann (1993)	200−600	0−100	0.81	7.2×10^{13}	259[c]
Jellinek (1950)					
M_w = 11 000 g/mol	375−436	<40	0	$10^{13.6}$	192[c]
M_w = 16 000 g/mol	375−436	<40	0	$10^{15.8}$	220[c]
M_w = 23 000 g/mol	375−436	<40	0	$10^{19.8}$	276[c]
Klose (1972), TGA	385−520	10−70	1	1.1×10^{18}	275[d,b]
TGA (1−10 °C/min)	385−520	10−70	1	1.2×10^{9}	159[d,b]
Madorsky (1952)	385−405	<20	1	4×10^{13}	200[e]
	385−405	>20	1	8×10^{19}	284[e]
Mucha (1976)					
HDPE	387−467	10−70	0−1		330−247[e,d]
LDPE	387−467	10−70	0−1		163−230[e,d]
Rychly and Rychlà (1989)	397−496	0−30			281[b,d]
Sawaguchi *et al.* (1990)			1	9.9×10^{12}	225[d,b]
Urzendowski and Guenther (1971)					g
HDPE	400−485	15−95	1	1.3×10^{21}	304[a]
	410−485	15−95	1	7.1×10^{21}	320[d]
LDPE	375−480	5−95	1	3.1×10^{20}	290[a]
	380−485	5−95	1	5.8×10^{21}	303[d]
Wu *et al.* (1993)					
HDPE	327−487		0.74	9.3×10^{13}	234[d]
LDPE	327−487		0.63	1.2×10^{12}	206[d]
this study					
HDPE	400−450	70−90	1	1.9×10^{13}	220
LPDE1	400−450	70−90	1	1.0×10^{15}	241
LDPE2	400−450	70−90	1	9.8×10^{11}	201

[a] Measurements performed in a vacuum environment. [b] Possible mass and heat transfer limitations during experiment. [c] Equation 2 used. [d] Measurements performed in a nitrogen environment. [e] Activation energy decreases with increasing molecular weight of sample from 7×10^3 g/mol to 707×10^3 g/mol. [f] Activation energy decreases with increasing number of side chains. [g] Measurements performed in a steam environment.

Tabla 20 - Parámetros cinéticos para la pirolisis del PE. Westerhout et al. 1997.

Los valores rondan entre los 200 y los 330 kJ/mol. Conesa et al. 1996 calculó valores entre 200 y 238,9 kJ/mol para la degradación del polietileno tanto en formas dinámicas como isotérmicas. Por tanto, de cara a los cálculos se va a considerar una entalpía media de 240 kJ/mol:

$$\Delta H_4 = 240\ {}^{kJ}\!/_{mol}$$

Sustituyendo los datos estimados en la ecuación de ΔH_R resulta:

$$\Delta H_R = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_4 = 2{,}48 + 4{,}11 + 6{,}56 + 240 = 253{,}15\ {}^{kJ}\!/_{mol}$$

A.1.3.2. Balance de energía al reactor:

El reactor alcanza la temperatura de 740º C gracias a un horno que rodea su estructura y le aporta el flujo de calor necesario (Q_1). La ecuación del balance de energía al reactor:

$$\Delta H + \Delta Ec + \Delta Ep = Q_1 + We$$

Si se considera que el cambio de velocidad de los componentes en el gas es despreciable así como el cambio en la altura y que no se aplica ninguna fuerza externa, la ecuación queda como:

$$Q_1 = \Delta H = \sum_{salida} W_{salida} \cdot \Delta \overline{H}_{salida} - \sum_{entrada} W_{entrada} \cdot \Delta \overline{H}_{entrada} + \Delta H_R^o \cdot \frac{n_{Ar}}{\nu_A}$$

Se conocen los caudales de los componentes pero no sus entalpías de entrada y salida. En este caso, el caudal de entrada está a la misma temperatura que a la salida (740º C), pues parte del gas se recircula con una bomba de compresión adiabática. Por tanto, la entalpía de entrada de cada componente coincide con su valor a la salida. Los valores de capacidad calorífica de los productos en estado gas son los siguientes:

COMPONENTE	CAPACIDAD CALORÍFICA (J/mol·ºC)
Benceno (g)	$74{,}06 + 32{,}95 \cdot 10^{-2} \cdot T$
Tolueno (g)	$94{,}18 + 38 \cdot 10^{-2} \cdot T$
Metano (g)	$34{,}31 + 5{,}469 \cdot 10^{-2} \cdot T$
Etano (g)	$49{,}37 + 13{,}92 \cdot 10^{-2} \cdot T$
Eteno (g)	$40{,}75 + 11{,}47 \cdot 10^{-2} \cdot T$
Propeno (g)	$59{,}58 + 17{,}71 \cdot 10^{-2} \cdot T$

Suponiendo un estado de referencia a 25º C para cada compuesto y con los valores de capacidad calorífica de cada uno se pueden calcular las entalpías:

Compuesto	Est. Ref.	Caudal entrada (mol/h)	Entalpía entrada (kJ/mol)	Caudal salida (kJ/mol)	Entalpía salida (mol/h)
PE	$PE_{(s)}$ a 25º C	9,11	0	-	-
C_6H_6	$C_6H_{6(g)}$ a 25º C	17.976,28	143,1	23.653	143,1
C_7H_8	$C_7H_{8(g)}$ a 25º C	3.110,87	171,3	4.093,25	171,3
CH_4	$CH_{4(g)}$ a 25º C	108.190,59	39,5	142.356	39,5
C_2H_6	$C_2H_{6(g)}$ a 25º C	16.387,27	73,4	21.562,2	73,4
C_2H_4	$C_2H_{4(g)}$ a 25º C	51.931,48	60,5	68.330,9	60,5
C_3H_6	$C_3H_{6(g)}$ a 25º C	9.616,94	91	12.653,9	91

Considerando además los moles que realmente reaccionan para el polietileno (9,11) y su coeficiente estequiométrico estimado previamente (1), la ecuación del balance queda:

$$Q_1 = \Delta H = \begin{pmatrix} (23.653 \cdot 143{,}1)_{benceno} + (4.093{,}25 \cdot 171{,}3)_{tolueno} + \\ + (142.356 \cdot 39{,}5)_{me\,tan\,o} + (21.562{,}2 \cdot 73{,}4)_{e\,tan\,o} + \\ + (68.330{,}9 \cdot 60{,}5)_{eteno} + (12.653{,}9 \cdot 91)_{propeno} \end{pmatrix}_{salida} -$$

$$- \begin{pmatrix} (17.976{,}28 \cdot 143{,}1)_{benceno} + (3.110{,}87 \cdot 171{,}3)_{tolueno} + \\ + (108.190{,}59 \cdot 39{,}5)_{me\,tan\,o} + (16.387{,}27 \cdot 73{,}4)_{e\,tan\,o} + \\ + (51.931{,}48 \cdot 60{,}5)_{eteno} + (9.616{,}94 \cdot 91)_{propeno} \end{pmatrix}_{entrada} + 253{,}15 \cdot \frac{9{,}11}{1} =$$

$$= 3.980.248{,}24 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 1.105{,}6\ k\text{W} = 1{,}1\ MW$$

Luego el horno debe aportar un calor Q_1 de 1,1 MW al reactor para mantener la temperatura de 740º C.

A.1.3.3. Balance de energía al intercambiador de calor:

El intercambiador de calor, de carcasa y tubos, enfría la corriente de salida de los gases de pirólisis de 740º C mediante una corriente de agua a 5 atmósferas de presión a 25º C para así recuperar parte del calor residual que lleva el gas.

Se ha impuesto una temperatura de salida de los gases de pirólisis de 375º C para evitar la condensación de los aceites/alquitranes contenidos en él. El agua sale como vapor a 170º C y 5 atmósferas, lista para cualquier aplicación como fluido térmico (turbina, calefacción, etc.). La ecuación del balance de energía aplicada al intercambiador será:

$$\Delta H + \Delta Ec + \Delta Ep = Q + We$$

A igual que antes se considera que el cambio de velocidad de los componentes en el gas es despreciable así como el cambio en la altura y que no se aplica ninguna fuerza externa. Además se considera el sistema como adiabático, al no intercambiar calor con el exterior, por lo que la ecuación queda:

$$\Delta H = Q = 0\,;$$

$$\sum_{salida} W_{salida} \cdot \Delta\overline{H}_{salida} - \sum_{entrada} W_{entrada} \cdot \Delta\overline{H}_{entrada} = 0$$

Compuesto	Est. Ref.	Caudal Entrada (mol/h)	Entalpía Entrada (kJ/mol)	Caudal Salida (mol/h)	Entalpía Salida (kJ/mol)
H_2O	$H_2O_{(l)}$, 25º C, 1 atm.	a)	b)	a)	c)
C_6H_6	$C_6H_{6(g)}$, 740º C	5.676,72	-	5.676,72	d)
C_7H_8	$C_7H_{8(g)}$, 740º C	982,38	-	982,38	e)
CH_4	$CH_{4(g)}$, 740º C	34.165,45	-	34.165,45	f)
C_2H_6	$C_2H_{6(g)}$, 740º C	5.174,93	-	5.174,93	g)
C_2H_4	$C_2H_{4(g)}$, 740º C	16.399,42	-	16.399,42	h)
C_3H_6	$C_3H_{6(g)}$, 740º C	3.036,93	-	3.036,93	i)

a) El caudal de agua empleado se despeja de la ecuación del balance de energía, una vez calculadas todas las demás incógnitas.

b) La entalpía de entrada es aquella variación con respecto al estado de referencia, en este caso un aumento de la presión de 1 a 5 atmósferas:

$H_2O_{(l)}$	$\Rightarrow$	$H_2O_{(l)}$
Temp.= 25º C		Temp.= 25º C
P= 1 atm.		P = 5 atm.
h_1= 104,92 kJ/kg.		h_2= 105,29 kJ/kg.

Donde h_1 y h_2 son las entalpías de referencia para el agua en ambas condiciones. Por tanto: $\Delta H = h_2 - h_1$= 0,37 kJ/kg. = 0,0067 kJ/mol.

c) La variación de entalpía respecto al estado de referencia tiene más pasos ahora:

$$H_2O_{(l)} \xrightarrow{\Delta H_1} H_2O_{(l)} \xrightarrow{\Delta H_2} H_2O_{(g)} \xrightarrow{\Delta H_3} H_2O_{(g)} \xrightarrow{\Delta H_4} H_2O_{(g)}$$

Temp.= 25º C P= 1 atm.	Temp.= 100º C P = 1 atm.	Temp.= 100º C P = 1 atm.	Temp.= 170º C P = 1 atm. h_3= 2.816,2 kJ/kg (diagrama Mollier)	Temp.= 170º C P = 5 atm. h_4= 2.790,18 kJ/kg (diagrama Mollier)

De tal forma que: $\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_4$

$$\Delta H_1 = \int_{25ºC}^{100ºC} (Cp)_{agua(l)} \cdot \partial T = \int_{25º}^{100º} 75{,}4 \cdot \partial T = 75{,}4 \frac{J}{mol \cdot ºC} \cdot (100 - 25)ºC = 5.655 \ {}^{J}\!/_{mol} =$$

$$= 5{,}65 \ {}^{kJ}\!/_{mol}$$

$$\Delta H_2 = 40{,}656 \frac{kJ}{mol}$$ (es la entalpía de vaporización del agua)

$$\Delta H_3 = \int_{100\,ºC}^{170\,ºC} (Cp)_{agua\,(v)} \cdot \partial T = \int_{100\,ºC}^{170\,ºC} \left(33{,}46 + 0{,}688 \cdot 10^{-2} \cdot T\right) \cdot \partial T =$$

$$= \left(33{,}46 \cdot T + 0{,}688 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{T^2}{2} \right)_{100}^{170} = 5.787 - 3.380 = 2.410 \ {}^{J}\!/_{mol} = 2{,}41 \ {}^{kJ}\!/_{mol}$$

$$\Delta H_4 = h_4 - h_3 = -2.816{,}2 + 2.790{,}18 = -26{,}02\frac{kJ}{kg} = -0{,}47\frac{kJ}{mol}$$

Por tanto:

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_4 = 5{,}65 + 40{,}65 + 2{,}41 - 0{,}47 = 48{,}24\,{}^{kJ}\!/_{mol}$$

d) La entalpía de salida del benceno:

$$\Delta H_{sal(C_6H_6)} = \int_{740°C}^{375°C} Cp_{benceno,gas} \cdot \partial T = \left(74{,}06 \cdot T + 32{,}95 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{T^2}{2}\right)_{740}^{375} = -94.060\,{}^{J}\!/_{mol} =$$
$$= -94{,}06\,{}^{kJ}\!/_{mol}$$

e) La entalpía de salida del tolueno:

$$\Delta H_{sal(C_7H_8)} = \int_{740°C}^{375°C} Cp_{tolueno,gas} \cdot \partial T = \left(94{,}18 \cdot T + 38 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{T^2}{2}\right)_{740}^{375} = -111.700\,{}^{J}\!/_{mol} =$$
$$= -111{,}7\,{}^{kJ}\!/_{mol}$$

f) La entalpía de salida del metano:

$$\Delta H_{sal(CH_4)} = \int_{740°C}^{375°C} Cp_{metano,gas} \cdot \partial T = \left(34{,}31 \cdot T + 5{,}469 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{T^2}{2}\right)_{740}^{375} = -23.650\,{}^{J}\!/_{mol} =$$
$$= -23{,}65\,{}^{kJ}\!/_{mol}$$

g) La entalpía de salida del etano:

$$\Delta H_{sal(C_2H_6)} = \int_{740ºC}^{375ºC} Cp_{etano,gas} \cdot \partial T = \left(49{,}37 \cdot T + 13{,}92 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{T^2}{2} \right)_{740}^{375} = -46.340\, {}^{J}\!/_{mol} =$$

$$= -46{,}34\, {}^{kJ}\!/_{mol}$$

h) La entalpía de salida del eteno:

$$\Delta H_{sal(C_2H_4)} = \int_{740ºC}^{375ºC} Cp_{eteno,gas} \cdot \partial T = \left(40{,}75 \cdot T + 11{,}47 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{T^2}{2} \right)_{740}^{375} = -38.310\, {}^{J}\!/_{mol} =$$

$$= -38{,}31\, {}^{kJ}\!/_{mol}$$

i) La entalpía de salida del propeno:

$$\Delta H_{sal(C_3H_6)} = \int_{740ºC}^{375ºC} Cp_{propeno,gas} \cdot \partial T = \left(59{,}58 \cdot T + 17{,}71 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{T^2}{2} \right)_{740}^{375} = -57.780\, {}^{J}\!/_{mol} =$$

$$= -57{,}78\, {}^{kJ}\!/_{mol}$$

Ya puede sustituirse en la ecuación del balance y despejar el caudal de agua necesario para enfriar los gases de pirólisis:

$$\sum_{salida} W_{salida} \cdot \Delta\overline{H}_{salida} - \sum_{entrada} W_{entrada} \cdot \Delta\overline{H}_{entrada} = 0;$$

$$(-57{,}78) \cdot 3.036{,}93 + (-38{,}31) \cdot 16.399{,}42 + (-46{,}34) \cdot 5.174{,}92 + (-23{,}65) \cdot 34.165{,}45 +$$
$$+ (-111{,}7) \cdot 982{,}38 + (-94{,}06) \cdot 5.676{,}72 + (48{,}24) \cdot W - 6{,}7 \cdot 10^{-3\cdot} \cdot W_{agua} = 0;$$

$$W_{agua} = 51.736{,}23\, \frac{mol}{h} = 931{,}25\, \frac{kg}{h}$$

Ya que el estado de referencia utilizado es muy similar a las condiciones de entrada del agua, la cantidad de calor transferida de la corriente de gases de pirólisis al agua será:

$$Q_{vapor} = \Delta H_{salida(agua)} \cdot W_{agua} = 48{,}24 \frac{kJ}{mol} \cdot 51.736{,}23 \frac{mol}{h} = 2.495.755{,}73 \frac{kJ}{h} = 693{,}26\ kW$$

De esta forma, la cantidad de calor recuperado en el intercambiador de calor respecto al aportado por el horno en el reactor para la reacción será:

$$\frac{693{,}26\ kW}{1.105{,}6\ kW} \cdot 100 = 62\%$$

Calculadas ya todas las entalpías, se puede realizar el balance global al proceso:

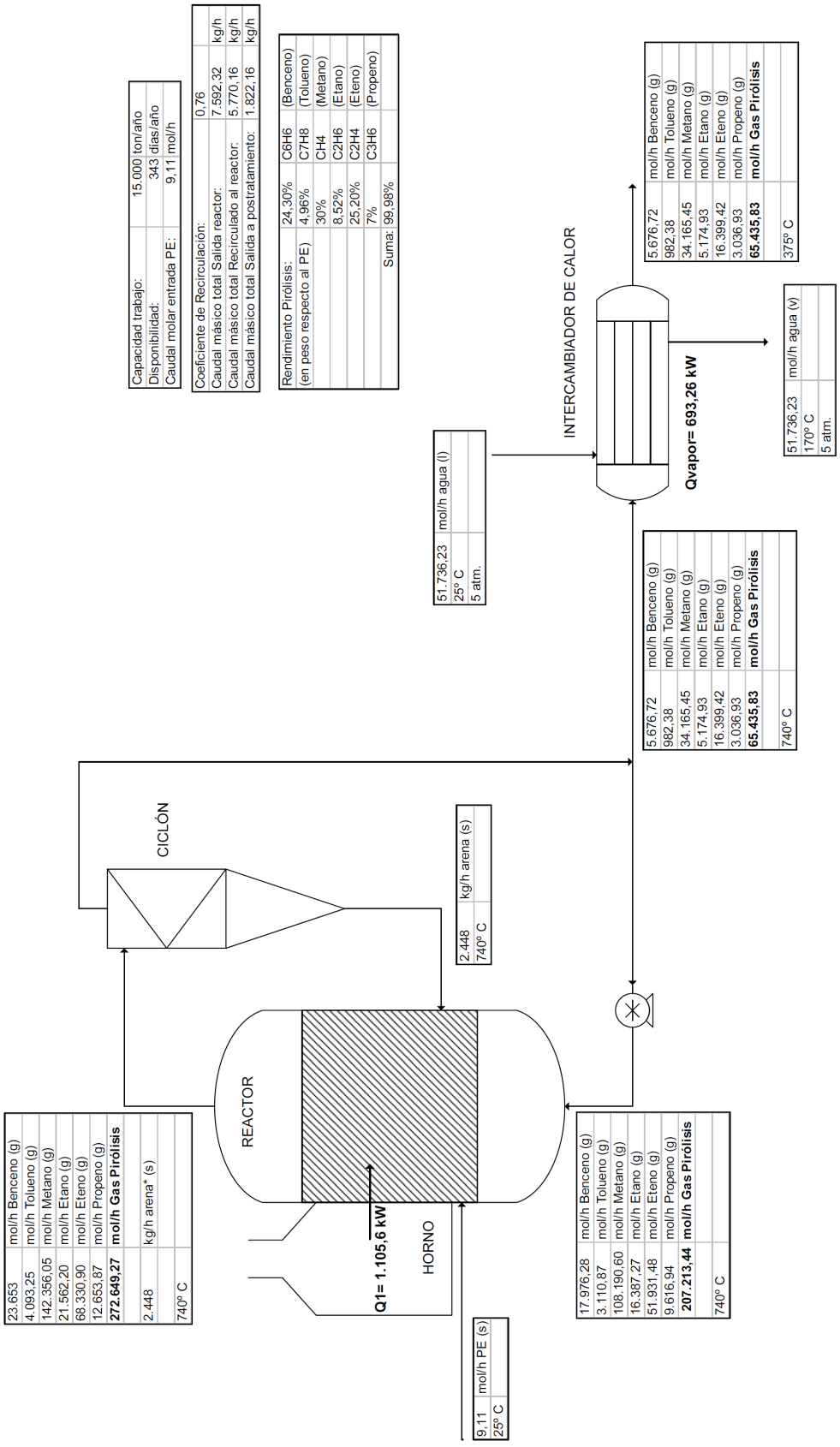


Figura 55 – Balance de energía global unidad pirolítica.

ANEXO A.2:

DIMENSIONADO DEL REACTOR

Indice:

A.2.1. Cálculos hidrodinámicos.

A.2.1.1. Datos de partida……pág. 1

A.2.1.2. Cálculos hidrodinámicos con la arena……..pág. 6

A.2.1.3. Cálculos hidrodinámicos con el polietileno……...pág. 8

A.2.1.4. Resumen de cálculos hidrodinámicos……...pág. 10

A.2.2. Cálculo del régimen de fluidización.

A.2.2.1. Clasificación sistema dentro de grupos Geldart…….pág. 11

A.2.2.2. Determinación del régimen de fluidización……...pág. 13

A.2.3. Estimación coeficiente de recirculación del gas al reactor……pág. 22

A.2.4. Cinética de la pirólisis del PEAD en lecho fluidizado…….pág. 30

A.2.5. Modelo de fluidización en el reactor.

A.2.5.1. Derivación del modelo……pág. 35

A.2.5.2. Modelo Kunii-Levenspiel para cinética primer orden..pág. 46

A.2.6. Cálculo de la placa distribuidora

A.2.6.1. Caída de presión en el distribuidor de gas……...pág. 53

A.2.6.2. Diámetro orificio de entrada del gas por capucha…...pág. 54

A.2.6.3. Disposición de los orificios……...pág. 56

A.2.6.4. Espesor de la placa distribuidora……...pág. 56

A.2.6.5. Diseño de las boquillas……pág. 57

A.2.6.6. Penetración del chorro……pág. 59

A.2.6.7. Burbujas formadas a partir del distribuidor……...pág. 62

A.2.6.8. Potencia compresor del gas recirculado……...pág. 63

A.2.1. Cálculos hidrodinámicos:

La hidrodinámica es una parte más de los cálculos que hay que realizar para diseñar un reactor de lecho fluidizado. Usando un modelo de análisis como núcleo que unifique todos los datos, debe haber una experimentación en laboratorio previa a su instalación comercial.

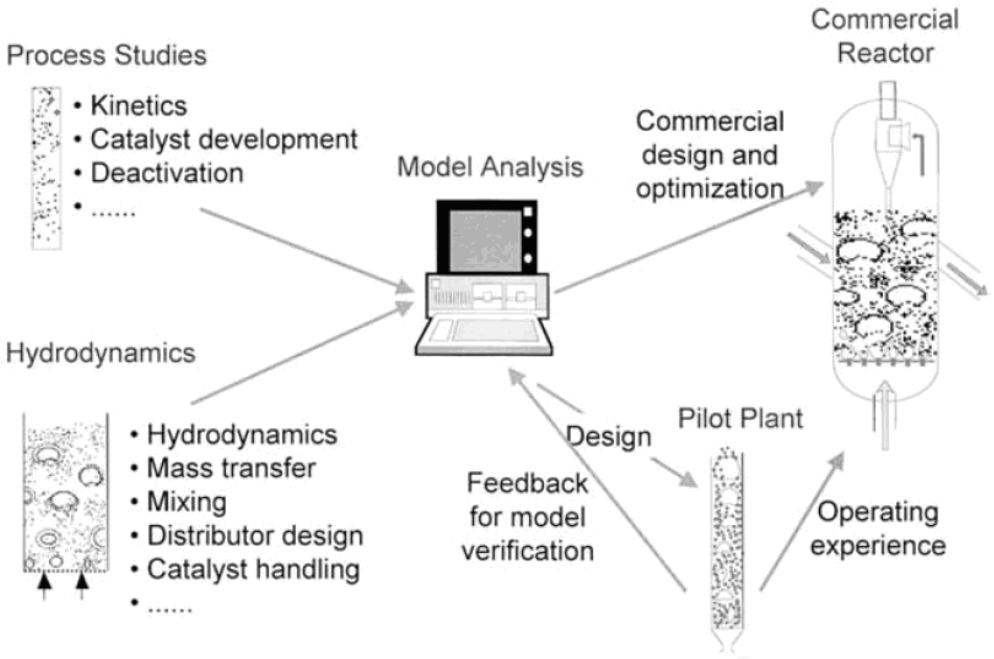


Figura 56 – Esquema de los pasos a realizar en el diseño de reactores de lecho fluidizado. Krishna, 1994; Jazayeri, 1995.

A.2.1.1. Datos de partida:

a) Datos arena:

A efectos de cálculo de las propiedades del lecho, menos en la hidrodinámica la arena es considerada como el único sólido que lo conforma ya que el polietileno es el reactivo y además de estar en menor proporción, en pocos segundos se gasifica. Para realizar los cálculos se han utilizado valores de diámetro y densidad similares a aquellos encontrados en el estudio de *Choi et al., 1998* sobre el arrastre de

partículas en lecho fluidizado en los que se coge una muestra de arena y se analiza la distribución de tamaños:

Physical Properties of Bed Materials

property	bed material		
	sand	emery	cast iron
size distribution			
sieve size [μm]		weight fraction	
−425−+300	0.064	0.010	0.012
−300−+212	0.329	0.042	0.108
−212−+150	0.383	0.428	0.276
−150−+106	0.168	0.448	0.320
−106−+75	0.052	0.069	0.190
−75−+0	0.005	0.004	0.094
mean particle diameter [mm]	0.178	0.145	0.110
apparent density [kg/m^3]	2509	3981	6158
bulk density [kg/m^3]	1298	1697	1981

Tabla 21 - Propiedades de la arena para fluidización. Choi et al. 1998.

Como puede verse el rango entre 300 y 150 micras conforma el 70% en peso de la muestra total. El tamaño de partícula medio son 178 micras, aunque a efectos de cálculo se ha tomado 200 micras. Se emplea el dato de densidad de la arena, encontrado en el artículo “Estudios hidrodinámicos con lecho circulante anular fluidizado con partículas de arena”, por P. Sivashanmugam y S. Sundaram donde utilizan un valor para la arena de 2.650 kg/m^3.

b) Datos polietileno:

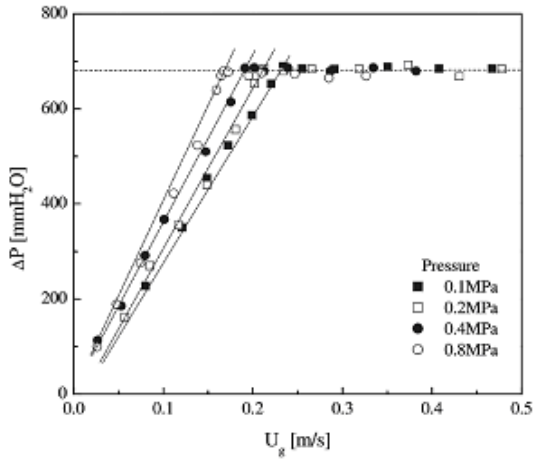
Para el PEAD se emplea el valor de densidad de 935 kg/m^3 considerado previamente para el cálculo de la ecuación de pirólisis, y respecto al diámetro debe elegirse aquél impuesto por la trituradora del pretratamiento. Se ha encontrado una trituradora marca *Lindner* para granulación de materiales de desechos primarios tratados. Dentro de sus categorías se ha encontrado en el catálogo (ver Anexo G) como más adecuada la *Komet-1100*, que es capaz de granular hasta 4 t./h de material entre 10 y 100 mm, por lo que colocando una criba de 10 mm. se

consigue el menor tamaño de partícula posible. El caudal de trabajo son 1,8 t./h, con lo cual la trituradora se adapta perfectamente al trabajar a la mitad de su capacidad.

c) Datos del lecho:

El lecho se va a considerar aquella mezcla de partículas sólidas fluidizadas y el propio gas que circula a través de ellas.

- Temperatura del lecho: 740º C (1013 K). Es el valor considerado para la reacción de pirólisis.
- Caída de presión en el lecho: es igual al peso del lecho entre el área de fluidización, con lo que es un valor más o menos constante para cada tipo de material. Kang et al, 2004 estimaron los valores para partículas de arena de diversos tamaños. En la gráfica se aprecia una caída de presión máxima de unos 690 mm H_2O (6.700 Pa) para una partícula de arena de 590 micras, así que dado que el diámetro de la arena considerada en el proyecto es de 200 micras se va a suponer una caída de presión en el lecho algo inferior, de unos 5.000 Pa.



Gráfica 10: Caída presión en lecho fluidizado con arena. Hang et al. 2004.

- Presión de entrada al lecho: si la caída de presión del lecho es de 5.000 Pa y se considera que a la salida del reactor la presión es atmosférica (101.325 Pa), se estima la presión de entrada al lecho en 106.325 Pa.
- Presión media en el lecho: no es más que la media de la presión a la entrada y la presión a la salida:

$$\overline{P} = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{106.325 + 101.325}{2} = 103.825\ Pa$$

- Peso molecular medio del gas de pirólisis:

	PORCENTAJE RENDIMIENTO (Masa)	**PESO MOLECULAR** (g./mol)
Metano (CH_4)	30	16
Etano (C_2H_6)	8,52	30
Eteno (C_2H_4)	25,2	28
Propeno (C_3H_6)	7	42
Benceno (C_6H_6)	24,3	78
Tolueno (C_7H_8)	4,96	92

$$\overline{P.M.} = 0{,}3 \cdot 16 + 0{,}0852 \cdot 30 + 0{,}252 \cdot 28 + 0{,}07 \cdot 42 + 0{,}243 \cdot 78 + 0{,}0496 \cdot 92 = \\ = 40{,}87\ gr/mol$$

- Densidad media del gas en el reactor: se emplea la ecuación de los gases ideales:

$$\overline{\rho}_{gas,LECHO} = \frac{\overline{P} \cdot \overline{P.M.}}{R \cdot T_{LECHO}} = \frac{103.325\ Pa \cdot 0{,}04087\ kg/mol}{8{,}314\ J/mol \cdot K \cdot (740 + 273)\ K} = 0{,}5038\ kg/m^3$$

- Viscosidad media del gas: en la mayor parte de los gases, la viscosidad se calcula por medio de la fórmula de Sutherland:

$\mu = C_1 \cdot \frac{T^{1,5}}{T + C_2}$, donde T (K) y μ (kg/m.s)

Sólo se ha encontrado las constantes de Sutherland para el metano, por lo que se calcula la viscosidad para dicho gas a 740º C.

Gas	$C_1 \times 10^6$ $\left(\frac{kg}{s \cdot m \cdot K^{0,5}}\right)$	C_2 (K)
Aire	1.458	110.4
Bióxido de carbono	1.55	233.
Monóxido de carbono	1.40	109.
Freón 12	1.48	317.
Helio	1.52	97.8
Hidrógeno	0.649	70.6
Metano	0.983	155.
Nitrógeno	1.39	102.
Oxígeno	1.65	110.

Tabla 22 - Constantes de Sutherland de varios gases. Hall, N.A. Thermodynamics of fluid flow.

$$\mu = C_1 \cdot \frac{T^{1,5}}{T + C_2} = 0{,}983 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{s \cdot m \cdot K^{0,5}} \cdot \frac{(1013\ K)^{1,5}}{1013\ K + 155\ K} = 2{,}71 \cdot 10^{-5}\ \frac{kg}{m \cdot s}$$

Si se halla la viscosidad a 740º C por ejemplo para el H_2 se observa que sale un valor de $1{,}8 \cdot 10^{-5}$ kg/m·s, por lo que el orden de viscosidad es similar a esa temperatura para otros componentes. El metano es el componente con un mayor rendimiento (30%), por lo que se considera la viscosidad de la mezcla como la propia del metano a 740º C.

El resumen final de los datos de partida se presenta en la siguiente tabla:

	Arena	**Polietileno**	**Gas**	**Lecho**
Densidad (kg/m^3)	2.650	935	0,5038	
Diámetro (mm)	0,2	10		
Temperatura (º C)				740

Caída de presión (Pa)				5.000
Presión entrada (Pa)				106.325
Presión salida (Pa)				101.325
Presión media (Pa)				103.825
Peso molecular medio (g./mol)			40,87	
Viscosidad media (kg/m·s)			$2{,}7\cdot10^{-5}$	

Tabla 23 – Resumen datos de partida.

A.2.1.2. Cálculos hidrodinámicos con la arena:

a) Condiciones de mínima fluidización; son representadas por la ecuación:

$$Ga = 150 \cdot \left(\frac{1-\varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \right) \cdot \mathrm{Re}_{mf} + 1{,}75 \cdot \frac{\mathrm{Re}_{mf}^2}{\varepsilon_{mf}^3}$$

Se calculan los parámetros ε_{mf}, Ga para obtener el Re_{mf}:

- Porosidad de minima fluidización (ε_{mf}): en ausencia de datos para materiales específicos, para lechos constituidos por partículas de diámetros comprendidos entre 0,05 mm y 0,5 mm puede estimarse la porosidad mínima mediante la ecuación empírica (el diámetro expresado en micras):

$$\varepsilon_{mf} = 1 - 0{,}356 \cdot (\log D_p - 1) = 1 - 0{,}356 \cdot (\log 200 - 1) = 0{,}5368$$

- Número de Galileo (Ga):

$$Ga = \frac{D_p^3 \cdot \bar{\rho}}{\mu^2} \cdot g \cdot \left(\rho_P - \bar{\rho} \right) = \frac{(0{,}0002\,m)^3 \cdot 0{,}5038\,{kg}/{m^3}}{\left(2{,}7 \cdot 10^{-5}\,{kg}/{m \cdot s} \right)^2} \cdot 9{,}8\,\frac{m}{s^2} \cdot (2650 - 0{,}5038)\,\frac{kg}{m^3}$$

$$; Ga = 143{,}7$$

Por lo que la ecuación de fluidización mínima genera un Reynolds de:

$11{,}31 \cdot \left(\mathrm{Re}_{mf}\right)^2 + 449{,}066 \cdot \mathrm{Re}_{mf} - 143{,}7 = 0$;

; $\mathrm{Re}_{mf} = 0{,}317$ (la otra solución es negativa).

La velocidad mínima de fluidización será:

$$\mathrm{Re}_{mf} = \frac{\overline{\rho} \cdot D_p \cdot V_{mf}}{\mu}; \qquad 0{,}317 = \frac{0{,}5038\ {kg}/{m^3} \cdot 0{,}0002\ m \cdot V_{mf}}{2{,}7 \cdot 10^{-5}\ {kg}/{m \cdot s}}; \quad V_{mf} = 0{,}085\ m/s$$

b) Condiciones de arrastre: como no se conoce el Reynolds de la partícula no se puede saber el régimen y por lo tanto se puede aplicar una ecuación de arrastre concreta. En estos casos se emplea el valor del número de Galileo, de forma que:

$Ga \in (0-36) \rightarrow$ Régimen laminar.

$Ga \in (36-82.312) \rightarrow$ Régimen de transición.

$Ga \in (82.312-1{,}32 \cdot 10^{10}) \rightarrow$ Régimen turbulento.

Como el número de Galileo calculado es 143,7 entonces el régimen es *de transición* y le pertenece una ecuación que da su valor de Reynolds:

$\mathrm{Re}_p = \sqrt{1{,}74^2 \cdot Ga} = \sqrt{1{,}74^2 \cdot 143{,}7} = 20{,}8$; el cual pertenece al intervalo 2-500, luego se confirma que es régimen de transición. Para dicho régimen la ecuación de arrastre es:

$$V_t = \left(\frac{4}{55{,}5} \cdot g \cdot \frac{\left(\rho_P - \bar{\rho}\right)}{\bar{\rho}} \cdot \left(D_P\right)^{1{,}6} \cdot \left(\frac{\bar{\rho}}{\mu} \right)^{0{,}6} \right)^{\frac{1}{1{,}4}}$$; sustituyendo:

$$V_t = \left(\frac{4}{55,5} \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{(2650 - 0,5038)^{kg/m^3}}{0,5038^{kg/m^3}} \cdot (0,0002\ m)^{1,6} \cdot \left(\frac{0,5038 \frac{kg}{m^3}}{2,7 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}} \right)^{0,6} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 1,42\ m/s$$

A.2.1.3. Cálculos hidrodinámicos con el polietileno:

a) Condiciones de mínima fluidización: misma ecuación que la usada en la arena.

$$Ga = 150 \cdot \left(\frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \right) \cdot \mathrm{Re}_{mf} + 1,75 \cdot \frac{\mathrm{Re}_{mf}^2}{\varepsilon_{mf}^3}$$

- Porosidad mínima de fluidización: en este caso no se puede calcular con la ecuación anterior al no pertenecer la partícula al intervalo de diámetros necesario. Como no se puede saber la porosidad, se utiliza la ecuación resumida para hallar el valor de Re_{mf}:

  $Ga = K_1 \cdot \mathrm{Re}_{mf}^2 + K_2 \cdot \mathrm{Re}_{mf}$; siendo K_1 y K_2 valores empíricos medidos por diferentes investigadores:

Valores de las constantes en la ecuación de mínima fluidización.

Investigadores	$K_2/2K_1$	$1/K_1$
Wen y Yu	33.7	0.0408
284 puntos de bibliografía		
Richardson	25.7	0.0365
Saxena y Vogel	25.3	0.0571
Dolomita a alta P y T		
Babu y cols.	23.5	0.0651
Datos hasta 1975		
Grace	27.2	0.0408
Chitester y cols.	28.7	0.0494
Carbón, vidrio hasta 64 bar		

Tabla 24: Valores K_1 y K_2 para la ecuación de mínima fluidización. Tésis doctoral Hernández Férez. 2007.

Se usan los valores de Wen y Yu, por ser los más empleados (Hernández Férez, 2007).

$K_1 = 24{,}51\,; \quad K_2 = 1.651{,}96$

- Número de Galileo:

$$Ga = \frac{D_p^3 \cdot \bar{\rho}}{\mu^2} \cdot g \cdot \left(\rho_P - \bar{\rho} \right) = \frac{(0{,}01\,m)^3 \cdot 0{,}5038\,{kg}/{m^3}}{\left(2{,}7 \cdot 10^{-5}\,{kg}/{m \cdot s}\right)^2} \cdot 9{,}8\,\frac{m}{s^2} \cdot (935 - 0{,}5038)\,\frac{kg}{m^3} =$$

$$= 6.335.743{,}966$$

Así, la ecuación de fluidización mínima genera un Reynolds de:

$$24{,}51 \cdot \left(\mathrm{Re}_{mf}\right)^2 + 1.651{,}96 \cdot \mathrm{Re}_{mf} - 6.335.744 = 0\,; \qquad \mathrm{Re}_{mf} = 475{,}843$$

Y la velocidad mínima de fluidización será:

$$\mathrm{Re}_{mf} = \frac{\bar{\rho} \cdot D_p \cdot V_{mf}}{\mu}\,; \qquad 475{,}843 = \frac{0{,}5038\,{kg}/{m^3} \cdot 0{,}01\,m \cdot V_{mf}}{2{,}7 \cdot 10^{-5}\,{kg}/{m \cdot s}}\,; \quad V_{mf} = 2{,}55\ m/s$$

b) Condiciones de arrastre: como el número de Galileo calculado es 6.335.743, entonces el régimen es *turbulento* y le corresponde una ecuación:

$\mathrm{Re}_p = \sqrt{1{,}74^2 \cdot Ga} = \sqrt{1{,}74^2 \cdot 6.335.743} = 4.379{,}73 > 500$, luego se confirma que es régimen turbulento. Para dicho régimen la ecuación de arrastre es:

$$V_t = 1{,}74 \cdot \sqrt{g \cdot D_P \cdot \left(\frac{\rho_P - \overline{\rho}}{\overline{\rho}} \right)} = 1{,}74 \cdot \sqrt{9{,}8 \frac{m}{s^2} \cdot 0{,}01 m \cdot \left(\frac{935 - 0{,}5038}{0{,}5038} \right)} = 23{,}46 \, m/s$$

A.2.1.4. Resumen de cálculos hidrodinámicos:

	Número de Galileo	**Velocidad mínima de fluidización (m/s)**	**Velocidad de arrastre (m/s)**	**Cociente V_t/V_{mf}**
Arena	143,7	0,085	1,42	16,7
Polietileno	6.335.743	2,55	23,46	9,2

El cociente entre velocidades está relacionado directamente con el número de Galileo, de forma que cuanto mayor es éste mayor será el diámetro de la partícula y, por tanto, presentará una velocidad de arrastre mayor.

Tras calcular las distintas velocidades mínimas y máximas para los dos tipos de partículas en el reactor de lecho fluidizado, hay que seleccionar un valor de velocidad de fluidización que luego se usará en el diseño. El polietileno es la materia prima a pirolizar y al entrar en el reactor se vuelve un material pegajoso, por lo que no debe arrastrarse hacia fuera en ningún momento, o colapsaría el ciclón. Se va a considerar para el diseño por tanto una velocidad de fluidización de 3 m/s, porque permite al plástico fluidizarse en el sistema sin riesgo de ser arrastrado, mientras que para la arena supone un valor algo superior a su velocidad de arrastre y conllevará una recirculación de arena a través del ciclón para no vaciar al reactor.

Con la velocidad de fluidización elegida de 3 m/s, se obtienen los valores de Reynolds para ambas partículas en el lecho:

$$\left(\mathrm{Re}_p\right)_{arena} = \frac{0{,}5038 \frac{kg}{m^3} \cdot 0{,}0002 \, m \cdot 3 \, m/s}{2{,}7 \cdot 10^{-5} \, kg/m \cdot s} = 11{,}2$$

Régimen de transición.

$$\left(\mathrm{Re}_p\right)_{polietileno} = \frac{0{,}5038\,\frac{kg}{m^3}\cdot 0{,}01\,m\cdot 3\,{}^{m}\!/_{s}}{2{,}7\cdot 10^{-5}\,{}^{kg}\!/_{m\cdot s}} = 559{,}78$$ Régimen turbulento.

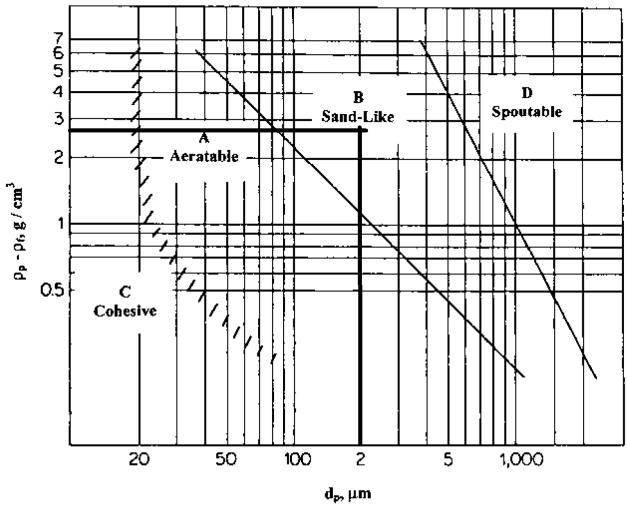
A.2.2. Cálculo del régimen de fluidización:

A.2.2.1. Clasificación del sistema dentro de los grupos de Geldart:

En la fluidización gas-sólido, por encima del estado de mínima fluidización no todos los sólidos se comportan de la misma forma. Geldart (1973) clasificó los sólidos fluidizados en 4 grupos, cuyas características son:

Tipo	Características
A	Aireables, tamaño pequeño y baja densidad.
B	Tipo arena. Fluidización buena y formación de burbujas vigorosas.
C	Partículas cohesivas, polvos muy finos. Muy mala calidad de fluidización debido a las fuerzas interparticulares.
D	Partículas grandes. Formación de grandes burbujas y slugs.

Según las densidades de las partículas, su diámetro y la densidad del gas de fluidización, representó en una gráfica las fronteras entre los grupos:



Gráfica 11 – Clasificación Geldart de partículas.

$$\rho_p - \rho_f \left(\frac{g}{cm^3}\right) = 2{,}65 - 5{,}038 \cdot 10^{-4} = 2{,}649 \, g/cm^3$$

$$d_p = 200 \ \mu m$$

Según las condiciones del proyecto, y como cabía esperar, se confirma que la arena de 200 micras de diámetro y fluidizada por el gas de pirólisis pertenece al grupo B. Grace (1986) sugirió nuevas fronteras entre los grupos de Geldart basándose en el número de Galileo, también válidas para gases diferentes del aire y a temperaturas y presiones que no fueran las del ambiente. De forma que:

- Entre Grupos A y B:

$$Ga = 1{,}03 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f}\right)^{-1.275} = 1{,}03 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{2.650 - 0{,}5038}{0{,}5038}\right)^{-1.275} = 18{,}56$$

- Entre Grupos B y D: $Ga = 1{,}45 \cdot 10^5$

En 1998 Goossen también clasificó los grupos de Geldart tanto para gases como para líquidos de fluidización usando como fronteras con el número de Galileo, al suponer que los fenómenos laminares y turbulentos dirigen el comportamiento del fluido:

Frontera Grupo C: Ga = 0,97
Frontera Grupo A/C: Ga = 9,8
Frontera Grupo A/B: Ga = 88,5
Frontera brupo B/D: Ga = 176.900

El valor de Ga hallado para la arena es de 143,7; por lo que pertenece al intervalo del Grupo B tanto para Grace como para Goossen.

Otra forma de confirmar que el lecho pertenece al Grupo B es mediante el cálculo de la velocidad mínima de burbujeo (V_{mb}), que es la velocidad de fluidización a partir de la cual las primeras burbujas de gas aparecen. Geldart y Abrahamsen (1978) observaron que:

$$\frac{V_{mb}}{V_{mf}} = \frac{4{,}125 \cdot 10^4 \cdot \mu_g^{0,9} \cdot \rho_f^{0,1}}{(\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot d_p};$$

$$;\frac{V_{mb}}{0{,}085\, m/s} = \frac{4{,}125 \cdot 10^4 \cdot \left(2{,}71 \cdot 10^{-5}\, kg/m \cdot s\right)^{0,9} \cdot \left(0{,}5038\, kg/m^3\right)^{0,1}}{(2650 - 0{,}5038)\frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}8\frac{m}{s^2} \cdot 0{,}0002 m}; \quad V_{mb} = 0{,}0489\, m/s$$

Normalmente se cumple que $V_{mb} < V_{mf}$ para partículas del Grupo B de Geldart, al que pertenece la arena. En este caso es cierto, ya que 0,0489 m/s < 0,085 m/s.

A.2.2.2. Determinación del régimen de fluidización:

Todos los parámetros calculados para los sólidos en el lecho van a ser referidos a la arena, que es el medio de fluidización y además tiene una

presencia másica mayoritaria (ver anexo A.2.4.). Los parámetros de para el gas van a ser referidos al gas de pirólisis recirculado que actúa como gas de fluidización. Se va a determinar si el sistema tiene una fluidización particulada o agregativa, en función de unos criterios que se resumen en la siguiente tabla:

Criteria for particulate fluidization	Reference
$\mathrm{Fr} = \frac{U_{\mathrm{mf}}^2}{g d_{\mathrm{p}}} < 0.13$	Wilhelm and Kwauk (1948)
$\frac{(D_{\mathrm{B}})_{\max}}{d_{\mathrm{p}}} < 30; (D_{\mathrm{B}})_{\max} = \frac{2U_{\mathrm{t}}^2}{g}$	Harrison et al. (1961)
$U_{\mathrm{mf}} < 0.2$ cm/s	Rowe (1962)
$\frac{U_{\mathrm{mf}}^3(\rho_{\mathrm{p}} - \rho_{\mathrm{f}})H_{\mathrm{mf}}}{g\mu D} < 100$	Romero and Johanson (1962)

Tabla 25 – Criterios de transición entre régimen de fluidización particulado y agregativo.

Donde:

Fr : número de Froude.

D_B : Diámetro de burbuja.

H_{mf}: Altura mínima de fluidización del lecho.

D : Diámetro del lecho.

Si se cumplen los criterios, la fluidización será particulada. Si no, será agregativa:

$$Fr = \frac{V_{mf}^2}{g \cdot d_p} < 0{,}13\,; \quad \frac{\left(0{,}085\,m/s\right)^2}{9{,}8\,m/s^2 \cdot 0{,}0002m} = 3{,}68 > 0{,}13 \rightarrow \text{agregativa.}$$

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{(D_B)_{MAX}}{dp} < 30\,; \\ (D_B)_{MAX} = \dfrac{2 \cdot V_t^2}{g}\,; \end{array}\right| \quad \frac{2 \cdot \left(1{,}42\,m/s\right)^2}{9{,}8\,m/s^2 \cdot 0{,}0002m} = 2.057{,}55 > 30 \rightarrow \text{agregativa.}$$

$V_{mf} = 8{,}5\,cm/s > 0{,}2\,cm/s$ → agregativa.

$$\frac{V_{mf}^3 \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot L_{mf}}{g \cdot \mu_g \cdot D_{lecho}} = \frac{(0{,}085\,m/s)^3 \cdot (2.650 - 0{,}5038)\,kg/m^3 \cdot 0{,}415m}{9{,}8\,m/s^2 \cdot 2{,}71 \cdot 10^{-5}\,kg/m \cdot s \cdot 1{,}162m} = 2.188{,}1 > 100 \rightarrow$$

agregativa.

Además, Harrison et al. (1961) sugirieron que se podría esperar una fluidización totalmente agregativa si el cociente entre el máximo tamaño de una burbuja estable y el diámetro de partícula, $(D_B)_{max}/d_p$, fuera mayor de 10 cuando no hubiera efectos de pared (que la burbuja fuera menor al diámetro del lecho). Propusieron la ecuación:

$$\frac{(D_B)_{\max}}{d_p} = 71{,}3 \cdot \left(\frac{\mu_g^2}{g \cdot d_p^3 \cdot \rho_f^2}\right) \cdot \left[\frac{\left(\frac{\rho_p}{\rho_p - \rho_f}\right) - \varepsilon_{mf}}{1 - \varepsilon_{mf}}\right] \cdot \left[\left(1 + \frac{g \cdot d_p^3 \cdot \rho_f}{54 \cdot \mu_g^2} \cdot (\rho_p - \rho_f)\right)^{1/2} - 1\right]^2;$$

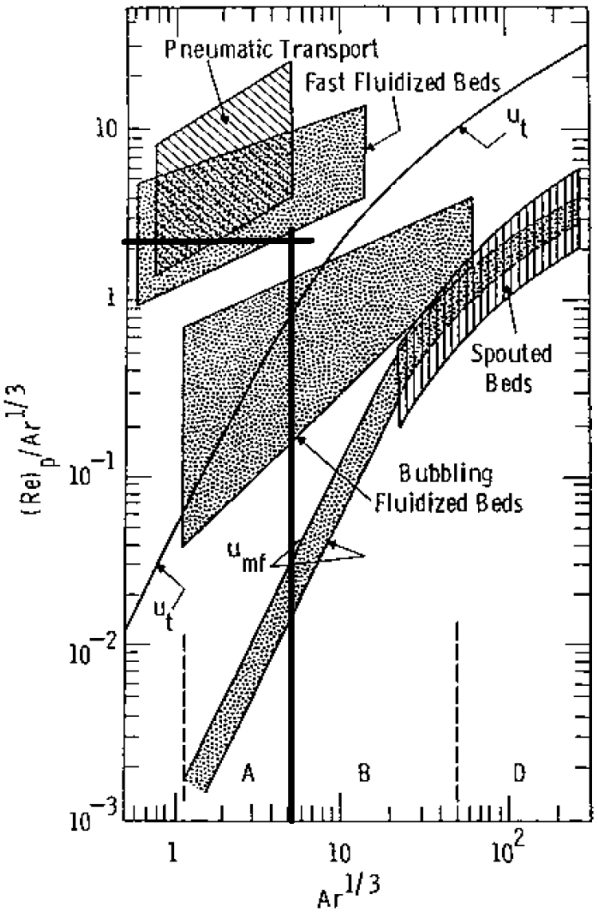
$$\frac{(D_B)_{\max}}{d_p} = 71{,}3 \cdot \left(\frac{\left(2{,}71 \cdot 10^{-5}\,kg/m \cdot s\right)^2}{9{,}81\frac{m}{s^2} \cdot (0{,}0002m)^3 \cdot \left(0{,}5038\frac{kg}{m^3}\right)^2}\right) \cdot \left[\frac{\left(\frac{2.650}{2.650 - 0{,}5038}\right) - 0{,}5368}{1 - 0{,}5368}\right] \cdot$$

$$\cdot \left[\left(1 + \frac{9{,}81\frac{m}{s^2} \cdot (0{,}0002m)^3 \cdot 0{,}5038\frac{kg}{m^3}}{54 \cdot \left(2{,}71 \cdot 10^{-5}\,kg/m \cdot s\right)^2} \cdot (2.650 - 0{,}5038)\frac{kg}{m^3}\right)^{1/2} - 1\right]^2;$$

$$\frac{(D_B)_{\max}}{d_p} = 2.169{,}49 >> 10 \rightarrow \text{agregativa.}$$

Una vez se ha demostrado que el régimen de fluidización es agregativo, se va a calcular qué tipo de régimen agregativo es. Antes de hacer los cálculos, en la siguiente gráfica se aprecia que según los valores de Reynolds y Galileo, las

condiciones de fluidización pertenecen a un punto de transición entre la fluidización por burbujeo y la fluidización rápida:



Gráfica 12 – Regímenes de fluidización. Handbook of fluidization and fluid-particle systems.

$$\left(\mathrm{Re}_p\right)_{arena} = 11{,}2 \rightarrow \frac{(\mathrm{Re})_p}{(Ga)^{1/3}} = \frac{11{,}2}{5{,}238} = 2{,}14$$

$$Ga = 143{,}7 \rightarrow (Ga)^{1/3} = 5{,}238$$

En la siguiente tabla se observan los valores límite de velocidad entre los diferentes regímenes. Con ellos y sus ecuaciones se podrá situar la velocidad de fluidización empleada en el sistema, es decir, 3 m/s:

Velocity range	Fluidization regime	Fluidization features and appearance
$0 \leq U < U_{mf}$	Fixed bed	Particles are quiescent; gas flows through interstices
$U_{mf} \leq U < U_{mb}$	Particulate regime	Bed expands smoothly and homogeneously with small-scale particle motion; bed surface is well defined
$U_{mb} \leq U < U_{ms}$	Bubbling regime	Gas bubbles form above distributor, coalesce and grow; gas bubbles promote solids mixing during rise to surface and breakthrough
$U_{ms} \leq U < U_c$	Slug flow regime	Bubble size approaches bed cross section; bed surface rises and falls with regular frequency with corresponding pressure fluctuation
$U_c \leq U < U_k$	Transition to turbulent fluidization	Pressure fluctuations decrease gradually until turbulent fluidization regime is reached
$U_k \leq U < U_{tr}$	Turbulent regime	Small gas voids and particle clusters and streamers dart to and fro; bed surface is diffused and difficult to distinguish
$U > U_{tr}$	Fast fluidization	Particles are transported out of the bed and need to be replaced and recycled; normally has a dense phase region at bottom coexisting with a dilute phase region on top; no bed surface
$U \gg U_{tr}$	Pneumatic conveying	Usually a once-through operation; all particles fed are transported out in dilute phase with concentration varying along the column height; no bed surface

Tabla 26 – Descripción de los diferentes regímenes de fluidización. Handbook of fluidization and fluid-particle systems.

- Los valores de V_{mf} y V_{mb} son ya conocidos e inferiores a los 3 m/s de fluidización.

- El régimen de slugging (V_{ms}) sólo se producirá si se cumplen ciertos criterios. Stewart y Davidson (1967) estimaron un criterio para slugs con altura igual al diámetro del lecho y cuya distancia entre ellas fuera dos veces el diámetro del lecho:

$$V - V_{mf} > 0{,}2 \cdot V_s = 0{,}2 \cdot \left(0{,}35 \cdot \sqrt{g \cdot D}\right);$$

$$(3 - 0{,}085)\frac{m}{s} > 0{,}2 \cdot \left(0{,}35 \cdot \sqrt{9{,}8\frac{m}{s^2} \cdot 1{,}162m}\right);$$

$$2{,}915\frac{m}{s} > 0{,}236\frac{m}{s}$$

Luego, según este criterio es posible que se produjera slugging debido al pequeño diámetro del lecho y a la elevada velocidad de fluidización de la arena, escogida para favorecer la fluidización del plástico. Pero como se ha

mencionado previamente, para que se produzca slugging el lecho debe tener una altura mínima o las burbujas no tendrán tiempo de coalescer.

Baeyens y Geldart (1974) enunciaron que en un lecho operado con una velocidad en exceso hay tres zonas y estimaron sus alturas. Enumeradas de la más baja a la más alta:

- Zona 1: lecho fluidizado con burbujeo libre.

$$H_1 = \frac{\left(D_{lecho} - 2{,}51 \cdot D_{lecho}^{0,2}\right)}{0{,}13 \cdot D_{lecho}^{0,47}} \text{ (D en cm.);}$$

$$; H_1 = \frac{\left(116{,}2 - 2{,}51 \cdot 116{,}2^{0,2}\right)}{0{,}13 \cdot 116{,}2^{0,47}} = 90{,}28\ cm$$

- Zona 2: coalescencia creciente de burbujas que forman slugs.

- Zona 3: coalescencia completa con slugs estables.

$$H_3 = 60 \cdot D_{lecho}^{0,175} \text{ (D en cm.)} \rightarrow H_3 = 60 \cdot (116{,}2)^{0,175} = 137{,}89\ cm$$

Al aplicar el modelo de flujo de Kunii-Levenspiel (capítulo A.2.5.), se comprueba que la altura del lecho fluidizado es de 107 cm., con lo cual la zona 3 no existe en el lecho y la zona dos sólo ocupa los últimos 16,72 cm. Por tanto, el 84,37% del lecho no está sujeto a la coalescencia de las burbujas.

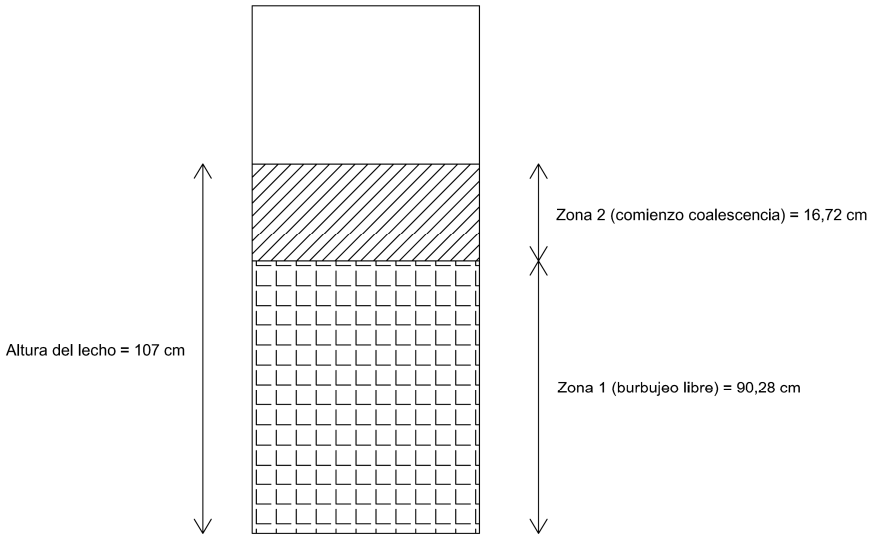


Figura 57 – Zonas del lecho, según Baeyens y Geldart.

Este hecho es confirmado por los estudios de Darton et al. (1977), en los que el fenómeno de slugging ocurre si se dan las siguientes condiciones:

$$\frac{H_{lecho}}{D_{lecho}} > 3{,}5 \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{N_o}}\right)$$

N_o es el número de orificios que tiene la placa distribuidora del gas de fluidización, y que se obtiene más adelante como 21. Sustituyendo:

$$\frac{107\ cm}{116{,}2\ cm} = 0{,}92$$

$$3{,}5 \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{21}}\right) = 2{,}736$$

$0{,}92 < 2{,}736$ → luego no ocurre slugging.

- La velocidad de fluidización "V_c" corresponde a las condiciones de operación en las que las burbujas alcanzan su diámetro máximo, y a partir de ese punto un incremento de velocidad implica una transición al régimen turbulento en el que dichas burbujas se empiezan a romper en otras más pequeñas para estabilizarse a la velocidad V_k, con el régimen turbulento completamente desarrollado. El último valor de velocidad, V_{tr}, representa el

régimen de fluidización rápida, en la que es necesario una recirculación del lecho porque éste es arrastrado. Las diferentes ecuaciones de cálculo de los diferentes autores de estudios de fluidización son:

Velocidad de fluidización	Ecuación	Autor
Velocidad de transición al régimen turbulento (V_c)	$\frac{d_p \cdot \rho_g \cdot V_c}{\mu_g} = 0{,}936 \cdot (Ga)_{arena}^{0,472}$	Horio (1986)
	$\frac{d_p \cdot \rho_g \cdot V_c}{\mu_g} = 0{,}57 \cdot (Ga)_{arena}^{0,46}$	Cai et al. (1989)
	$\frac{d_p \cdot \rho_g \cdot V_c}{\mu_g} = 1{,}24 \cdot (Ga)_{arena}^{0,45}$ $2 < Ga < 1 \cdot 10^8$	Bi and Grace (1995)
Velocidad de régimen turbulento (V_k)	$\frac{d_p \cdot \rho_g \cdot V_k}{\mu_g} = 1{,}46 \cdot (Ga)_{arena}^{0,472}$	Canada et al (1978)
	$\frac{d_p \cdot \rho_g \cdot V_k}{\mu_g} = 1{,}41 \cdot (Ga)_{arena}^{0,56}$	Yerushalmi et al. (1978)
	$\frac{d_p \cdot \rho_g \cdot V_k}{\mu_g} = 1{,}95 \cdot (Ga)_{arena}^{0,453}$	Perales et al. (1990)
	$\frac{d_p \cdot \rho_g \cdot V_k}{\mu_g} = 2{,}274 \cdot (Ga)_{arena}^{0,419} \cdot \left(\frac{V_t}{\sqrt{g} \cdot D_{lecho}} \right)^{0,0015}$ $Ga \geq 125$	Bi and Fan (1992)
Velocidad de fluidización rápida (V_{tr})	$\frac{d_p \cdot \rho_g \cdot V_{tr}}{\mu_g} = 1{,}41 \cdot (Ga)^{0,483}$	Perales et al. (1990)
	$\frac{d_p \cdot \rho_g \cdot V_{tr}}{\mu_g} = 2{,}28 \cdot (Ga)^{0,419}$	Bi and Fan (1992)

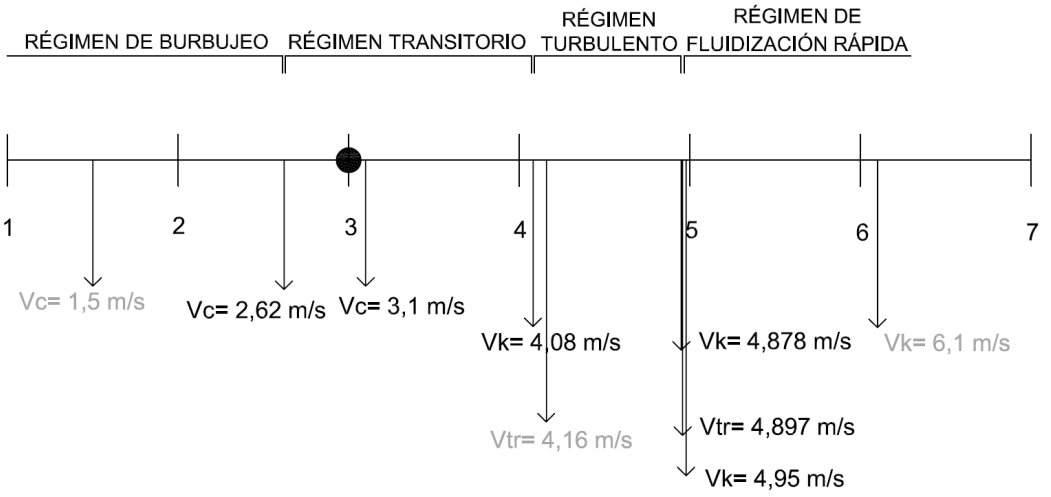
Tabla 28 - Ecuaciones de fluidización de diferentes autores.

Tras hacer los cálculos, los resultados de las ecuaciones son:

Velocidad de fluidización	Resultado ecuación	Autor
Velocidad de transición al régimen turbulento (V_c)	$V_c = 2{,}62\ m/s$	Horio (1986)
	$V_c = 1{,}5\ m/s$	Cai et a. (1989)
	$V_c = 3{,}1\ m/s$	Bi and Grace (1995)
Velocidad de régimen turbulento (V_k)	$V_k = 4{,}08\ m/s$	Canada et al (1978)
	$V_k = 6{,}1\ m/s$	Yerushalmi et al. (1978)
	$V_k = 4{,}95\ m/s$	Perales et al. (1990)
	$V_k = 4{,}878\ m/s$	Bi and Fan (1992)
Velocidad de fluidización rápida (V_{tr})	$V_k = 4{,}16\ m/s$	Perales et al. (1990)
	$V_k = 4{,}897\ m/s$	Bi and Fan (1992)

Tabla 29 - Resultados de las ecuaciones de fluidización de diferentes autores.

Situando los resultados en un rango y eliminando aquellos valores extremos o que no sigan la tendencia, se observa que cuando el sistema se somete a una velocidad de 3 m/s se sitúa en un régimen transitorio entre el burbujeo y el régimen turbulento:



Este resultado coincide con la gráfica de regímenes vista al principio, que también lo situaba en una zona de transición. En estas circunstancias, existe el lecho de burbujeo, pero en su zona superior las burbujas se vuelven inestables y comienzan a coalescer, provocando que la arena explote y salga proyectada hacia arriba.

A.2.3. Estimación del coeficiente de recirculación del gas al reactor:

Una parte del propio gas de pirólisis saliente se recircula al reactor para emplearlo como gas fluidizante, y el resto se lleva al postratamiento. Según el coeficiente de recirculación (R) el gas entrante tendrá mayor o menor caudal, y eso influye en el tiempo de residencia de los gases, que deben permanecer en el reactor alrededor de 2 segundos (anexo A.1) para favorecer los rendimientos considerados para los productos. Por esto el valor de R va a condicionar las dimensiones del reactor.

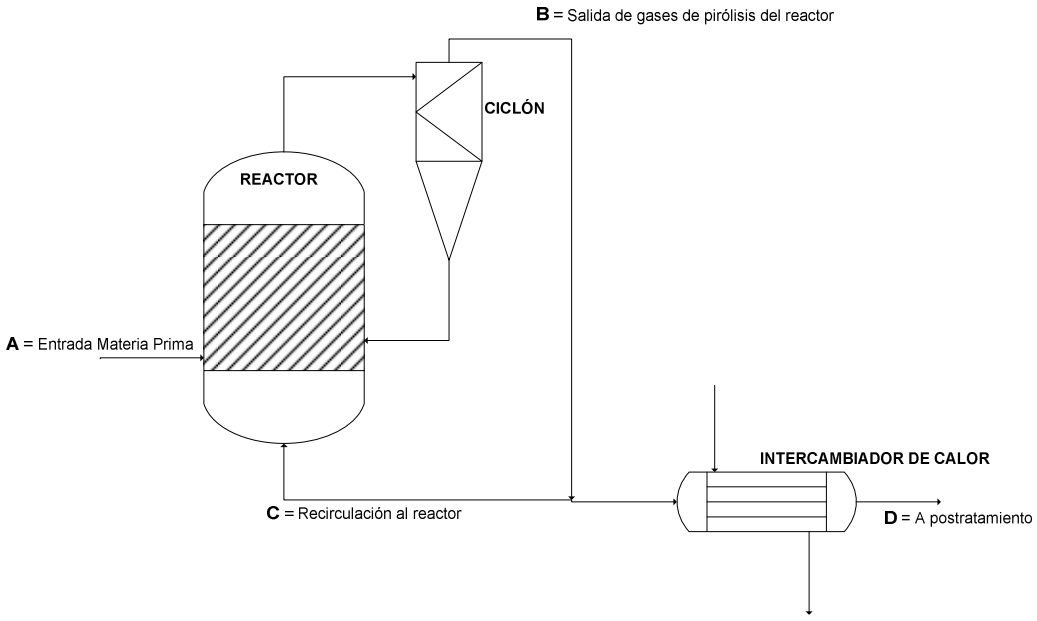


Figura 80 – Esquema de la unidad pirolítica y sus corrientes.

Operando con las corrientes el esquema queda simplificado:

$$\begin{aligned} B &= A + C; \\ C &= R \cdot B; \\ D &= (1-R) \cdot B \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} B &= \frac{A}{1-R}; \\ C &= \frac{R \cdot A}{1-R}; \\ D &= A \end{aligned}$$

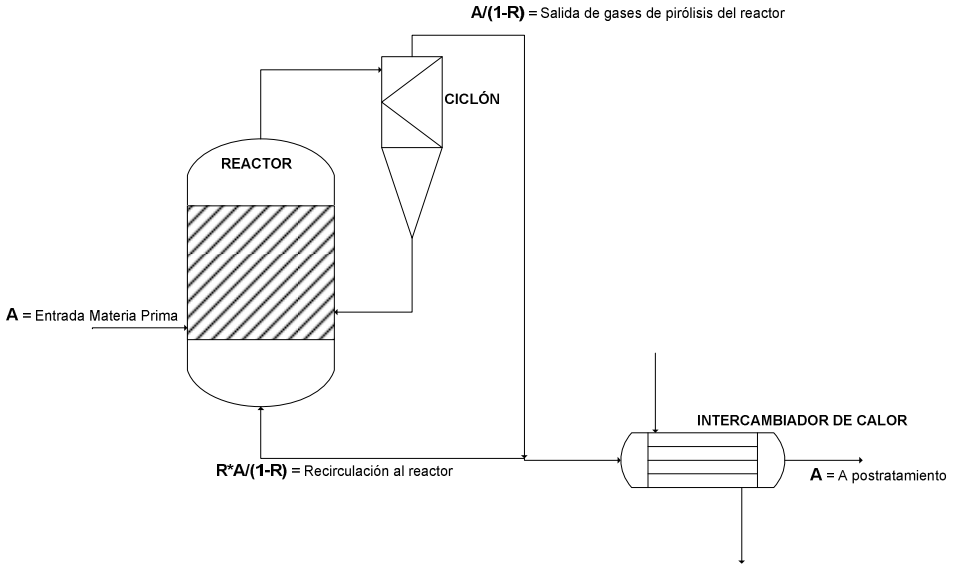


Figura 81 – Esquema de la unidad pirolítica y sus corrientes simplificadas.

Para obtener el coeficiente de recirculación se va a proceder a realizar un cálculo de "prueba-error" y así determinar el valor de R que produzca un tiempo de residencia de los gases lo más cercano a los dos segundos. El procedimiento es el siguiente:

- Se supone un valor del coeficiente de recirculación (R).
- Se obtiene un dato del caudal másico del gas recirculado de fluidización (corriente C).
- Mediante la densidad media del gas en las condiciones del reactor se obtiene el caudal volumétrico del gas recirculado.
- Con el caudal volumétrico del gas de entrada y la velocidad de fluidización se obtiene la superficie del reactor. Con el dato de superficie se calculan otros tres parámetros:
  - Radio del reactor (el reactor se supone tiene forma cilíndrica).
  - Masa de arena a emplear:

    $$Masa\ arena = \rho_{arena} \cdot Superficie\ reactor \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot L_{mf}$$

    El único dato que falta en esta fórmula es la longitud mínima de fluidización (L_{mf}), que se procede a calcular:

    $$\Delta P_{lecho} = L_{mf} \cdot g \cdot \left(\rho_P - \bar{\rho} \right) \cdot (1 - \varepsilon_{mf}); \qquad L_{mf} = \frac{\Delta P_{lecho}}{g \cdot \left(\rho_P - \overline{\rho_{gas}} \right) \cdot (1 - \varepsilon_{mf})};$$

    $$L_{mf} = \frac{5.000\ Pa}{9{,}8\ \frac{m}{s^2} \cdot (2650 - 0{,}5038)\ {}^{kg}\!/_{m^3} \cdot (1 - 0{,}5368)} = 0{,}415\ m$$

  - Longitudes del reactor: se consigue suponiendo diferentes relaciones L/D para el reactor. Con este dato y la superficie del reactor se despeja el diámetro. Respecto al valor de L/D, existen diversas referencias para reactores de pirólisis:

Referencia	L/D
Keusenkothen, Paul F. et al. “Pyrolysis reactor conversión of hydrocarbon feedstocks into higher value hydrocarbons.”	0,1 – 5
Sridhar K. Iya, Williamsville et al. “Heating method for silane pirólisis reactor.”	3 – 6
Mukunda, H.S. et al. “Thermo-chemical conversión of biomass. A retrospective and a prospective.”	6 – 8
Desconocido (China papers).	5 – 6

Se usará un rango para la relación L/D de 2 a 5 en el cálculo.

- Cada longitud del reactor obtenida permite obtener junto con el radio del reactor diferentes volúmenes de reacción.
- Se obtienen diferentes valores de tiempos de residencia al dividir cada volumen de reacción entre el caudal volumétrico del gas de fluidización, y se eligen aquellos valores que se acerquen a los dos segundos.

COEF. RECIRCULACIÓN	CAUDAL MÁSICO GAS RECIRCULADO (kg/h)	CAUDAL VOLUMÉTRICO GAS RECIRCULADO (m^3/h)	SECCIÓN REACTOR (m^2)	RADIO REACTOR (m)	MASA DE ARENA (kg)	L/D	LONG REACTOR (m)	VOLUMEN REACTOR (m^3)	TIEMPO DE RESIDENCIA (seg)
0,1	202,421	401,770	0,037	0,109	18,964	2	0,435	0,016	0,145
						3	0,653	0,024	0,218
						4	0,871	0,032	0,290
						5	1,088	0,040	0,363
0,2	455,448	903,983	0,084	0,163	42,670	2	0,653	0,055	0,218
						3	0,979	0,082	0,326
						4	1,306	0,109	0,435
						5	1,632	0,137	0,544
0,3	780,768	1549,686	0,143	0,214	73,148	2	0,855	0,123	0,285
						3	1,282	0,184	0,427
						4	1,710	0,245	0,570
						5	2,137	0,307	0,712
0,4	1214,529	2410,622	0,223	0,267	113,786	2	1,066	0,238	0,355
						3	1,599	0,357	0,533
						4	2,132	0,476	0,711
						5	2,665	0,595	0,888
0,5	1821,793	3615,933	0,335	0,326	170,679	2	1,306	0,437	0,435
						3	1,959	0,656	0,653
						4	2,612	0,874	0,871
						5	3,265	1,093	1,088
0,6	2732,690	5423,900	0,502	0,400	256,019	2	1,599	0,803	0,533
						3	2,399	1,205	0,800
						4	3,199	1,606	1,066
						5	3,998	2,008	1,333
0,7	4250,850	8437,178	0,781	0,499	398,251	2	1,995	1,558	0,665
						3	2,992	2,337	0,997
						4	3,989	3,117	1,330
						5	4,987	3,896	1,662

Tabla 30 – Procedimiento prueba-error para el cálculo del coeficiente de recirculación del gas en el reactor.

0,8	7287,172	14463,733	1,339	0,653	682,716	2	2,612	3,498	0,871
						3	3,917	5,246	1,306
						4	5,223	6,995	1,741
						5	6,529	8,744	**2,176**
0,9	16396,137	32543,400	3,013	0,979	1536,112	2	3,917	11,804	1,306
						3	5,876	17,707	**1,959**
						4	7,835	23,609	2,612
						5	9,794	29,511	3,265
Se afina el rango entre 0,75 y 0,9:									
0,75	5465,379	10847,800	1,004	0,565	512,037	2	2,262	2,272	0,754
						3	3,393	3,408	1,131
						4	4,523	4,544	1,508
						5	5,654	5,679	1,885
0,76	5769,011	11450,456	1,060	0,581	540,484	2	2,324	2,464	0,775
						3	3,486	3,696	1,162
						4	4,647	4,927	1,549
						5	5,809	6,159	**1,936**
0,77	6099,046	12105,516	1,121	0,597	571,404	2	2,389	2,678	0,796
						3	3,584	4,017	1,195
						4	4,779	5,356	1,593
						5	5,973	6,695	**1,991**
0,78	6459,084	12820,127	1,187	0,615	605,135	2	2,459	2,919	0,820
						3	3,688	4,378	1,229
						4	4,918	5,837	1,639
						5	6,147	7,297	**2,049**
0,79	6853,412	13602,797	1,260	0,633	642,078	2	2,533	3,190	0,844
						3	3,799	4,785	1,266
						4	5,065	6,380	1,688
						5	6,332	7,975	**2,111**

Tabla 31 – Procedimiento prueba-error para el cálculo del coeficiente de recirculación del gas en el reactor. Continuación (a).

0,85	10323,494	20490,289	1,897	0,777	967,181	2	3,108	5,898	1,036
						3	4,663	8,846	1,554
						4	6,217	11,795	**2,072**
						5	7,771	14,744	2,590
0,86	11191,014	22212,162	2,057	0,809	1048,457	2	3,236	6,656	1,079
						3	4,855	9,985	1,618
						4	6,473	13,313	**2,158**
						5	8,091	16,641	2,697
0,87	12191,999	24198,939	2,241	0,845	1142,237	2	3,378	7,569	1,126
						3	5,067	11,354	1,689
						4	6,756	15,138	**2,252**
						5	8,445	18,923	2,815
0,88	13359,815	26516,845	2,455	0,884	1251,646	2	3,536	8,682	1,179
						3	5,304	13,023	1,768
						4	7,072	17,364	2,357
						5	8,840	21,706	2,947
0,89	14739,962	29256,188	2,709	0,929	1380,949	2	3,714	10,062	1,238
						3	5,572	15,093	**1,857**
						4	7,429	20,124	**2,476**
						5	9,286	25,155	3,095

Tabla 32 – Procedimiento prueba-error para el cálculo del coeficiente de recirculación del gas en el reactor. Continuación (b).

Se van a considerar aquellos valores de recirculación cuyo tiempo de residencia esté entre 1,9 y 2,2 ya que es el tiempo que para el que la reacción de pirólisis produce el rendimiento en productos empleado en los cálculos:

Coef. Recirculación	L/D	Tiempo de residencia (s.)
0,76	5	1,936
0,77	5	1,991
0,78	5	2,049
0,79	5	2,111
0,80	5	2,176
0,85	4	2,072
0,86	4	2,158
0,87	4	2,252
0,89	3	1,857
0,9	3	1,959

Cuanto más bajo es el coeficiente de recirculación menor es el caudal de recirculación, pero a su vez presenta relaciones L/D más elevadas para cumplir con los tiempos de residencia. Conforme el coeficiente de recirculación aumenta ocurre al contrario.

Se va a elegir por tanto el coeficiente de recirculación más bajo de los considerados (0,76), pues el régimen de fluidización en el reactor es de transición y así, al presentar una relación L/D elevada, proporciona una “zona de desactivación” mayor del lecho fluidizado. Esto significa una zona mayor donde las partículas arrastradas puedan perder su energía potencial y caer de nuevo, evitando ser arrastradas.

Los datos obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Coeficiente de recirculación del gas de pirólisis al reactor como gas fluidizante	0,76
Caudal másico del gas de pirólisis recirculado	5769,01 kg/h
Caudal volumétrico del gas de pirólisis recirculado	11450,45 m^3/h
Sección del reactor	1,06 m^2
Radio del reactor	0,58 m
Masa de arena en el lecho	540,48 kg.
Relación L/D del reactor	5
Longitud del reactor	5,81 m
Volumen del reactor	6,16 m^3
Tiempo de residencia de los gases de pirólisis en el reactor	1,94 s.

Tabla 33 – Tabla resumen de los parámetros asociados en el cálculo del coeficiente de recirculación al reactor.

A.2.4. Cinética de la pirólisis del PEAD en lecho fluidizado:

En el craqueo térmico del polietileno en lecho fluidizado las partículas sólidas del plástico, una vez dentro del lecho fluidizado, van liberando los componentes volátiles cuando éstas alcanzan la temperatura de descomposición. De esta forma van disminuyendo de volumen hasta que llegan a desaparecer totalmente.

Al caracterizar la reacción cinéticamente cabe decir, por tanto, que es una reacción heterogénea no catalítica sólido-gas donde el tamaño de la partícula sólida va decreciendo progresivamente al volatilizarse. En un principio parece encajar en el "*Modelo de núcleo sin reaccionar para partículas de tamaño decreciente*" en donde la reacción tiene lugar primero en la superficie exterior de la partícula sólida, y después la zona de reacción se desplaza hacia el interior del sólido.

Pero las suposiciones de dicho modelo y la particularidad de la pirólisis divergen en un aspecto: el modelo supone la existencia de un reactante gaseoso que penetra la película gaseosa alrededor del sólido, reacciona con la superficie del sólido y luego los productos de reacción difunden hacia fuera al seno del gas de nuevo. La pirólisis es un craqueo térmico donde las moléculas del sólido se rompen por efecto del calor y son liberadas al exterior, con lo cual sólo existe el paralelismo de la última etapa de liberación del producto gaseoso (el cual puede a su vez reaccionar o no con el sólido por mecanismos conocidos como "recombinación").

Trasladando la cuestión a la literatura científica relacionada, existen numerosas menciones que expresan satisfactoriamente tanto la cinética de la pirólisis de polímero sólido como la de las reacciones secundarias de los productos gaseosos a una y varias reacciones de primer orden, respectivamente. Para el caso de la cinética de reacción del polímero sólido, puede describirse por un único paso de descomposición:

$$PE \rightarrow \quad Volátiles$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = K \cdot (1 - X)^1 = K_0 \cdot e^{\frac{-E_a}{R \cdot T}} \cdot (1 - X)^1 \qquad (1)$$

Esta es una ecuación cinética simplificada del proceso de pérdida de masa del polímero, para un sistema a volumen constante en reacciones potenciales monomoleculares irreversibles de primer orden, donde:

X: conversión del polietileno.
K: constante de velocidad de la reacción (min^{-1}).
K_0: factor de frecuencia (min^{-1}).
E_a: energía de activación (kJ/mol).
R: constante de los gases (8,314 J/(mol·K)).
T: temperatura de reacción.

Según Heensink et al. (1994) comenta “aunque la mayoría de reacciones gas-sólido pueden describirse muy bien con el modelo de núcleo decreciente, a veces se observa una conversión de orden “n” en algunas partículas. Algunas reacciones de disociación, por ejemplo la pirólisis de madera, la *degradación térmica de polímeros sintéticos* y la descomposición térmica de oxalatos de zinc y magnesio parecen ser de primer orden en el sólido que se disocia.”

Beyler et al. (2001) indica “la suposición más común en la cinética global de la descomposición del polietileno es que la reacción puede describirse por una expresión de Arrhenius de primer orden en la masa del polímero”.

Kayacan et al. (2008) explica “un ajuste razonable a los datos en las gráficas indica que la suposición de una cinética de primer orden para la descomposición térmica de residuos de PEAD y PEBD en los rangos indicados es aceptable”.

Ceamanos et al. (2001) resolvió que “la ecuación cinética para la descomposición térmica de PEAD fue determinada previamente asumiendo una degradación simple de primer orden […] La predicción de conversión sólida usando una velocidad de reacción más baja obtenida por termogravimetría isotérmica muestra un ajuste mucho mejor.”

Costa et al. (2007) explica “un modelo cinético que involucra nueve reacciones elementales de primer orden ha sido propuesto. Los datos experimentales fueron ajustados a los valores calculados por el modelo. El modelo encaja razonablemente bien con los resultados.”

Cozzani et al. (1997) enuncia “la buena ejecución de este modelo sencillo es posible gracias al importante papel de las reacciones de primer orden en el craqueo de los productos gaseosos de elevado peso molecular…”

En la siguiente tabla, Westerhout et al. (1997), muestra datos cinéticos de diferentes autores para la pirólisis del polietileno para órdenes de 1 o similares, hasta 600º C:

authors	T (°C)	ξ (wt %)	order	k_0	E_{act} (kJ/mol)
Anderson and Freeman (1961)	246−480	<3	0		201[a,b]
		3−15	0		255[a,b]
		15−35	0 → 1		
		35−95	1		280[a,b]
Bockhorn and Knümann (1993)	200−600	0−100	0.81	7.2×10^{13}	259[c]
Jellinek (1950)					
M_w = 11 000 g/mol	375−436	<40	0	$10^{13.6}$	192[c]
M_w = 16 000 g/mol	375−436	<40	0	$10^{15.8}$	220[c]
M_w = 23 000 g/mol	375−436	<40	0	$10^{19.8}$	276[c]
Klose (1972), TGA	385−520	10−70	1	1.1×10^{18}	275[d,b]
TGA (1−10 °C/min)	385−520	10−70	1	1.2×10^{9}	159[d,b]
Madorsky (1952)	385−405	<20	1	4×10^{13}	200[e]
	385−405	>20	1	8×10^{19}	284[e]
Mucha (1976)					
HDPE	387−467	10−70	0−1		330−247[e,d]
LDPE	387−467	10−70	0−1		163−230[e,d]
Rychly and Rychlà (1989)	397−496	0−30			281[b,d]
Sawaguchi *et al.* (1990)			1	9.9×10^{12}	225[d,b]
Urzendowski and Guenther (1971)					g
HDPE	400−485	15−95	1	1.3×10^{21}	304[a]
	410−485	15−95	1	7.1×10^{21}	320[d]
LDPE	375−480	5−95	1	3.1×10^{20}	290[a]
	380−485	5−95	1	5.8×10^{21}	303[d]
Wu *et al.* (1993)					
HDPE	327−487		0.74	9.3×10^{13}	234[d]
LDPE	327−487		0.63	1.2×10^{12}	206[d]
this study					
HDPE	400−450	70−90	1	1.9×10^{13}	220
LPDE1	400−450	70−90	1	1.0×10^{15}	241
LDPE2	400−450	70−90	1	9.8×10^{11}	201

[a] Measurements performed in a vacuum environment. [b] Possible mass and heat transfer limitations during experiment. [c] Equation 2 used. [d] Measurements performed in a nitrogen environment. [e] Activation energy decreases with increasing molecular weight of sample from 7×10^3 g/mol to 707×10^3 g/mol. [f] Activation energy decreases with increasing number of side chains. [g] Measurements performed in a steam environment.

Tabla 34 – Parámetros cinéticos para la pirólisis del PE recogidos en la literatura.

No se han encontrado datos específicos para el valor de temperatura de operación del reactor (740º C), así que se ha elegido una estimación del rango más cercano encontrado en la tabla y en otros datos de la literatura (600º C):

$$\left.\begin{array}{l} K_0 = 3{,}9 \cdot 10^{15}\ \min^{-1} \\ E_a = 259\ kJ/mol \end{array}\right\} \quad K = K_0 \cdot e^{\frac{-E_a}{R \cdot T}} = 3{,}9 \cdot 10^{15}\ \min^{-1} \cdot \frac{1\min}{60 seg} \cdot e^{\frac{-259 \cdot 10^3\ J/mol}{8{,}314 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot (273+740) K}} = 2{,}866\ s^{-1}$$

La ecuación cinética (1) empleada por los diversos autores de la literatura para la pérdida de masa del polímero también se puede expresar de las siguientes formas:

$$Ln\left(\frac{1}{1-X_A}\right) = K \cdot t_R \qquad (2)$$

$$X_A = 1 - e^{-K \cdot t_R} \qquad (3)$$

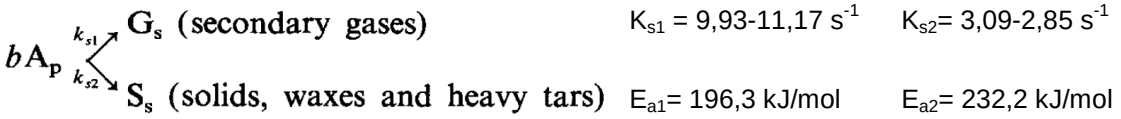
La conversión en el reactor obtenida para el PEAD es de un 15,25% (ver apartado A.2.5.), lo cual sustituido en la ecuación (2) empleando los datos de factor de frecuencia y energía de activación estimados y a la temperatura de reacción de 740º C, generaría un tiempo de degradación total del PEAD de 0,06 segundos. Para una conversión total del PEAD (99%), se obtendría un tiempo de unos 1,6 segundos. Con este dato ya se puede hallar la relación másica de la arena en el lecho respecto al PEAD:

$$\frac{M_{arena}}{M_{total\ lecho}} \cdot 100 = \frac{M_{arena}}{M_{arena} + M_{PEAD}} \cdot 100 = \frac{M_{arena}}{M_{arena} + Wm)_{PEAD} \cdot t_R} \cdot 100 =$$

$$= \frac{540{,}48\ kg}{540{,}48\ kg + 1.822{,}15 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1\ h}{3.600\ s} \cdot 1{,}6\ s} \cdot 100 = 99{,}8\%$$

Es decir, incluso considerando el tiempo del PEAD en el reactor para la conversión total de éste, la arena es la que forma prácticamente el lecho.

Respecto a las reacciones secundarias de descomposición de los gases condensables formados, Conesa et al. (1994) estimó las constantes cinéticas y las energías de activación en un reactor de lecho fluidizado en intervalos de temperatura entre 500 y 900º C. A 727º C los valores son:



A.2.5. Modelo de fluidización en el reactor:

A.2.5.1. Desarrollo del modelo:

Se va a emplear el modelo de fluidización en burbujeo de Kunii-Levenspiel. Este modelo puede utilizarse tanto para reacciones de fluidización catalíticas como para no catalíticas (Martínez et al. 2009). Con las hipótesis de dicho modelo enunciadas previamente, se hace el balance de materia a los sólidos y al gas:

$$\begin{pmatrix} Flujo\ \ ascendente\ \ de \\ sólidos\ \ con\ \ la\ \ burbuja \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Flujo\ \ descendente\ \ de \\ sólidos\ \ en\ \ la\ \ emulsión \end{pmatrix}$$

$$\left(Flujo\ \ total\ \ de\ \ gas\right) = \begin{pmatrix} Flujo\ \ ascendente \\ de\ \ la\ \ burbuja \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Flujo\ \ ascendente \\ en\ \ la\ \ emulsión \end{pmatrix}$$

Se obtiene entonces la velocidad de ascensión del conjunto burbujas-nubes-estelas en un lecho fluidizado (u_b):

$$u_b = u_o - u_{mf} + u_{br}$$

Donde:

u_0 = velocidad de fluidización del gas (3 m/s)

u_{mf} = velocidad mínima de fluidización del lecho (0,085 m/s).

u_{br} = velocidad de ascensión de una burbuja individual en lecho fluidizado.

Se calcula con la siguiente ecuación: $u_{br} = 0{,}711 \cdot \left(g \cdot d_b\right)^{1/2}$

Donde, a su vez, d_b es el diámetro de burbuja. Este parámetro es fundamental para el modelo, pues con él se calculan prácticamente el resto de magnitudes del modelo. Fogler et al. (1981) crearon en base al modelo de Kunii-Levenspiel un algoritmo de cálculo, que aunque fue diseñado para una fluidización

catalítica, representa un procedimiento similar al empleado en el presente proyecto:

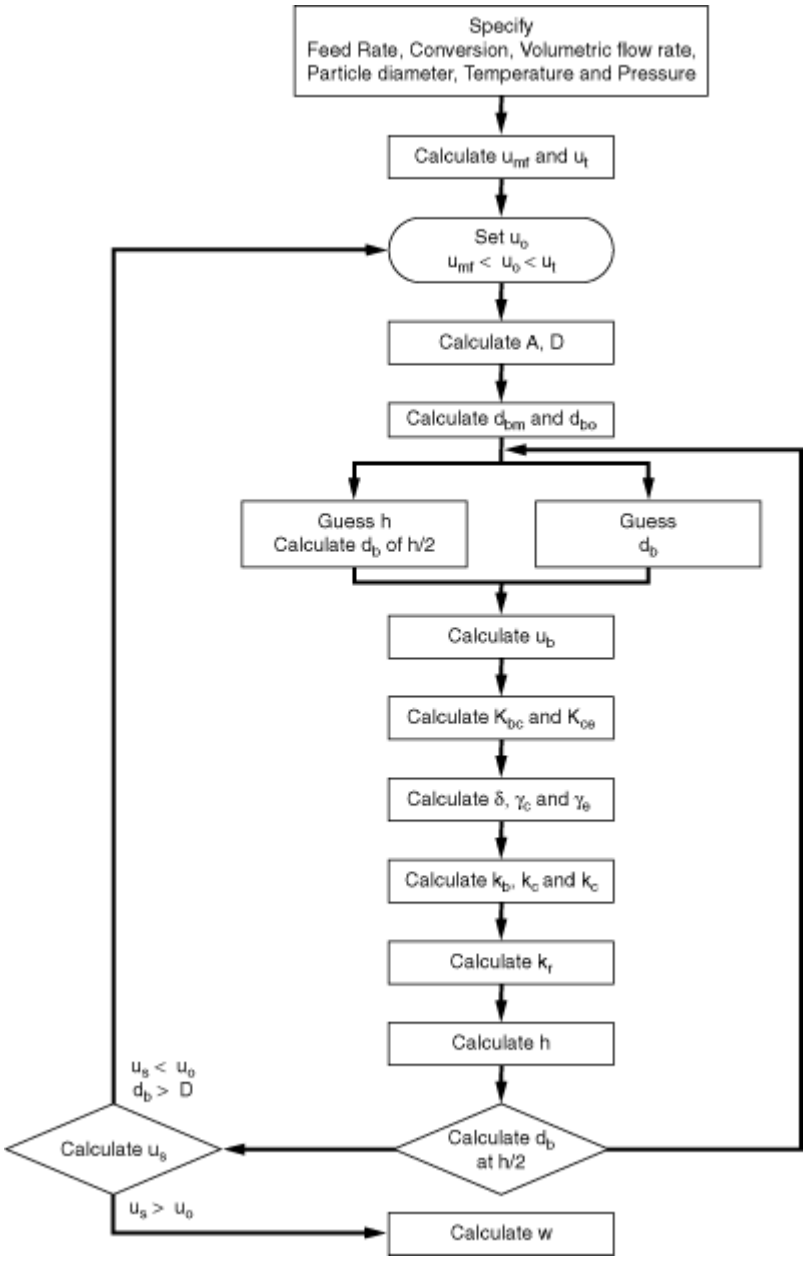


Figura 58 – Algoritmo de cálculo para el diseño de un reactor de lecho fluidizado. Fogler et al. (1981).

Para obtener el diámetro de burbuja, Farshi et al. (2007) presentaban en su estudio sobre el efecto del diámetro de burbuja una serie de ecuaciones posibles:

Equations of bubble diameter.

Proponent	Bubble Diameter Equation
Yasui *et al.* (1958)	$D_b = 0.16\rho_P d_p \left(\frac{U}{U_{mf}} - 1\right)^{0.63} h$
Whitehead *et al.* (1967)	$D_b = 9.76\left(\frac{U}{U_{mf}}\right)^{0.33} (0.32h)^{0.54}$
Park *et al.* (1969)	$D_b = 33.3 \cdot 10^3 d_p^{1.5} \left(\frac{U}{U_{mf}} - 1\right)^{0.77} h$
Kato and Wen (1969)	$D_b = 0.14\rho_p d_p \left(\frac{U}{U_{mf}}\right) h + D_{b0}$
Rowe *et al.* (1972)	$D_b = -A_1 + B_1 h + C_1\left(\frac{U}{U_{mf}}\right) + D_1 h\left(\frac{U}{U_{mf}}\right) + E_1\left(\frac{U}{U_{mf}}\right)^2$
Rowe (1976)	$D_b = \frac{\left(U - U_{mf}\right)^{0.5}\left(h + h_0\right)^{0.75}}{g^{0.25}}$ where $h_0 = 0$ for porous plate and $h_0 = 0.772 + 0.006h$ for perforated plate
Geldart (1972)	$D_b = 2.05\left(U - U_{mf}\right)^{0.94} h + D_{b0}$ where $D_{b0} = 0.376\left(U - U_{mf}\right)^2$ for porous plate and $D_{b0} = 0.8716\left(\frac{A\left(U - U_{mf}\right)}{ND}\right)^{0.4}$ for perforated plate. This is valid for group B and D particles.
Mori and Wen (1975)	$D_b = D_{bm} - \left(D_{bm} - D_{b0}\right)\exp\left(\frac{-0.3h}{D_r}\right)$
Werther (1976)	$D_b = 0.00853\left[1 + 27.2\left(U - U_{mf}\right)\right]^{0.333}\left[1 + 6.84h^{1.21}\right]$ for porous plate, where $D_r > 0.2\,\text{m}$, $0.01 \le U_{mf} < 0.08\,\text{m/s}$, $100 \le d_p < 350\,\mu\text{m}$, $0.05 \le U - U_{mf} \le 0.3\,\text{m/s}$
Darton *et al.* (1977)	$D_b = \frac{0.54\left(U - U_{mf}\right)^{0.4}\left(h + 4\sqrt{A}\right)^{0.8}}{g^{0.2}}$

Tabla 35 – Ecuaciones para calcular el diámetro de burbuja. Farshi et al. 2007.

En su estudio llegan a la conclusión de que la ecuación de Mori y Wen (1975) es la que mejor se ajusta:

$$\frac{d_{bm} - d_b}{d_{bm} - d_{bo}} = e^{\frac{-0,3 \cdot h}{D_{lecho}}}$$

Donde:

d_{bm} = diámetro máximo de burbuja (en la parte superior del lecho).

d_{bo} = diámetro mínimo de burbuja (al salir del orificio del distribuidor).

d_b = diámetro de burbuja a la altura de lecho "h".

h = altura del lecho considerado.

D_{lecho} = diámetro del lecho.

Como se puede ver, es una ecuación que supone que la burbuja en su ascenso va creciendo de tamaño, con lo cual el diámetro calculado debe referirse a la altura a la que se encuentre la burbuja. Para los cálculos con el modelo de Kunii-Levenspiel lo que se hace con esta ecuación es suponer un diámetro de burbuja "medio", situado a la mitad de la altura del lecho. Las condiciones de aplicación de la ecuación son adecuados a las características del proyecto:

- Diámetro del lecho: de 7 a 130 cm (D_{lecho} = 116,2 cm).
- Velocidad mínima de fluidización: de 0,5 a 20 cm/s (V_{mf} = 8,5 cm/s).
- Diámetro de partícula: de 0,006 a 0,045 cm (D_p = 0,02 cm).

Para realizar el cálculo del diámetro medio de burbuja se va a aplicar un proceso de iteración utilizando una ecuación de diseño del modelo de Kunii-Levenspiel a una cinética de reacción de primer orden, y considerando que el lecho "fijo" es similar en porosidad y longitud al lecho en su estado de mínima fluidización:

$$\frac{L_{fluidized}}{u_b} = \frac{1-\varepsilon_{packed}}{1-\varepsilon_{mf}} \cdot \frac{L_{packed}}{u_{br}} \approx \frac{L_{mf}}{u_{br}}$$

El proceso es el siguiente:

- Se utiliza un valor de partida de altura media de lecho (la mitad del L_{mf} por ejemplo) y se sustituye en la ecuación de Mori y Wen, para generar un valor de d_b medio.
- Con el valor de d_b se puede calcular u_{br}.
- Con u_{br} se puede calcular u_b.

- Con u_b se utiliza la ecuación del modelo de Kunii-Levenspiel y se obtiene un valor de altura del lecho fluidizado, $L_{fluidized.}$
- Si coincide el valor de $L_{fluidized}$ con el de "h" de la ecuación de Mori y Wen, termina la iteración (es el mismo valor). Si no, se vuelve a repetir desde el principio utilizando el nuevo valor de $L_{fluidized}$ en la ecuación de Mori y Wen.

Para comenzar la iteración, hay que hallar los valores de d_{bm} y d_o de la ecuación de Mori y Wen, que son constantes (A_{lecho} es el área del lecho y n_d el número de perforaciones del distribuidor del gas de fluidización):

$$d_{bm} = 0{,}652 \cdot \left[A_{lecho} \cdot \left(V - V_{mf}\right)\right]^{0,4}$$ (unidades en cm^2 y cm/s);

$$d_{bm} = 0{,}652 \cdot \left[10.600\,cm^2 \cdot \left(300 - 8{,}5\right) cm/s\right]^{0,4} = 257{,}17\ cm$$

$$d_{bo} = 0{,}347 \cdot \left[A_{lecho} \cdot \frac{\left(V - V_{mf}\right)}{n_d}\right]^{0,4}$$ (unidades en cm^2 y cm/s);

$$d_{bo} = 0{,}347 \cdot \left[10.600\,cm^2 \cdot \frac{\left(300 - 8{,}5\right) cm/s}{21}\right]^{0,4} = 40{,}496\ cm$$

Se observa que el diámetro estimado de burbuja al salir de los orificios del distribuidor (d_{bo}) es mayor que la distancia entre los centros de los orificios como se ha calculado en el diseño del distribuidor (Anexo A.2.6.). El lecho fluidizado opera en régimen de transición entre burbujeo y turbulento, haciendo que el gas salga a mayor velocidad del distribuidor. Este fenómeno puede provocar que las burbujas se superpongan unas con otras en la zona baja del lecho, llegando a formar una especie de capa gaseosa más o menos uniforme antes de ascender y evitando así que los residuos plásticos fundidos se adhieran a los orificios de entrada del gas, taponándolo. Sustituyendo en la ecuación de Mori y Wen:

$$\frac{d_{bm}-\overline{d_b}}{d_{bm}-d_{bo}}=e^{\frac{-0,3\cdot h}{D_{lecho}}};\ \frac{257,17-\overline{d_b}}{257,17-40,496}=e^{\frac{-0,3\cdot\left(\frac{41,5cm}{2}\right)}{116,2cm}};\ \overline{d_b}=51,798\,cm$$

Luego:

$$\frac{L_{fluidized}}{u_b}\approx\frac{L_{mf}}{u_{br}};\qquad\frac{L_{fluidized}}{u_o-u_{mf}+0,711\cdot(g\cdot d_b)^{1/2}}\approx\frac{L_{mf}}{0,711\cdot(g\cdot d_b)^{1/2}};$$

$$\frac{L_{fluidized}}{3-0,085+0,711\cdot(9,8\cdot 0,51798)^{1/2}\ m/s}\approx\frac{0,415\ m}{0,711\cdot(9,8\cdot 0,51798)^{1/2}\ m/s};$$

$$L_{fluidized}\approx 1,17\ m$$

Al ser el primer cálculo, no coincide con el valor de h empleado en la ecuación de Mori y Wen, que era el L_{mf}. Se repite el proceso empleando este nuevo valor:

Valor supuesto h	Valor calculado d_b	Valor hallado $L_{fluidized}$	$L_{fluidized}$ - h
41,5 cm	51,798 cm	117 cm	75,5 cm
117 cm	70,87 cm	106,06 cm	-10,93 cm
106,06 cm	68,22 cm	107,3 cm	1,24 cm
107,3 cm	68,52 cm	107,16 cm	-0,14 cm
107,16 cm	**68,48 cm**	**107,17 cm**	**0,014 cm ≈ 0**

Por tanto, la altura del lecho fluidizado dentro del reactor será:

Altura reactor:	5,809 m.
Altura lecho mínima fluidización:	0,415 m.
Altura lecho fluidizado:	1,07 m.

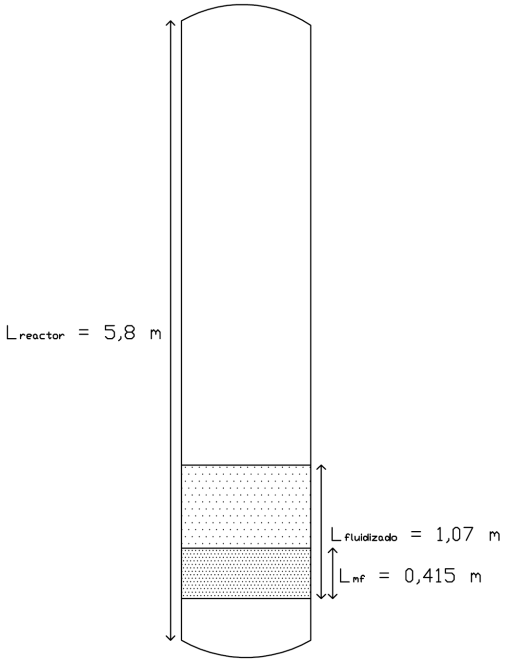


Figura 59 – Alturas del lecho fluidizado y en mínima fluidización dentro del reactor.

La diferencia entre la superficie del lecho fluidizado y la parte más alta del reactor es de 4,73 metros. Esa altura intermedia entre el lecho y la salida del reactor proporciona una zona que se llama TDH o altura de desactivación del lecho, y cuyo objetivo es evitar que el lecho se quede sin arena al ser esta arrastrada por el flujo en régimen de transición y perder parte de la energía que porta del lecho en forma de energía potencial. Otro objetivo de dicha altura es provocar que los gases de pirólisis formados permanezcan en el reactor los aproximadamente 2 segundos necesarios para que los rendimentos sean los estimados.

$$Expansión\ del\ lecho = \frac{L_{fluidizado} - L_{mf}}{L_{mf}} \cdot 100 = \frac{107{,}17 - 41{,}5}{41{,}5} \cdot 100 = 158{,}24\%$$

$$Porosidad\ del\ lecho\ \ fluidizado \rightarrow \varepsilon_f = 1 - \frac{L_{mf}}{L_f} \cdot \left(1 - \varepsilon_{mf}\right) = 1 - \frac{0{,}415}{1{,}07} \cdot \left(1 - 0{,}5368\right) = 0{,}82$$

Ya con el diámetro medio de burbuja calculado (d_b= 68,48 cm.), se pueden obtener todos los demás parámetros del modelo de lecho fluidizado:

- Velocidad de ascenso de una burbuja individual (u_{br}):

$$u_{br} = 0{,}711 \cdot (g \cdot d_b)^{1/2} = 0{,}711 \cdot \left(9{,}8 \frac{m}{s^2} \cdot 0{,}6848 m\right)^{1/2} = 1{,}84 \, m/s$$

- Velocidad de ascensión del conjunto burbujas-nubes-estelas en un lecho fluidizado (u_b):

$$u_b = u_o - u_{mf} + u_{br} = 3 m/s - 0{,}085 m/s + 1{,}84 m/s = 4{,}75 m/s$$

- El tiempo que tarda una burbuja en cruzar todo el lecho fluidizado desde que surge por el orificio del distribuidor hasta que llega a la superficie es:

$$Tiempo\ de\ burbuja = \frac{L_{fluidizado}}{u_{br}} = \frac{1{,}07\ m}{1{,}84 \, m/s} = 0{,}581\ seg$$

- Fracción de burbujas (en volumen) en un lecho (δ): antes hay que ver si se tratan de burbujas lentas, intermedias o rápidas:

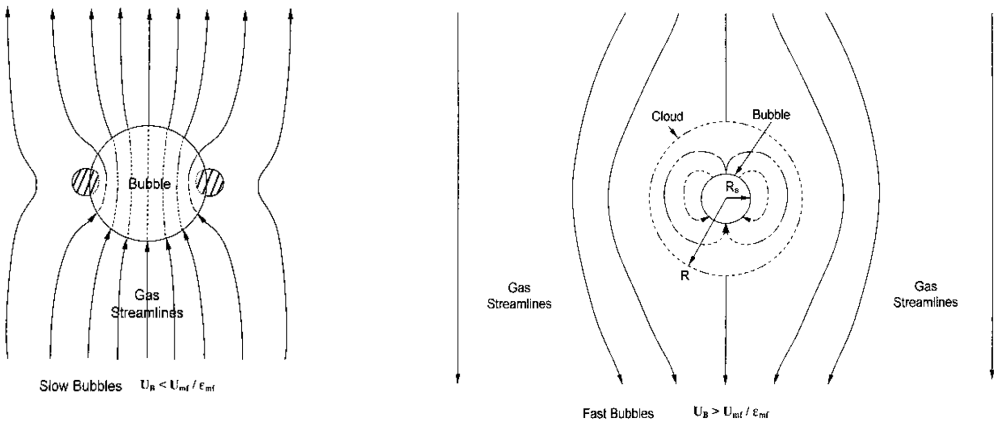


Figura 60 – Modelo de burbujas lentas y rápidas de Davidson.

a) Burbujas lentas:

$$u_b < \frac{u_{mf}}{\varepsilon_{mf}} \left\{ \begin{array}{l} u_b = 4{,}75\, m/s \\ \dfrac{u_{mf}}{\varepsilon_{mf}} = \dfrac{0{,}085\, m/s}{0{,}5368} = 0{,}158\, m/s \end{array} \right\} 4{,}75\frac{m}{s} > 0{,}158\frac{m}{s} \rightarrow no$$

b) Burbujas intermedias:

$$\frac{u_{mf}}{\varepsilon_{mf}} < u_b < \frac{5 \cdot u_{mf}}{\varepsilon_{mf}} \rightarrow 0{,}158\frac{m}{s} < 4{,}75\frac{m}{s} > 0{,}79\frac{m}{s} \rightarrow no$$

c) Burbujas rápidas:

$$u_b > \frac{5 \cdot u_{mf}}{\varepsilon_{mf}} \rightarrow 4{,}75\frac{m}{s} > 0{,}79\frac{m}{s} \rightarrow sí$$

Luego se utiliza la expresión de δ para burbujas rápidas:

$$\delta \approx \frac{u_0 - u_{mf}}{u_b - u_{mf}} = \frac{3 - 0{,}085}{4{,}75 - 0{,}085} = 0{,}625 \rightarrow 62{,}5\%$$

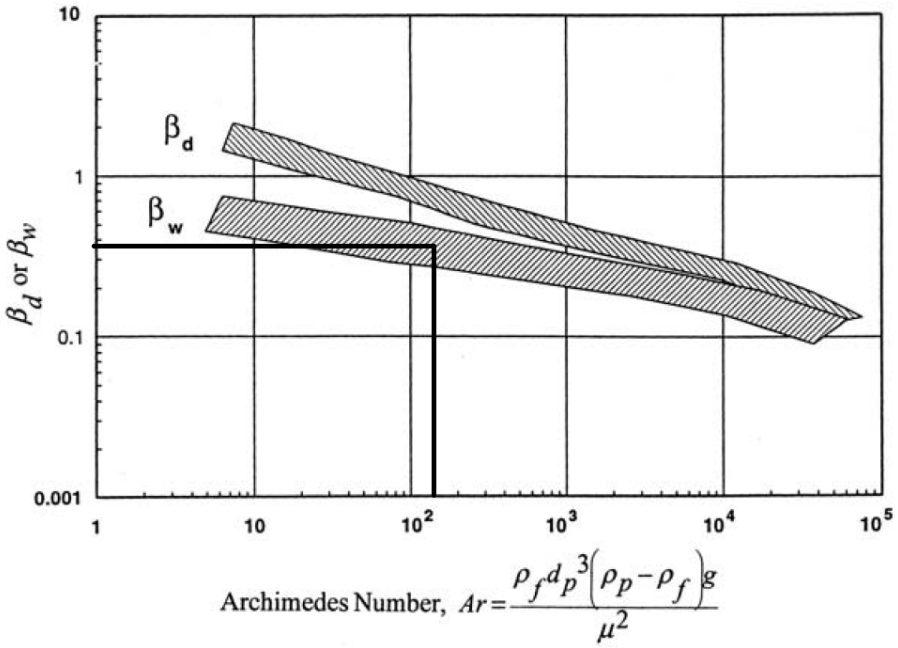
- Fracción total de nubes en el lecho (β):

$$\beta = \frac{3 \cdot \delta \cdot \left(u_{mf} / \varepsilon_{mf} \right)}{u_{br} - u_{mf} / \varepsilon_{mf}} = \frac{3 \cdot 0{,}625 \cdot \left(\dfrac{0{,}085\, m/s}{0{,}5368} \right)}{1{,}84\, m/s - \dfrac{0{,}085\, m/s}{0{,}5368}} = 0{,}1765 \rightarrow 17{,}65\%$$

- Fracción total de estelas en el lecho (w):

$$w = \alpha \cdot \delta = \frac{volumen\ \ de\ \ las\ \ estelas}{volumen\ \ de\ \ las\ \ burbujas} \cdot \delta$$

No se conocen los volúmenes de las estelas y las burbujas, aunque el valor de α está en el rango de 0,25 a 1. Baeyens y Geldart (1973) estudiaron la circulación de sólidos y encontraron en la mayoría de partículas del Grupo B una fracción de estelas de 0,35. Además, Geldart (1986) correlacionó en una gráfica la fracción de estela con el número de Galileo:



Gráfica 13 – Dependencia de la fracción de estela en las características de las partículas (Geldart, 1986).

Para el número de Galileo del lecho (143,7) se obtiene una fracción media de estela de 0,37; lo cual se aproxima mucho a los estudios de Geldart con Baeyens. Como dato intermedio se utilizará una fracción de estela de 0,36 (un 36%).

$$w = \alpha \cdot \delta \rightarrow \alpha = \frac{w}{\delta} = \frac{0{,}36}{0{,}625} = 0{,}576 \in [0{,}25 - 1]$$

- Fracción de emulsión en reflujo (es decir en flujo descendente por empuje de burbujas), incluyendo nubes $(\overline{w})$:

$$\overline{w} = 1 - \delta - w = 1 - \delta - \alpha \cdot \delta = 1 - 0{,}625 - 0{,}36 = 0{,}015 \rightarrow 1{,}5\%$$

- Velocidad de reflujo de sólidos en la emulsión (u_s):

$$u_s = \frac{w \cdot u_b}{\overline{w}} = \frac{\alpha \cdot \delta \cdot u_b}{1 - \delta - \alpha \cdot \delta} = \frac{0{,}36 \cdot 4{,}75\, m/s}{0{,}015} = 114\, m/s$$

- Velocidad de ascenso del gas en la emulsión (u_e):

$$u_e = \frac{u_{mf}}{\varepsilon_{mf}} - u_s = \frac{0{,}085\, m/s}{0{,}5368} - 114\, m/s = -113{,}84\, m/s < 0$$

Como puede verse, el modelo predice que el flujo de gas en la emulsión se invierte y se hace descendente a partir de valores de $u_o > 3 \cdot u_{mf}$. El valor es negativo ya que comparando el gas en la emulsión respecto al gas en la burbuja, que circula a mayor velocidad, se considera que apenas avanza.

- Coeficientes de intercambio de gas: hay dos tipos.

  - Entre la burbuja y la nube: se obtiene de la expresión teórica de Davidson.

$$K_{bc} = 4{,}5 \cdot \left(\frac{u_{mf}}{d_b} \right) + 5{,}85 \cdot \left(\frac{D^{1/2} \cdot g^{1/4}}{d_b^{5/4}} \right)$$

  - Entre la nube y la emulsión: obtenido de la teoría de Higbie.

$$K_{ce} = 6{,}78 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{mf} \cdot D \cdot u_b}{d_b^{\,3}} \right)^{1/2}$$

Donde D es el coeficiente de difusión molecular del gas (cm^2/seg). Dado que no se han encontrado valores de este valor en experimentos realizados para gases de pirólisis de composición similar usando arena como lecho, se utilizarán las referencias de Fogler et al. (1981), los cuales, basándose mayormente en los trabajos de Levenspiel, llegaron a la conclusión de que los valores típicos de K_{bc} son de 2 s^{-1} y que los valores típicos de K_{ce} son del orden de 1 s^{-1}. Por tanto:

$$2\ s^{-1} = 4{,}5 \cdot \left(\frac{0{,}085\ m/s}{0{,}6848\ m} \right) + 5{,}85 \cdot \left(\frac{D^{1/2} \cdot \left(9{,}81\ m/s^2\right)^{1/4}}{\left(0{,}6848\ m\right)^{5/4}} \right); \quad D = 7{,}52 \cdot 10^{-3}\ m^2/s$$

Se utiliza el valor de coeficiente de difusión obtenido en la ecuación de K_{ce} para verificar la estimación de Fogler:

$$K_{ce} = 6{,}78 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{mf} \cdot D \cdot u_b}{{d_b}^3} \right)^{1/2} = 6{,}78 \cdot \left(\frac{0{,}5368 \cdot 7{,}52 \cdot 10^{-3}\ m^2/s \cdot 4{,}75\ m/s}{\left(0{,}6848 m\right)^3} \right)^{1/2} =$$

$$= 1{,}65\ s^{-1} \approx 1\ s^{-1}$$

El valor de K_{ce} es similar al estimado por Fogler, por tanto las estimaciones son cercanas a los valores reales.

A.2.5.2. Modelo de Kunii-Levenspiel para una cinética de primer orden:

Se va a deducir la ecuación de diseño para el modelo de flujo de lecho de borboteo de Kunii-Levenspiel considerando una reacción química heterogénea no catalítica ni reversible dentro del reactor, y que sigue una cinética de primer orden. Se van a realizar dos suposiciones:

1. El lecho posee un borboteo vigoroso, con grandes burbujas que ascienden a través del lecho. Por tanto, el caudal de gas es suficientemente elevado

para considerar despreciable el flujo de gas a través de la emulsión y la nube. En consecuencia, se puede aproximar que el flujo de gas a través del lecho se produce únicamente en la fase de burbuja:

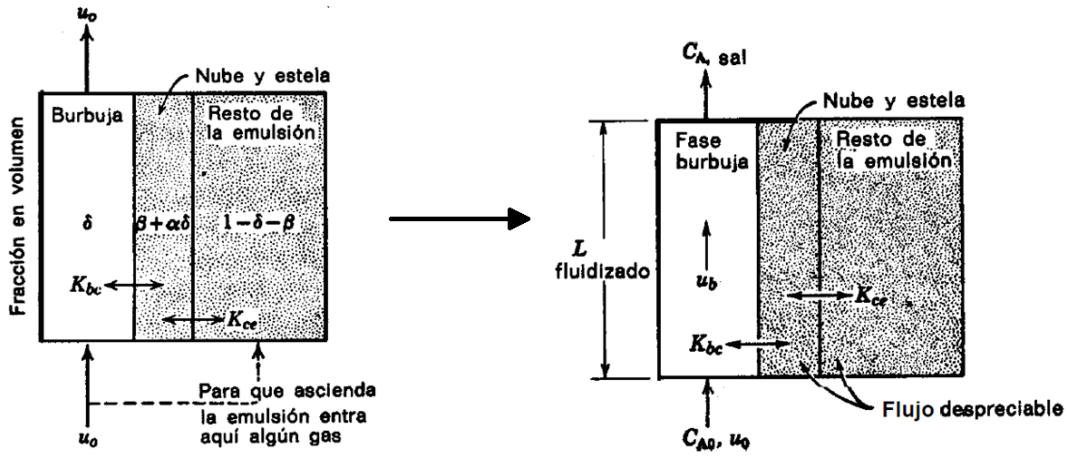


Figura 61 – Aproximación del modelo de Kunii-Levenspiel.

2. El modelo de Kunii-Levenspiel supone la desaparición de un reactivo gas que entra al lecho y en su ascenso en la burbuja reacciona o se transfiere por la nube y la estela. El sistema diseñado en el proyecto consta de una reacción previa de craqueo del polietileno en el lecho, el cual se degrada para emitir los gases que se incorporan entonces a las burbujas ascendentes y así proseguir su reacción de la misma forma que el reactivo gaseoso del modelo. Se va a suponer por tanto que la reacción de craqueo del polietileno es suficientemente rápida comparada con la reacción de los gases emitidos dentro de la burbuja como para considerar significativos únicamente los pasos de los gases emitidos. En la literatura existen otros procesos con reacciones no catalíticas de fluidización sólido-gas donde se hace uso del mismo modelo (Wen, C.Y., 1972).

Considerando una cinética de primer orden, para la reacción de desaparición de A en una burbuja ascendente el balance es:

$$\begin{pmatrix} Desaparición\ \ del\ \ componente\ \ A \\ de\ \ la\ \ burbuja\ \ de\ \ gas \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Re}acción\ \ en \\ la\ \ burbuja \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Transporte\ \ a\ \ la \\ nube\ \ y\ \ la\ \ estela \end{pmatrix}$$

$$-r_{A,b} = -\frac{1}{V_{burbuja}} \cdot \frac{\partial N_A}{\partial t} = \quad \gamma_b \cdot k \cdot C_{A,b} + \quad K_{bc} \cdot \left(C_{A,b} - C_{A,c}\right)$$

Despejando el segundo término de transporte a la nube y estela:

$$\begin{pmatrix} Transporte\ \ a\ \ la \\ nube\ \ y\ \ la\ \ estela \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Re}acción\ \ en\ \ la \\ nube\ \ y\ \ la\ \ estela \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Transporte\ \ a \\ la\ \ emulsión \end{pmatrix}$$

$$K_{bc} \cdot \left(C_{A,b} - C_{A,c}\right) = \quad \gamma_c \cdot k \cdot C_{A,c} + \quad K_{ce} \cdot \left(C_{A,c} - C_{A,e}\right)$$

Despejando el segundo término de transporte a la emulsión:

$$\begin{pmatrix} Transporte\ \ a \\ la\ \ emulsión \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Re}acción\ \ en \\ la\ \ emulsión \end{pmatrix}$$

$$K_{ce} \cdot \left(C_{A,c} - C_{A,e}\right) = \quad \gamma_e \cdot k \cdot C_{A,e}$$

Donde los parámetros γ_b, γ_c y γ_e son las fracciones volumétricas del sólido reaccionante (polietileno) en las diferentes zonas del lecho respecto al volumen ocupado por las burbujas:

$$\gamma_b = \frac{volumen\ de\ sólido\ \ polietileno\ disperso\ en\ \ las\ burbujas}{volumen\ de\ las\ burbujas}$$

$$\gamma_c = \frac{volumen\ de\ sólido\ \ polietileno\ dentro\ de\ las\ nubes\ y\ de\ las\ estelas}{volumen\ de\ las\ burbujas}$$

$$\gamma_e = \frac{volumen\ de\ sólido\ \ polietileno\ en\ la\ emulsión}{volumen\ de\ las\ burbujas}$$

Su significado físico va referido al hecho de que cuanto mayor sea la fracción de polietileno en cada fase, más significativa será la reacción de pirólisis en ella.

Eliminando todas las ecuaciones intermedias y agrupando los términos, la ecuación del balance para la reacción de desaparición de A en una burbuja queda:

$$-r_{A,b} = \left(\gamma_b \cdot k + \frac{1}{\chi_1}\right) \cdot C_A$$

Integrando para flujo en pistón del gas a través del lecho la ecuación se convierte en:

$$\ln\left(\frac{C_{A_0}}{C_A}\right) = \left(\gamma_b \cdot k + \frac{1}{\chi_1}\right) \cdot \frac{L_{fluidized}}{u_b}$$

Donde la constante cinética k es la obtenida en el anexo A.2.4. y los demás términos son:

$$\chi_1 = \frac{1}{K_{bc}} + \frac{1}{\chi_2}; \qquad \chi_2 = \gamma_c \cdot k + \frac{1}{\chi_3}; \qquad \chi_3 = \frac{1}{K_{ce}} + \frac{1}{(\gamma_e \cdot k)}$$

Y donde:

$$\gamma_e = \frac{(1-\varepsilon_{mf}) \cdot (1-\delta)}{\delta} - \gamma_b - \gamma_c \quad \begin{cases} \gamma_b \in [0{,}001 - 0{,}01] \rightarrow datos\,\text{exp}\,erimentales \\ \gamma_c = (1-\varepsilon_{mf}) \cdot \left[3 \cdot \dfrac{\left(\dfrac{u_{mf}}{\varepsilon_{mf}}\right)}{\left(u_{br} - \dfrac{u_{mf}}{\varepsilon_{mf}}\right)} + \alpha \right] \end{cases}$$

La ecuación de diseño con sus términos desplegados queda de la forma:

$$\ln\left(\frac{C_{A_0}}{C_A}\right)=\left(\gamma_b\cdot k+\frac{1}{\frac{1}{K_{bc}}+\frac{1}{\gamma_c\cdot k+\frac{1}{\frac{1}{K_{ce}}+\frac{1}{(\gamma_e\cdot k)}}}}\right)\cdot\frac{L_{fluidized}}{u_b}$$

Estableciendo cálculos:

$\gamma_b=\frac{(0{,}001+0{,}01)}{2}=0{,}0055\rightarrow$ se elige un valor intermedio dentro del intervalo de resultados experimentales obtenidos.

$$\gamma_c=(1-\varepsilon_{mf})\cdot\left[3\cdot\frac{\left(\frac{u_{mf}}{\varepsilon_{mf}}\right)}{\left(u_{br}-\frac{u_{mf}}{\varepsilon_{mf}}\right)}+\alpha\right]=(1-0{,}5368)\cdot\left[3\cdot\frac{\left(\frac{0{,}085\,m/s}{0{,}5368}\right)}{\left(1{,}84-\frac{0{,}085\,m/s}{0{,}5368}\right)}+0{,}576\right]=0{,}397$$

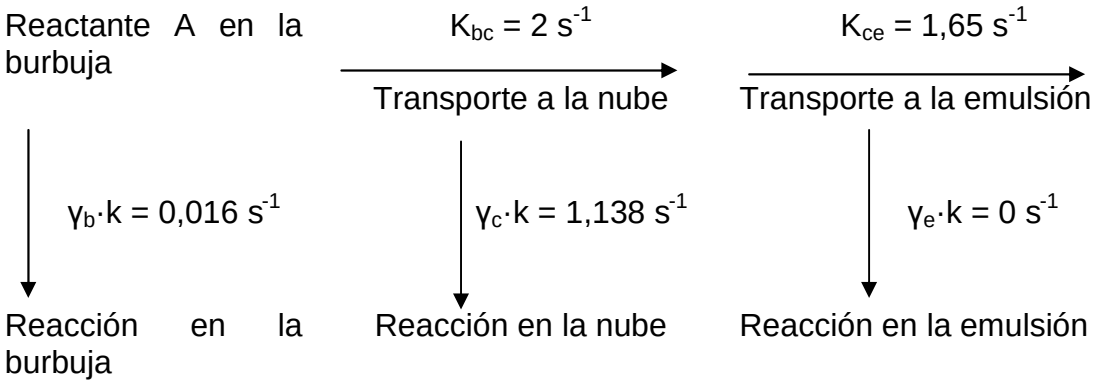
$$\gamma_e=\frac{(1-\varepsilon_{mf})\cdot(1-\delta)}{\delta}-\gamma_b-\gamma_c=\frac{(1-0{,}5368)\cdot(1-0{,}625)}{0{,}625}-0{,}0055-0{,}397=-0{,}124<0$$

$$\chi_3=\frac{1}{K_{ce}}+\frac{1}{(\gamma_e\cdot k)}=\frac{1}{1{,}65\ s^{-1}}+\frac{1}{(0\cdot 2{,}866\ s^{-1})}=\infty$$

$$\chi_2=\gamma_c\cdot k+\frac{1}{\chi_3}=0{,}397\cdot 2{,}866\ s^{-1}+\frac{1}{\infty}=1{,}138\ s^{-1}$$

$$\chi_1=\frac{1}{K_{bc}}+\frac{1}{\chi_2}=\frac{1}{2\ s^{-1}}+\frac{1}{1{,}138\ s^{-1}}=1{,}38\ s.$$

Los términos calculados representan las resistencias en serie-paralelo al transporte de materia y a la reacción:



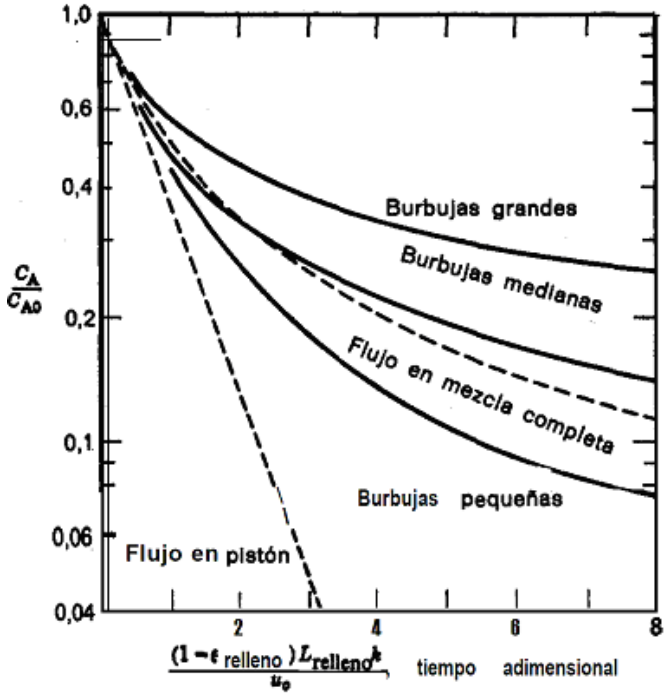
Como puede verse por los términos calculados, la reacción de pirólisis térmica del polietileno es más significativa en la nube; es decir la interfase de contacto lecho-burbuja, donde el polietileno emite los gases volátiles. La ecuación cinética queda por tanto:

$$\ln\left(\frac{C_{A_0}}{C_A}\right) = \left(\gamma_b \cdot k + \frac{1}{\chi_1}\right) \cdot \frac{L_{fluidized}}{u_b} = \left(0{,}0055 \cdot 2{,}866\ s^{-1} + \frac{1}{1{,}38\ s}\right) \cdot \frac{1{,}07\ m}{4{,}75\ m/s} = 0{,}1668\,;$$

$$\frac{C_{A_0}}{C_A} = 1{,}18 \ \rightarrow \ X_A = \frac{C_{A_0} - C_A}{C_{A_0}} = 1 - \frac{C_A}{C_{A_0}} = 1 - (1{,}18)^{-1} = 0{,}1525 \rightarrow 15{,}25\%$$

Como el tamaño de la burbuja es la única magnitud que rige todas las magnitudes cinéticas a excepción de la constante cinética k, se puede representar la ecuación de diseño de un lecho fluidizado en función de d_b:

$$\begin{cases} \dfrac{(1-\varepsilon_{mf}) \cdot L_{mf} \cdot k}{u_o} = \dfrac{(1-0{,}5368) \cdot 0{,}415\ m \cdot 2{,}866\ s^{-1}}{3\ m/s} = 0{,}184 \\ \dfrac{C_A}{C_{A_0}} = (1{,}18)^{-1} = 0{,}85 \end{cases}$$



Gráfica 14 – Lecho fluidizado en función del tamaño de la burbuja. Ingeniería de las reacciones químicas. Levenspiel.

Coincidiendo con los valores calculados de conversión, valores altos de diámetro de burbuja y borboteos vigorosos, como es el caso, proporcionan una eficacia pequeña debido a la elevada recirculación que producen las burbujas del gas, ya que la eficacia del lecho puede ser considerablemente menor al del flujo en mezcla completa. Para evitar este comportamiento Octave Levenspiel propone varias soluciones:

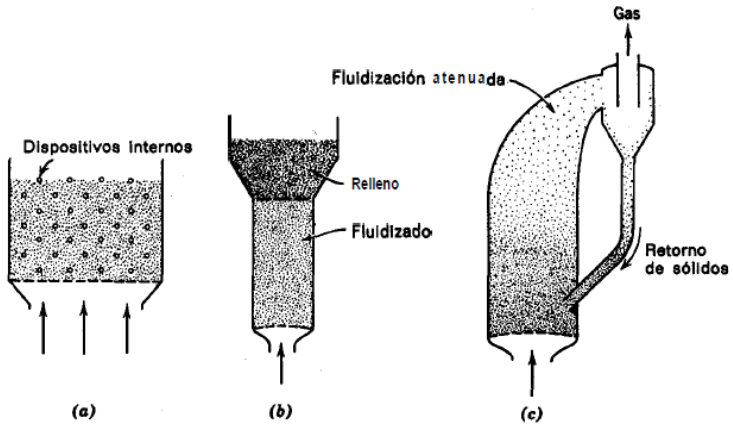


Figura 62 – Dispositivos para evitar desviaciones grandes en lechos con grandes burbujas. Octave Levenspiel.

a) Introducir dispositivos internos en el lecho para impedir el crecimiento de las burbujas y disminuir el tamaño de las mismas.
b) Utilizar lechos de relleno fluidizado en los que el gas pasa primero a través de la sección fluidizada y después por la sección de relleno.
c) Utilizar velocidades de gas que den lugar a un arrastre (y retorno) apreciable de sólidos. En este caso se pueden emplear velocidades de gas mucho mayores, y con un diseño adecuado de gas se aproxima al comportamiento de flujo en pistón.

La última opción ha sido elegida en el proyecto, mediante la instalación de un ciclón para recircular las partículas sólidas arrastradas (Anexo A.3.)

A.2.6. Cálculo de la placa distribuidora:

La placa distribuidora del gas de fluidización va a diseñarse considerando que va a estar formada por capuchas de burbujeo con la salida del gas orientada hacia abajo.

A.2.6.1. Caída de presión en el distribuidor de gas:

Debido a las fluctuaciones en la entrada del gas por el distribuidor con las capuchas orientadas hacia abajo, se ha determinado experimentalmente que la caída de presión en el lecho puede variar hasta un 10% (Karri, 1991). Como regla del pulgar, el criterio empleado para una buena distribución del gas es por tanto, para flujos inyectados hacia abajo:

$$\Delta P_{distrib} \geq 0{,}1 \cdot \Delta P_{lecho}$$

La caída de presión en el lecho estimada en los cálculos hidrodinámicos es de 5.000 Pa, luego:

$$\Delta P_{distrib} \geq 0{,}1 \cdot 5.000\ Pa = 500\ Pa$$

Otra forma de hallar la caída de presión en el distribuidor es mediante la fórmula:

$$\Delta P_{distrib} = K \cdot g \cdot \rho_{lecho} \cdot L_{lecho} = K \cdot g \cdot \left(\varepsilon_f \cdot \overline{\rho_{gas}} + (1 - \varepsilon_f) \cdot \rho_{arena} \right) \cdot L_{lecho} =$$

$$= 0{,}1 \cdot 9{,}8 \frac{m}{s^2} \cdot \left(0{,}82 \cdot 0{,}5038 \frac{kg}{m^3} + (1 - 0{,}82) \cdot 2.650 \frac{kg}{m^3} \right) \cdot 1{,}07 m = 500{,}6 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m^2}{s^2} = 500{,}6 \ Pa$$

Donde K es 0,1 para entrada hacia abajo del flujo del gas en el distribuidor. Para el cálculo de las propiedades del lecho se ha considerado que está formado exclusivamente de arena aunque también haya polietileno, que es el reactivo y se degrada rápidamente a gas.

Por otra parte, bajo ninguna circunstancia la caída de presión a través de una placa distribuidora de tipo industrial debe ser menor de 2.500 Pa. Por tanto, para realizar los cálculos se va a considerar que $\Delta P_{distrib} = 2.500 \ Pa$.

Varios investigadores (Hiby, 1964; Zuiderweg, 1967; Whitehead, 1971; Siegel, 1976; Mori and Moriyama, 1978) han encontrado que la relación entre la caída de presión en el distribuidor y la caída de presión del lecho suele estar entre 0,015 y 0,4:

$\frac{\Delta P_{distrib}}{\Delta P_{lecho}} = \frac{2.500}{5.000} = 0{,}5 \ \rightarrow$ con lo cual, se acerca bastante al rango experimental obtenido por los investigadores.

A.2.6.2. Diámetro de orificio de entrada del gas por la capucha:

El diámetro de orificio de entrada (d_h) se obtiene a partir de la ecuación del flujo volumétrico del gas:

$$Q_v = \frac{W_m}{\overline{\rho_{gas}}} = N \cdot \frac{\pi \cdot d_h^2}{4} \cdot u_h$$

Donde:

N = número de orificios en el distribuidor. En la práctica, para minimizar las zonas estancadas, el número de orificios por m^2 (N_d) debe ser mayor o igual a 20. Como el diámetro de burbuja calculado es grande, se elige un N_d de 20.

$$N = N_d \cdot A_{lecho} = 20\ m^{-2} \cdot 1{,}060\ \mathrm{m}^2 = 21{,}2$$

u_h = velocidad del gas a través del distribuidor, cuya ecuación es:

$$u_h = C_d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{distrib}}{\overline{\rho_{gas,h}}}}$$

Donde:

C_d = coeficiente de descarga del orificio, y está relacionado con el espesor de la placa distribuidora y la distancia entre los centros de los orificios. Un valor típico para C_d en orificios de distribuidores es de 0,8 (Karri, 1991).

$\rho_{gas,\,h}$ = densidad del gas en el orificio. Se calcula con la ecuación de los gases ideales:

$$\overline{\rho_{gas,h}} = \frac{\overline{P}_{distrib} \cdot \overline{M}}{R \cdot T_{lecho}} = \frac{\left(\frac{106.325 + (106.325 - 2500)}{2}\right)\frac{kg}{m \cdot s^2} \cdot 40{,}87 \cdot 10^{-3}\ \frac{kg}{mol}}{8{,}314\frac{J}{mol \cdot K} \cdot \frac{N \cdot m}{J} \cdot \frac{kg \cdot \frac{m}{s^2}}{N}(273 + 740)K} = 0{,}51\frac{kg}{m^3}$$

Por lo que u_h queda:

$$u_h = C_d \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta P_{distrib}}{\overline{\rho_{gas,h}}}\right)^{1/2} = 0{,}8 \cdot \left(\frac{2 \cdot 2.500\frac{kg}{m \cdot s^2}}{0{,}51\frac{kg}{m^3}}\right)^{1/2} = 79{,}21\frac{m}{s}$$

Reagrupando en la ecuación del caudal para obtener d_h:

$$d_h = \left(\frac{W_m \cdot 4}{\overline{\rho_{gas}} \cdot N \cdot \pi \cdot u_h} \right)^{1/2} = \left(\frac{5.769 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1\,h}{3.600\,s} \cdot 4}{0{,}5038 \frac{kg}{m^3} \cdot 21{,}2 \cdot \pi \cdot 79{,}21 \frac{m}{s}} \right)^{1/2} = 0{,}049\ m = 4{,}9\ cm$$

A.2.6.3. Disposición de los orificios:

Para incrementar la uniformidad de la fluidización, es común disponer los orificios en configuración triangular o cuadrada:

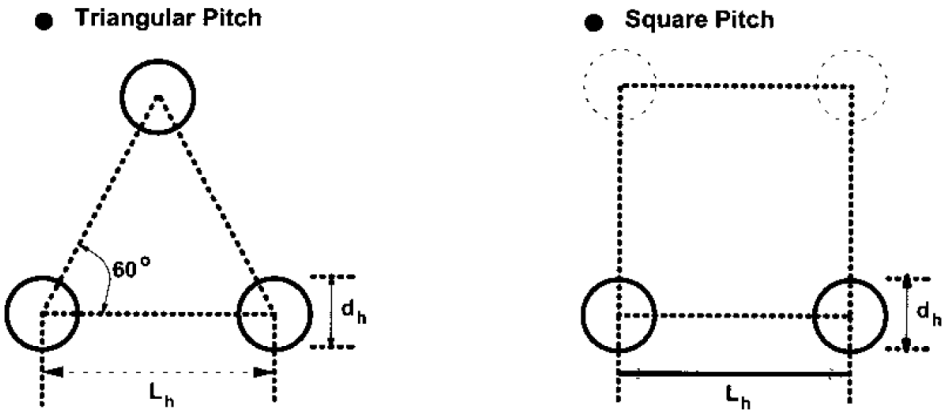


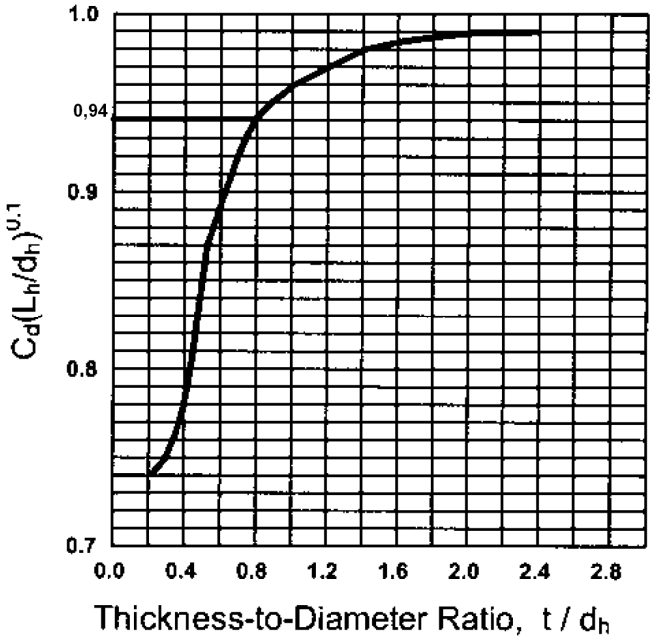
Figura 63 – Configuraciones de los orificios.

La configuración triangular resulta en más orificios por unidad de área, así que se utilizará esa. Para la configuración triangular la distancia entre orificios (L_h):

$$L_h = \frac{1}{\sqrt{N_d \cdot sen(60^o)}} = \frac{1}{\sqrt{20\ m^{-2} \cdot sen(60^o)}} = 0{,}24\ m = 24\ cm$$

A.2.6.4. Espesor de la placa distribuidora:

Con el cálculo realizado del diámetro del orificio y la distancia entre ellos, y el coeficiente de descarga estimado por Karri, se puede puede conocer el espesor de la placa distribuidora del gas a través de la siguiente gráfica:

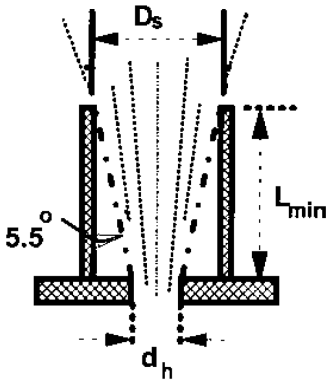


Gráfica 15 - Representación espesor respecto al coeficiente de descarga.

$$C_d \cdot \left(\frac{L_h}{d_h}\right)^{0,1} = 0,8 \cdot \left(\frac{24}{4,9}\right)^{0,1} = 0,94 \xrightarrow{GRÁFICA} \frac{t}{d_h} = 0,8 \rightarrow t = 0,8 \cdot 4,9\ cm = 3,92\ cm$$

A.2.6.5. Diseño de las boquillas:

Las boquillas se colocan alrededor de los orificios para reducir la velocidad del gas en la interfase sólido-líquido y para reducir la atrición de las partículas que son ingeridas y propulsadas por el gas entrante para colisionar con las del lecho (de Vries, 1972). Consisten en pequeños tubos centrados sobre los orificios del distribuidor. Para ser efectivas, las boquillas deben ser lo suficientemente largas como para contener la expansión del flujo de gas que sale por el orificio (Karri, 1991). De esta forma:



$$L_{\min} = \frac{D_s - d_h}{2 \cdot \tan(5{,}5^{o})}$$

Figura 64 – Diseño boquilla placa distribuidora.

Donde D_s es el diámetro de la boquilla, y se va a considerar que es un centrímetro mayor al diámetro del orificio (D_s = 5,9 cm). Sustituyendo:

$$L_{\min} = \frac{D_s - d_h}{2 \cdot \tan(5{,}5^{o})} = \frac{5{,}9 \cdot 10^{-2}\, m - 4{,}9 \cdot 10^{-2}\, m}{2 \cdot \tan(5{,}5^{o})} = 0{,}052\ m = 5{,}2\ cm$$

En la práctica, es prudente incrementar el valor de L_{min} en un factor del 50 al 100%, ya que una boquilla con una longitud menor de L_{min} causa mayor erosión y atrición que no colocar ninguna. También ocurre cuando la boquilla no está centrada sobre el orificio del distribuidor. Por tanto:

$$(L_{\min})_{incrementado} = 1{,}5 \cdot L_{\min} = 1{,}5 \cdot 0{,}052\ m = 0{,}078\ m = 7{,}8\ cm$$

La reducción de atrición gracias a la colocación de boquillas se puede estimar con la expresión:

$$\frac{atrición\ \ por\ \ partículas\ \text{sin}\ boquillas}{atrición\ \ por\ \ partículas\ con\ boquillas} = \left(\frac{D_s}{d_h}\right)^{1,6} = \left(\frac{5{,}9\ cm}{4{,}9\ cm}\right)^{1,6} = 1{,}346 \rightarrow$$

$$\rightarrow \left(1 - \frac{1}{1{,}346}\right) \cdot 100 = 25{,}7\%\ de\ reducción\ de\ atrición$$

La velocidad de salida del gas que emana de la boquilla será:

$$u_{h,s} = u_h \cdot \left(\frac{d_h}{D_s}\right)^2 = 79{,}21\,\frac{m}{s} \cdot \left(\frac{4{,}9\ cm}{5{,}9\ cm}\right)^2 = 54{,}63\,\frac{m}{s}$$

A.2.6.6. Penetración del chorro:

Cuando la velocidad del gas a través de los orificios es baja el gas que surge de los orificios aparece como burbujas discretas en línea. Sin embargo, a mayores velocidades a través del orificio y según las propiedades del gas, el tipo de lecho y las condiciones de operación, el gas puede surgir como un chorro pulsante interrumpido periódicamente por algunas burbujas; o como un chorro permanente que se comporta como una llama

De todas formas, en la mayoría de condiciones industriales se ha comprobado empíricamente que suele prevalecer un chorro. Es un fenómeno importante, ya que la intensa mezcla sólido-gas que produce y la transferencia de materia y calor inducida al lecho afectan al rendimiento del reactor. Tal es así, que en reactores de lecho fluidizado con velocidades de reacción rápida, la mayor parte de la conversión puede ocurrir en la región del chorro. Además, el conocimiento de su distancia de penetración en el lecho es de los parámetros más importantes de diseño, ya que ayuda a:

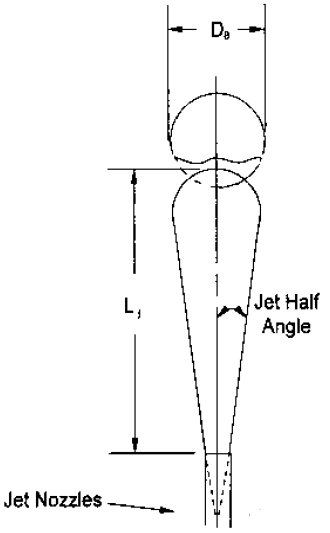
- Determinar a qué distancia hay que colocar elementos internos en el reactor.
- Decidir en parámetros de diseño del distribuidor tales como tamaño del orificio.
- Minimizar o maximizar la atrición de partículas en las placas distribuidoras.

Knowlton y Hirsan, (1980) comprobaron que la longitud de penetración de un chorro orientado hacia arriba fluctúa mucho, pero las longitudes de los chorros que emanan de orificios orientados hacia abajo son más estables. Según Karri

(1991), las longitudes de penetración de las diferentes orientaciones de los chorros se pueden relacionar de la siguiente manera:

$$L_{up} \approx 2 \cdot L_{hor} \approx 3 \cdot L_{down}$$ (up=arriba, hor=horizontal, down=abajo)

Existen numerosas correlaciones para calcular la longitud de penetración de los chorros. Entre ellas, se ha demostrado que la correlación de Merry (1971) para chorros horizontales ofrece predicciones fiables:



Merry (1975)

$$\frac{L_{hor}}{d_h} = 5{,}25 \cdot \left(\frac{\overline{\rho_{gas,h}} \cdot u_h^2}{\rho_p \cdot (1-\varepsilon_{mf}) \cdot g \cdot d_p} \right)^{0,4} \cdot \left(\frac{\overline{\rho_{gas}}}{\rho_p} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{d_p}{d_h} \right)^{0,2}$$

Figura 65 - Esquema de un chorro de gas saliente de la boquilla.

Sustituyendo:

$$\frac{L_{hor}}{0{,}049\ m} = 5{,}25 \cdot \left(\frac{0{,}51 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(79{,}21 \frac{m}{s} \right)^2}{2650 \frac{kg}{m^3} \cdot (1-0{,}5368) \cdot 9{,}81 \frac{m}{s^2} \cdot 0{,}0002\ m} \right)^{0,4} \cdot \left(\frac{0{,}5038}{2650} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{0{,}0002}{0{,}049} \right)^{0,2}$$

$L_{hor} = 0{,}274\ m$, según la relación de Karri:

$$2 \cdot L_{hor} \approx 3 \cdot L_{down} \rightarrow L_{down} \approx \frac{2 \cdot L_{hor}}{3} = \frac{2 \cdot 0{,}274\ m}{3} = 0{,}183\ m = 18{,}3\ cm$$

Puede observarse que la longitud de penetración del chorro dirigido hacia abajo es mayor que la propia longitud de la boquilla. Para saber si los chorros de salida de los orificios coalescen entre ellos se calcula el factor de coalescencia, que relaciona la distancia entre orificios con la longitud de penetración de chorro en su equivalente horizontal:

$$\lambda = \frac{L_h}{L_{hor}} = \frac{24\ cm}{27{,}4\ cm} = 0{,}87 < 1$$

Por tanto los chorros coalescen. El bajo valor de λ indica que el lecho de sólidos probablemente está suspendido sobre los chorros coalescentes, por lo que raramente llegan a contactar con la placa distribuidora. Esto proporciona un diseño que reduce la posibilidad de taponamiento del distribuidor por partículas pegajosas como el polietileno degradado. A esta conclusión también se llega en el cálculo del diámetro de burbuja en el modelo de fluidización.

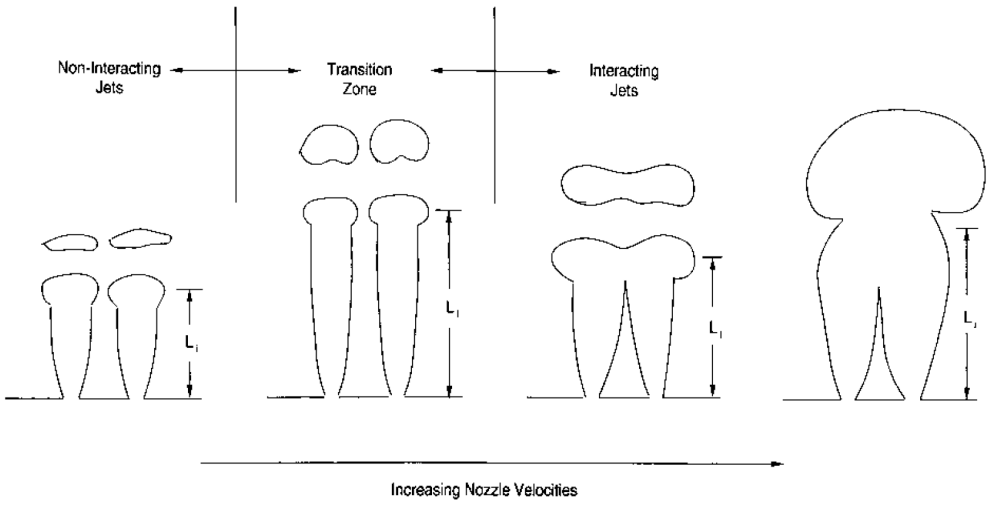


Figura 66 – Coalescencia entre chorros en lechos fluidizados. Wu and Whiting, 1988.

A.2.6.7. Burbujas formadas a partir del distribuidor:

Cuando el chorro se disipa, se forman burbujas al final. El tamaño inicial de esa burbuja formada (D_B) fue estudiado por Basov et al (1969) y Merry (1975), obteniéndose valores muy similares respectivamente:

$$\frac{D_B}{D_s} = 0{,}41 \cdot \left(\frac{u_{h,s}^{0,375}}{D_s^{0,25}} \right) \rightarrow \qquad D_B = 0{,}41 \cdot 5{,}9\ cm \cdot \left(\frac{\left(54{,}63 \frac{cm}{s} \right)^{0,375}}{(5{,}9\ cm)^{0,25}} \right) = 6{,}96\ cm$$

$$\frac{D_B}{D_s} = 0{,}33 \cdot \left(\frac{u_{h,s}^{0,4}}{D_s^{0,2}} \right) \rightarrow \qquad D_B = 0{,}33 \cdot 5{,}9\ cm \cdot \left(\frac{\left(54{,}63 \frac{cm}{s} \right)^{0,4}}{(5{,}9\ cm)^{0,2}} \right) = 6{,}76\ cm$$

Para calcular la frecuencia de una burbuja que surge del orificio, se va a usar la analogía de formación de burbujas en un líquido no viscoso, con la que Davidson y Harrison (1963) derivaron la ecuación del volumen de una burbuja asumiendo que no exista fugas del gas hacia la fase emulsión:

$$f_n = \frac{Q_v}{V_B} = \frac{Q_V}{1{,}138 \cdot \frac{Q_V^{1,2}}{g^{0,6}}} = \frac{g^{0,6}}{1{,}138 \cdot Q_V^{0,2}} = \frac{g^{0,6}}{1{,}138 \cdot \left(\frac{W_m}{\rho_{gas}} \right)^{0,2}} = \frac{\left(9{,}8\, m/s^2 \right)^{0,6}}{1{,}138 \cdot \left(\frac{5.769 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1\ h}{3.600\ s}}{0{,}5038\, kg/m^3} \right)^{0,2}};$$

$$f_n = 2{,}74\ s^{-1} \approx 3\ burbujas\ \ por\ segundo$$

Pero existe evidencia de que sí hay fuga sustancial del gas de la burbuja a la emulsión, por lo que Nguyen y Leung (1972) y Buevich y Minaev (1976) hicieron experimentos para encontrar una ecuación más aproximada:

$$f_n = \frac{Q_V}{0{,}53 \cdot V_B} = \frac{2{,}74}{0{,}53} s^{-1} = 5{,}17\ s^{-1} \approx 5\ burbujas\ \ por\ segundo$$

$$f_n = \frac{Q_V}{0{,}37 \cdot V_B} = \frac{2{,}74}{0{,}37} s^{-1} = 7{,}4\ s^{-1} \approx 7\ burbujas\ \ por\ segundo$$

La frecuencia de burbuja fue determinada experimentalmente por Rowe et al. (1979), Sit and Grace (1981), y Kececioglu et al. (1984), encontrando valores entre 5 y 10 burbujas por segundo.

A.2.6.8. Potencia del compresor del gas recirculado a la placa distribuidora:

La placa distribuidora contribuye a una considerable fracción de la caída de presión total a través de un sistema en lecho fluidizado, por lo que siempre es importante estimar el consumo de energía eléctrica del compresor que recircula el gas hacia el sistema. Se supone una corriente de gas de pirólisis que va a ser comprimida de forma adiabática y reversible desde un estado a presión P_4 (justo antes del compresor) hasta un estado a mayor presión P_1 (justo después del compresor) para que pueda circular por todo el sistema. Los efectos cinéticos y potenciales se consideran despreciables, y se va a suponer que el compresor tiene un rendimiento de 0,8:

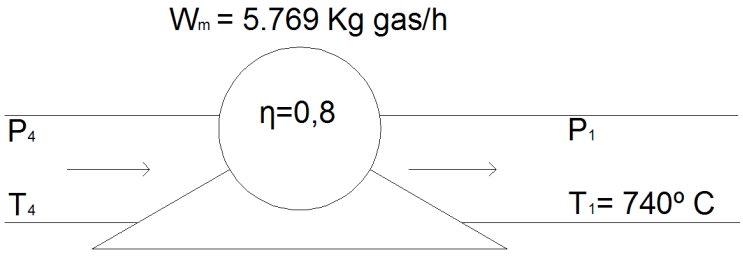


Figura 67 – Esquema del compresor de gas recirculado al reactor.

$$Potencia\ del\ compresor = P_c = \frac{W_m \cdot g \cdot h_A}{\eta}$$

Donde h_A es la pérdida de carga, en metros:

$$h_A = \frac{P_4 \cdot \gamma}{\rho_4 \cdot g \cdot (\gamma - 1)} \cdot \left[\left(\frac{P_1}{P_4} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]$$

Donde γ es el factor de compresibilidad. Como no se dispone de todos los factores de compresibilidad de los gases en la mezcla pirolítica, se empleará el factor del metano, que es el más abundante, con un 30%: γ = 1,31

Se necesita saber P_4 y P_1.

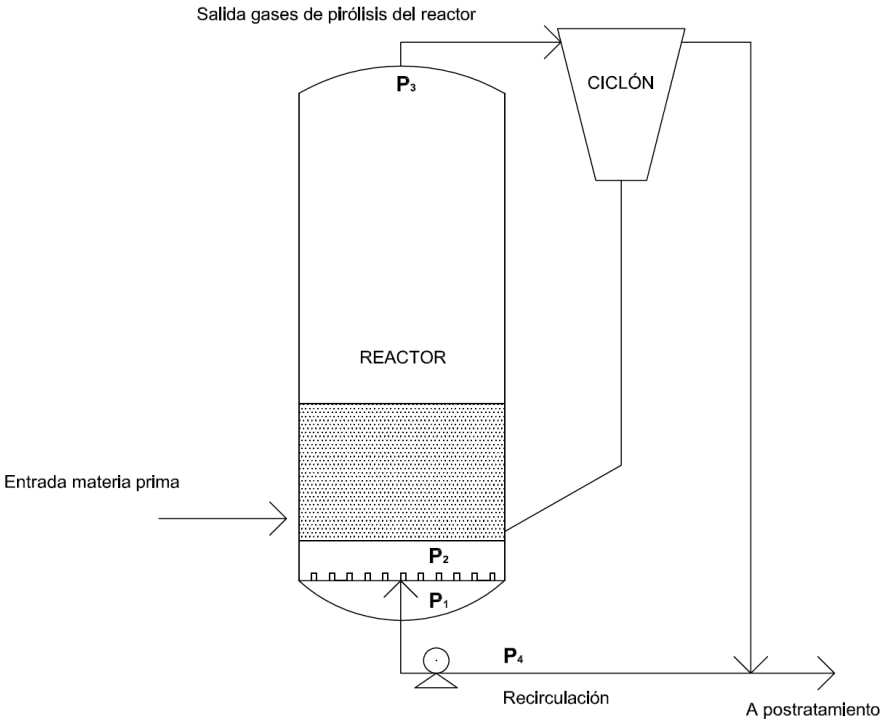


Figura 68 – Esquema de presiones en el reactor de pirólisis.

Datos de presión conocidos:

$P_3 = P_{atm} =$ 101.325 Pa (arriba el reactor está a presión atmosférica).

$\Delta P_{2\text{-}3} =$ 5.000 Pa (caída de presión en el lecho).

ΔP_{1-2} = 2.500 Pa (caída de presión en la placa distribuidora).

ΔP_{3-4} = 1.557 Pa (caída de presión obtenida en el ciclón, suponiendo que la caída de presión en las tuberías desde la salida del ciclón al compresor es despreciable).

Por tanto:

$$P_4 = P_3 - \Delta P_{3-4} = 101.325\ Pa - 1.557\ Pa = 99.768\ Pa$$

$$P_1 = \Delta P_{1-2} + P_2 = \Delta P_{1-2} + \Delta P_{2-3} + P_3 = 2.500\ Pa + 5.000\ Pa + 101.325\ Pa = 108.825\ Pa$$

Se necesita saber ρ_4:

Al ser una compresión adiabática:

$P_4 \cdot \rho_4^{-\gamma} = P_1 \cdot \rho_1^{-\gamma}$; despejando:

$$\rho_4 = \rho_1 \cdot \left(\frac{P_4}{P_1}\right)^{1/\gamma} = \frac{P_1 \cdot M}{R \cdot T_1} \cdot \left(\frac{P_4}{P_1}\right)^{1/\gamma} = \frac{108.825\ Pa \cdot 40{,}87 \cdot 10^{-3}\ \frac{kg}{mol}}{8{,}314 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot (740 + 273) K} \cdot \left(\frac{99.768}{108.825}\right)^{1/1{,}31};$$

$$\rho_4 = 0{,}494\ \frac{kg}{m^3}$$

Ya se puede obtener la potencia del compresor:

$$h_A = \frac{P_4 \cdot \gamma}{\rho_4 \cdot g \cdot (\gamma - 1)} \cdot \left[\left(\frac{P_1}{P_4}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right] = \frac{99.768\ Pa \cdot 1{,}31}{0{,}494 \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}8 \frac{m}{s^2} \cdot (1{,}31 - 1)} \cdot \left[\left(\frac{108.825}{99.768}\right)^{\frac{1{,}31-1}{1{,}31}} - 1\right];$$

$$h_A = 1.809{,}25\ m$$

La potencia del compresor será por tanto:

$$P_c = \frac{W_m \cdot g \cdot h_A}{\eta} = \frac{5.769 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1\,h}{3.600\,s^2} \cdot 9{,}8 \frac{m}{s^2} \cdot 1.809{,}25\,m}{0{,}8} = 35.516{,}72\,W = 35{,}5\,kW$$

Cálculo de la temperatura del gas justo antes de ser impulsado por el compresor, T_4:

$$\rho_4 = \frac{P_4 \cdot M}{R \cdot T_4} \rightarrow T_4 = \frac{P_4 \cdot M}{R \cdot \rho_4} = \frac{99.768\,Pa \cdot 40{,}87 \cdot 10^{-3}\,\frac{kg}{m^3}}{8{,}314 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot 0{,}494 \frac{kg}{m^3}} = 992{,}79\,K = 719{,}8^{o}\,C$$

Luego, desde que el gas sale del reactor, a 740º C, hasta que se recircula de nuevo, ha perdido 20,2º C en su paso por las tuberías y el ciclón.

ANEXO A.3:

DIMENSIONADO DEL CICLÓN

Indice:

A.3.1. Estimación de la Altura de Transporte Libre (TDH)……....pág. 1

A.3.2. Flujo arrastre partículas en el freeboard por debajo del TDH....pág. 2

A.3.3. Diseño del ciclón 1D2D…….pág. 6

A.3.1. Estimación de la Altura de Transporte Libre (TDH):

Para averiguar la cantidad de arena que es arrastrada con la corriente gaseosa saliente del reactor, las ecuaciones de cálculo dependen de si el flujo del gas salga a una altura superior o inferior de la Altura de Transporte Libre (TDH), porque influirá en el procedimiento de cálculo. Por ello se va a proceder a calcular este parámetro. No hay un método aceptado globalmente para el cálculo de la TDH, sino sólo correlaciones empíricas basadas en el diámetro de burbuja, el diámetro de columna y propiedades del sólido y el gas.

	Equation	Reference
1	$\mathrm{TDH} = 0.85U^{1.2}(7.33 - 1.2\log U)$	Chan and Knowlton (1984b)
2	$\mathrm{TDH} = 1000\dfrac{U^2}{g}$	Fournol et al. (1973)
3	$\mathrm{TDH} = 18.2d_\mathrm{b}$	George and Grace (1978)
4	$\mathrm{TDH} = 13.8d_\mathrm{b}$	Fung and Hamdullahpur (1993)
5	$\mathrm{TDH} = \dfrac{1500H_\mathrm{b}\ \mathrm{Re_p}}{\mathrm{Ar}}$	Sciazko et al. (1991)

All parameters to be inserted in SI units.

Tabla 36 – Correlaciones para el cálculo de la Altura de transporte libre.

Aquellas correlaciones en las que está involucrada la velocidad de fluidización generan unos valores muy dispares de TDH, que van desde los 21 metros hasta los 900 metros, por lo que no se han considerado en el proyecto. En su lugar, se han utilizado las que consideran el diámetro de burbuja:

$$TDH = 18{,}2 \cdot d_b = 18{,}2 \cdot 0{,}6848\ m = 12{,}46\ m$$

$$TDH = 13{,}8 \cdot d_b = 13{,}8 \cdot 0{,}6848\ m = 9{,}45\ m$$

Como puede verse, incluso con el valor más bajo estimado del TDH, aún sigue siendo mayor que la longitud del reactor (5,8 metros), con lo cual, se tiene un flujo de gas a la salida por debajo del TDH.

A.3.2. Flujo de arrastre de partículas en el freeboard por debajo del TDH:

El flujo total de arrastre del componente "i" para alturas de freeboard por debajo de la TDH se halla con la ecuación:

$$E_{ih} = E_{i\infty} + E_{i0} \cdot \exp(-a_i \cdot h)$$

Donde:

$E_{i\infty}$: flujo total de arrastre del componente i para alturas de freeboard por encima de la TDH ($kg/m^2 \cdot s$)

E_{i0}: flujo total de arrastre del componente i en la superficie del lecho fluidizado ($kg/m^2 \cdot s$)

a_i: Coeficiente de caída de las partículas del componente i arrastradas del lecho (m^{-1}).

h: altura considerada por encima del distribuidor del gas (longitud de reactor en este caso) (m).

- Cálculo del flujo de arrastre para alturas de freeboard superiores al TDH ($E_{i\infty}$):

$$E_{i\infty} = x_{Bi} \cdot K^*_{i\infty}$$

Donde:

x_{Bi}: fracción másica de partículas del componente i en el lecho fluidizado.

$K^*_{i\infty}$: constante de velocidad de elutriación más allá del TDH.

Respecto al valor de x_{Bi}, el lecho está formado exclusivamente por arena. Las partículas de polietileno, por su corta duración antes de descomponerse

y su menor proporción, se consideran de fracción despreciable a efectos de elutriación respecto a la arena. Por tanto: $x_{Bi} \approx 1$.

Respecto a la constante de elutriación, existe un gran número de correlaciones empíricas, según unos rangos concretos de velocidad de fluidización, diámetro del lecho y diámetro de partícula. De todas ellas, la correlación de Choi et al. (1999) está basada en un amplio rango de diferentes equipos, materiales y condiciones de operación, coincidiendo aproximadamente con los parámetros del proyecto:

Rango de operación	Velocidad de fluidización (m/s):	0,3 – 7	Proyecto: 3 m/s
	Diámetro del lecho (m):	0,06 – 1	Proyecto: 1,16 m
	Diámetro partículas lecho (mm):	0,05 – 1	Proyecto: 0,2 mm

Correlación

$$\frac{K_{i\infty}^{*} \cdot d_p}{\mu_{gas}} = (Ga)^{0,5} \cdot \exp\left(6,92 - 2,11 \cdot F_g^{0,303} - \frac{13,1}{F_d^{0,902}}\right)$$

Donde, todo en uds. de S.I.:

$F_g = g \cdot d_p \cdot (\rho_s - \rho_g)$; fuerza de gravedad del área proyectada.

$F_d = C_D \cdot \frac{\rho_g \cdot u^2}{2}$; fuerza de arrastre del área proyectada.

Sustituyendo:

$$F_g = 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 0,0002\ m \cdot (2.650 - 0,5038) \frac{kg}{m^3} = 5,19 \frac{kg}{m \cdot s^2}$$

$F_d = C_D \cdot \frac{\rho_g \cdot u^2}{2} \rightarrow$ donde C_d es el coeficiente de arrastre para partículas que se mueven a través de fluidos. Depende del régimen de fluidización:

$$\mathrm{Re}_p = \frac{\rho_{gas} \cdot u \cdot d_p}{\mu_{gas}} = \frac{0{,}5038 \frac{kg}{m^3} \cdot 3 \frac{m}{s} \cdot 0{,}0002\ m}{2{,}71 \cdot 10^{-5}\ \frac{kg}{m \cdot s}} = 11{,}15 \rightarrow \textit{Régimen transición}$$

En régimen de transición del valor del coeficiente de rozamiento es:

$C_D = \frac{10}{\mathrm{Re}_p^{0,5}} = \frac{10}{(11{,}15)^{0,5}} = 2{,}99$, se sustituye en F_d:

$$F_d = C_D \cdot \frac{\rho_g \cdot u^2}{2} = 2{,}99 \cdot \frac{0{,}5038 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(3 \frac{m}{s}\right)^2}{2} = 6{,}79 \frac{kg}{m \cdot s^2}$$

Ya se puede calcular la constante de elutriación de la arena:

$$\frac{K_\infty^* \cdot 0{,}0002\ m}{2{,}71 \cdot 10^{-5}\ \frac{kg}{m \cdot s}} = (143{,}7)^{0,5} \cdot \exp\left(6{,}92 - 2{,}11 \cdot \left(5{,}19 \frac{kg}{m \cdot s^2}\right)^{0,303} - \frac{13{,}1}{\left(6{,}79 \frac{kg}{m \cdot s^2}\right)^{0,902}}\right);$$

$$K_\infty^* = 4{,}96 \frac{kg}{m^2 \cdot s} \rightarrow E_\infty = 4{,}96 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$$

- Cálculo del coeficiente de caída de la arena (a): se vuelven a usar las correlaciones del estudio de Choi et al. (1999).

$$a \cdot d_p = \exp\left(-11{,}2 + 210 \cdot \frac{d_p}{D_{lecho} - d_p}\right) \cdot \left(\frac{d_p \cdot \rho_g \cdot (u - u_{mf})}{\mu}\right)^{-0,492} \cdot \left(\frac{\rho_p \cdot g \cdot d_p}{\rho_g \cdot (u - u_{mf})^2}\right)^{0,725} \times \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g}\right)^{0,731} \cdot C_D{}^{-1,47}$$

Sustituyendo:

$$a \cdot 0{,}0002\ m = \exp\left(-11{,}2 + 210 \cdot \frac{0{,}0002\ m}{1{,}16\ m - 0{,}0002\ m}\right) \times$$

$$\left(\frac{0{,}0002\ m \cdot 0{,}5038 \frac{kg}{m^3} \cdot (3 - 0{,}085)\frac{m}{s}}{2{,}71 \cdot 10^{-5}\ \frac{kg}{m \cdot s}}\right)^{-0{,}492} \cdot \left(\frac{2.650 \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}81 \frac{m}{s^2} \cdot 0{,}0002\ m}{0{,}5038 \frac{kg}{m^3} \cdot (3 - 0{,}085)^2\ \frac{m^2}{s^2}}\right)^{0{,}725} \times$$

$$\left(\frac{2.650 - 0{,}5038}{0{,}5038}\right)^{0{,}731} \cdot (2{,}99)^{-1{,}47};$$

$$a = 2{,}65\ m^{-1}$$

- Cálculo del flujo total de arrastre en la superficie del lecho fluidizado (E_{i0}):

$$E_{i0} = x_{Bi} \cdot K_{i0}^{*}$$

Donde K_{i0}^{*} es la constante de velocidad de elutriación en la superficie del lecho fluidizado. Se emplean de nuevo las correlaciones de Choi et al. (1999):

$$\frac{K_{ih}^{*} \cdot d_p}{\mu} = C_D \cdot \mathrm{Re}_p \cdot \exp\left(-9{,}12 - 0{,}0153 \cdot a \cdot (H_t - H_b)\right)$$

Donde H_t es la altura del reactor respecto a la altura del lecho fluidizado para tomar una referencia de altura donde hallar la constante de elutriación. Si se está considerando la constante de elutriación en la superficie del lecho fluidizado, entonces: $H_t = H_b$ y el segundo término del exponente se anula. Para el componente único de la arena, y sustituyendo:

$$\frac{K_0^{*} \cdot 0{,}0002\ m}{2{,}71 \cdot 10^{-5}\ \frac{kg}{m \cdot s}} = 2{,}99 \cdot 11{,}15 \cdot \exp(-9{,}12); \qquad K_0^{*} = 4{,}94 \cdot 10^{-4}\ \frac{kg}{m^2 \cdot s} = E_0$$

Ya se puede calcular el flujo total de arrastre de la arena para alturas de freeboard por debajo de la TDH (en este caso, la altura del reactor):

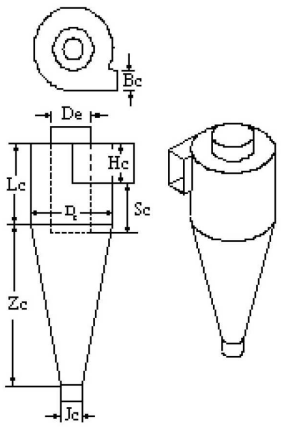
$$E_h = E_\infty + E_0 \cdot \exp(-a \cdot h) = 4{,}96 \frac{kg}{m^2 \cdot s} + 4{,}94 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{m^2 \cdot s} \cdot \exp\left(-2{,}65 m^{-1} \cdot 5{,}8\ m\right);$$

$$E_h = 4{,}96 \frac{kg}{m^2 \cdot s} + 4{,}94 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{m^2 \cdot s} \cdot 2{,}11 \cdot 10^{-7} = 4{,}96 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$$

Como puede verse, el segundo término de la ecuación carece de importancia en la ecuación ya sea alto o bajo, ya que el valor de E_0 se ve anulado por el exponente debido al alto valor de la multiplicación del coeficiente de caída y de la altura del reactor.

A.3.3. Diseño del ciclón 1D2D:

Se va a emplear como procedimiento de cálculo para la disposición de ciclón 1D2D aquel utilizado en el diseño clásico de ciclones, desarrollado por Lapple en los años 50, un método estándar y considerado aceptable por muchos ingenieros (Wang, 2004).



1D2D

$B_c = D_c/4$	$J_c = D_c/2$
$D_e = D_c/1.6$	$S_c = 5D_c/8$
$H_c = D_c/2$	$L_c = 1 \times D_c$
$Z_c = 2 \times D_c$	

Figura 69 – Disposición dimensional del ciclón 1D2D.

a) Velocidad de entrada del gas: estudios previos realizados por Parnell et al. (1996) mostraron que la eficiencia de un ciclón incrementa con la velocidad de entrada, pero a partir de un punto de velocidad la eficiencia comienza a bajar dramáticamente, de forma que para un ciclón tipo 1D2D se estimó una velocidad ideal de entrada del gas de 12 m/s ±2 m/s, basado en la densidad del aire en condiciones estándar (1,2754 kg/m^3). Utilizando este dato se va a estimar la velocidad óptima de entrada del gas de pirólisis en función de su densidad:

$$Qv)_{aire\ cond.est.} = \frac{Wm)_{salidagas}}{\rho_{aire\ cond.est.}} = V_{aire\ cond.est.} \cdot Sección\ entrada\ ciclón$$

$$Qv)_{gas\ pirólisis} = \frac{Wm)_{salidagas}}{\rho_{gas\ pirólisis.}} = V_{gas\ pirólisis} \cdot Sección\ entrada\ ciclón$$

Suponiendo que se tratara un caudal másico igual en ambos gases, se igualan ambas ecuaciones:

$$V_{aire\ cond.est.} \cdot \rho_{aire\ cond.est.} = V_{gas\ pirólisis} \cdot \rho_{gas\ pirólisis};$$

$$12\frac{m}{s} \cdot 1{,}2754\frac{kg}{m^3} = V_{gas\ pirólisis} \cdot 0{,}5038\frac{kg}{m^3}; \qquad V_{gas\ pirólisis} = 30{,}38\frac{m}{s} = V_i$$

b) Diámetro del ciclón (D_c): conociendo la velocidad de entrada del gas, el diámetro del ciclón se puede conocer mediante la ecuación:

$$D_c = \sqrt{\frac{8 \cdot Q}{V_i}} = \sqrt{\frac{8 \cdot \frac{Wm)_{gas\ pirólisis}}{\rho_{gas\ pirólisis}}}{V_i}} = \sqrt{\frac{8 \cdot \frac{7.590{,}8\frac{kg}{h} \cdot \frac{1h}{3.600s}}{0{,}5038\frac{kg}{m^3}}}{30{,}38\frac{m}{s}}} = 1{,}05\ m$$

Ya con el valor de se pueden obtener los demás parámetros, como ocurría en el modelo de fluidización con el diámetro de burbuja.

c) Dimensionado del ciclón: todas las relaciones dimensionales dependen de D_c.

$$\left.\begin{array}{l} B_c = {D_c}/{4} = {1{,}05\ m}/{4} = 0{,}2625\ m \\ H_c = {D_c}/{2} = {1{,}05\ m}/{2} = 0{,}525\ m \end{array}\right\} \ Sección)_{entrada\ ciclón} = B_c \cdot H_c = 0{,}1378\ m^2$$

$$D_e = {D_c}/{1{,}6} = {1{,}05\ m}/{1{,}6} = 0{,}656\ m$$

$$L_c = 1 \cdot D_c = 1{,}05\ m$$

$$S_c = {5 \cdot D_c}/{8} = 0{,}656\ m$$

$$Z_c = 2 \cdot D_c = 2{,}1\ m$$

$$J_c = {D_c}/{2} = 0{,}525\ m$$

También se puede calcular la sección de entrada del gas al ciclón mediante la ecuación de caudal vista anteriormente:

$$Qv)_{gas\ pirólisis} = \frac{Wm)_{salidagas}}{\rho_{gas\ pirólisis.}} = V_{gas\ pirólisis} \cdot Sección)_{entrada\ ciclón};$$

$$\frac{7.590{,}8\frac{kg}{h}\cdot\frac{1h}{3.600s}}{0{,}5038\frac{kg}{m^3}} = 30{,}38\frac{m}{s}\cdot Sección)_{entrada\ ciclón}; \qquad Sección)_{entrada\ ciclón} = 0{,}1377\ m^2$$

d) Carga y caudal de arena de entrada al ciclón:

$$L = \frac{E_h}{V_i} = \frac{4{,}96 \dfrac{kg}{m^2 \cdot s}}{30{,}38 \dfrac{m}{s}} = 0{,}16 \frac{kg\ arena}{m^3}$$

$$Caudal\ Entrada = E_h \cdot Sección)_{entrada\ ciclón} = 4{,}96 \frac{kg}{m^2 \cdot s} \cdot 0{,}1378\ m^2 = 0{,}68 \frac{kg\ arena}{s}$$

e) Número de giros efectivos del gas (N_e): es el número de revoluciones que el gas gira mientras cruza el vórtex externo del ciclón. Un mayor número de giros del gas resulta en una mayor eficiencia de separación. El modelo de Lapple para N_e es:

$$N_e = \frac{1}{H_c} \cdot \left(L_c + \frac{Z_c}{2} \right) = \frac{2}{D_c} \cdot \left(D_c + D_c \right) = 4\ giros$$

Pero, según los cálculos de Wang (2001) el N_e se halla mediante la suma de los giros en el cilindro (N_{e1}) y en el cono (N_{e2}):

$$N_{e1} = \frac{L_1}{\pi \cdot D_c}; \qquad N_{e2} = \frac{L_2}{\pi \cdot \left(\dfrac{D_c + D_e}{2} \right)}$$

Donde L_1 y L_2 son las distancias de viaje del gas en el cilindro y en el cono, respectivamente. Es la distancia que recorre el gas en su descenso por el ciclón en ambas zonas. Para un ciclón 1D2D, Wang (2004) calculó las distancias:

$$L_1 = 1{,}66 \cdot \pi \cdot D_c = 5{,}47\ m \rightarrow zona\ cilindro \rightarrow N_{e1} = \frac{5{,}47\ m}{\pi \cdot 1{,}05\ m} = 1{,}66$$

$$L_2 = 2{,}57 \cdot D_c = 2{,}69\ m \rightarrow zona\ cono \rightarrow N_{e2} = \frac{2{,}69\ m}{\pi \cdot \left(\dfrac{1{,}05 + 0{,}656}{2} \right) m} = 1$$

Por tanto:

$$N_e = N_{e1} + N_{e2} = 1{,}66 + 1 = 2{,}66 \; giros$$

El método de Lapple, aunque es uno de los primeros métodos de cálculo de ciclones y es aceptado por muchos ingenieros, no considera la velocidad de entrada del gas en el ciclón a la hora del cálculo de las dimensiones (D_c). Por tanto, se considera el valor obtenido por el método de Wang.

f) Tamaño teórico de partícula que el ciclón es capaz de separar: Rosin et al. (1932) desarrollaron una relación para estimarlo.

$$d_{p,th} \cong \sqrt{\frac{9 \cdot \mu_{gas} \cdot B_c}{\pi \cdot N_e \cdot V_i \cdot (\rho_p - \rho_g)}} = \sqrt{\frac{9 \cdot 2{,}71 \cdot 10^{-5} \, \frac{kg}{m \cdot s} \cdot 0{,}2625 \, m}{\pi \cdot 2{,}66 \cdot 30{,}38 \frac{m}{s} \cdot (2.650 - 0{,}5038) \frac{kg}{m^3}}} \; ;$$

$$d_{p,th} \cong 9{,}76 \cdot 10^{-6} \; m = 9{,}76 \; \mu m$$

Por tanto, la arena con un diámetro de 200 micras, es separada sin problemas pues el ciclón es capaz de separar hasta diámetros de 9,76 micras.

g) Caída de presión en el ciclón: es calculada sumando diferentes caídas de presión que se desglosan a continuación.

1. Caída de presión por contracción: producido por la contracción del gas que circula de un área mayor a un área menor. Para ciclones externos, normalmente tiene dos etapas, del freeboard sobre el lecho hasta el área de salida del reactor, y desde el área de salida del reactor hasta el área de entrada de gas en el ciclón.

$$\Delta P_{(f-i)g} = 0{,}5 \cdot \rho_{gas} \cdot \left(V_i^2 - V_f^2 + K_{fi} \cdot V_i^2\right)$$

Donde:

V_f: velocidad del gas en el freeboard (velocidad de fluidización).

K_{fi}: coeficiente de contracción debido al flujo de gas desde un área mayor a un área menor. Es una función del cociente entre el área menor de salida del gas del ciclón (A_s) y el área mayor del freeboard (A_l).

$$\frac{A_s}{A_l} = \frac{Área\ salida\ gas\ ciclón}{Area\ lecho} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{D_e}{2}\right)^2}{Area\ lecho} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{0{,}656\ m}{2}\right)^2}{1{,}06\ m^2} = 0{,}32$$

Se utiliza la siguiente tabla para ello:

Values of the Contraction Coefficient for Various Small and Large Area Ratios

Ratio of the smaller to the larger area	K_{fi} or K_o
0.0	0.50
0.1	0.47
0.2	0.43
0.3	0.395
0.4	0.35

$$\frac{0{,}3 - 0{,}32}{0{,}395 - K_{fi}} = \frac{0{,}3 - 0{,}4}{0{,}395 - 0{,}35};$$

$$K_{fi} = 0{,}386$$

Tabla 37 - Coeficientes de contracción para diferentes cocientes de áreas pequeña-grande.

Luego:

$$\Delta P_{(f-i)g} = 0{,}5 \cdot 0{,}5038 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(\left(30{,}38 \frac{m}{s} \right)^2 - \left(3 \frac{m}{s} \right)^2 + 0{,}386 \cdot \left(30{,}38 \frac{m}{s} \right)^2 \right) =$$

$$= 319{,}96 \frac{kg}{m \cdot s^2} \cdot \frac{1N}{kg \cdot \frac{m}{s^2}} \cdot \frac{Pa}{1 \frac{N}{m^2}} = 319{,}96\ Pa$$

2. Caída de presión por aceleración de los sólidos: los sólidos que acompañan al gas dentro del reactor son acelerados desde una velocidad baja en el freeboard hasta la velocidad de entrada del gas en el ciclón.

$$\Delta P_{(f-i)p} = L \cdot V_{pi} \cdot \left(V_{pi} - V_{pf} \right)$$

Donde V_{pi} y V_{pf} son las velocidades de las partículas a la entrada en el ciclón y en el freeboard, respectivamente. Si las partículas son pequeñas y tienen una velocidad terminal baja, normalmente $V_{pi} \approx V_i$ y $V_{pf} \approx V_f$. Por tanto:

$$\Delta P_{(f-i)p} = 0{,}16 \frac{kg\ arena}{m^3} \cdot 30{,}38 \frac{m}{s} \cdot \left(30{,}38 - 3 \right) \frac{m}{s} = 133{,}08\ Pa$$

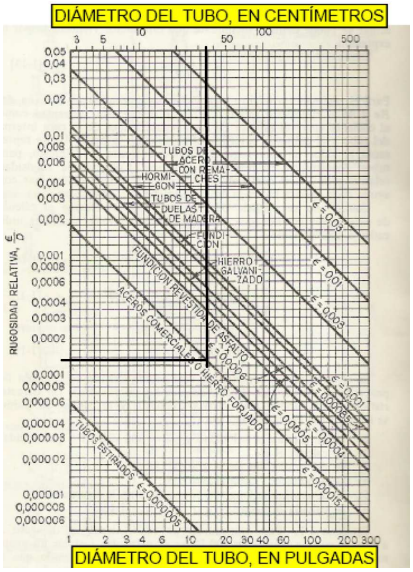
3. Caída de presión por fricción con el cilindro: debido al flujo de sólidos a través de la pared del cilindro del ciclón.

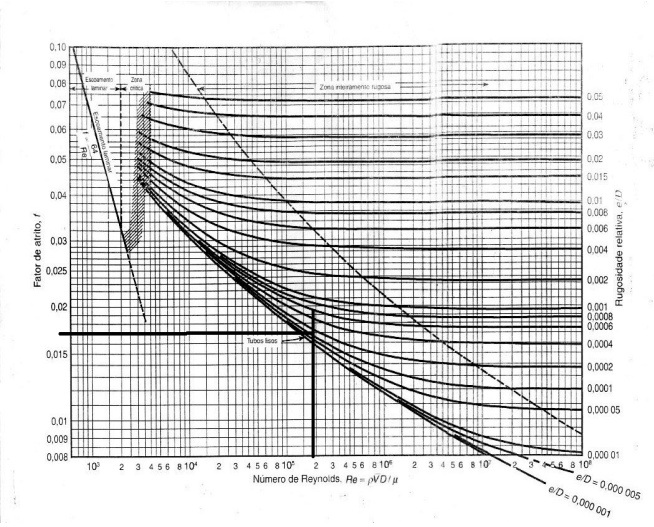
$$\Delta P_{bf} = \frac{2 \cdot f \cdot \rho_{gas} \cdot V_i^2 \cdot \pi \cdot D_c \cdot N_e}{d_{hi}}$$

Donde f es el factor de fricción de Fanning y d_{hi} es el diámetro hidráulico de la entrada del ciclón, que se halla con la ecuación:

$$d_{hi} = \frac{4 \cdot Área\ entrada\ ciclón}{Perímetro\ entrada} = \frac{4 \cdot B_c \cdot H_c}{2 \cdot B_c + 2 \cdot H_c} = \frac{4 \cdot 0{,}2625 \cdot 0{,}525}{2 \cdot 0{,}2625 + 2 \cdot 0{,}525} = 0{,}35\ m$$

El factor de fricción de Fanning se calcula con un Reynolds que emplea este diámetro hidráulico, a través de la gráfica de rugosidades y la gráfica de Moody:





Gráficas 16 y 17 – Gráfica de cálculo de la rugosidad de pared y gráfica de Moody para el cálculo del factor de fricción.

$$f \begin{cases} \mathrm{Re}_{hi} = \dfrac{d_{hi} \cdot V_i \cdot \rho_{gas}}{\mu_{gas}} = \dfrac{0{,}35\ m \cdot 30{,}38 \dfrac{m}{s} \cdot 0{,}5038 \dfrac{kg}{m^3}}{2{,}71 \cdot 10^{-5} \dfrac{kg}{m \cdot s}} = 1{,}97 \cdot 10^5 \\ \dfrac{\varepsilon}{d_{hi}} \approx 0{,}00013 \text{ (para un ciclón hecho de acero comercial)} \end{cases} \Rightarrow f \approx 0{,}017$$

Luego:

$$\Delta P_{bf} = \frac{2 \cdot 0{,}017 \cdot 0{,}5038 \dfrac{kg}{m^3} \cdot \left(30{,}38 \dfrac{m}{s}\right)^2 \cdot \pi \cdot 1{,}05\ m \cdot 2{,}66}{0{,}35\ m} = 396{,}34\ Pa$$

4. Caída de presión del gas invertido: debido a que el gas invierte su dirección cuando llega al fondo del cono y por lo tanto también su aceleración en el vórtice de gas.

$$\Delta P_r = \frac{\rho_{gas} \cdot V_i^2}{2} = \frac{0{,}5038 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(30{,}38 \frac{m}{s}\right)^2}{2} = 232{,}49\ Pa$$

5. Caída de presión por contracción en la salida del gas del ciclón: ocurre debido al paso del gas del área del cilindro del ciclón al área menor del tubo de salida.

$$\Delta P_o = 0{,}5 \cdot \rho_{gas} \cdot \left(V_e^2 - V_c^2 + K_e \cdot V_e^2\right)$$

Donde:

V_e: velocidad del gas en el tubo de salida del ciclón.

V_c: velocidad del gas en la zona cilíndrica del ciclón.

K_e: coeficiente de contracción entre el área del tubo de salida y el área del cilindro del ciclón.

- Cálculo de V_e:

$$Qv)_{gas\ pirólisis} = \frac{Wm)_{salidagas}}{\rho_{gas\ pirólisis.}} = V_e \cdot S_e = V_e \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_e}{2}\right)^2;$$

$$\frac{7.590{,}8 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1h}{3.600s}}{0{,}5038 \frac{kg}{m^3}} = V_e \cdot \pi \cdot \left(\frac{0{,}656\ m}{2}\right)^2; \qquad V_e = 12{,}38 \frac{m}{s}$$

- Cálculo de V_c:

$$Qv)_{gas\ pirólisis} = \frac{Wm)_{salidagas}}{\rho_{gas\ pirólisis.}} = V_c \cdot S_s = V_c \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_c}{2}\right)^2;$$

$$\frac{7.590{,}8\frac{kg}{h}\cdot\frac{1h}{3.600s}}{0{,}5038\frac{kg}{m^3}} = V_c\cdot\pi\cdot\left(\frac{1{,}05\ m}{2}\right)^2;\qquad V_c = 4{,}83\frac{m}{s}$$

- Cálculo de K_e: se utiliza la misma tabla que antes para hallarlo, extrapolando igualmente.

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{Área\ salida\ gas\ ciclón}{Area\ cilindro\ ciclón} = \frac{\pi\cdot\left(\frac{D_e}{2}\right)^2}{\pi\cdot\left(\frac{D_c}{2}\right)^2} = \frac{D_e^2}{D_c^2} = \left(\frac{0{,}656\ m}{1{,}05\ m}\right)^2 = 0{,}39$$

Values of the Contraction Coefficient for Various Small and Large Area Ratios

Ratio of the smaller to the larger area	K_{fi} or K_o
0.0	0.50
0.1	0.47
0.2	0.43
0.3	0.395
0.4	0.35

$$\frac{0{,}4-0{,}3}{0{,}35-0{,}395} = \frac{0{,}4-0{,}39}{0{,}35-K_e};$$

$$K_e = 0{,}3545$$

Tabla 37 - Coeficientes de contracción para diferentes cocientes de áreas pequeña-grande.

Luego:

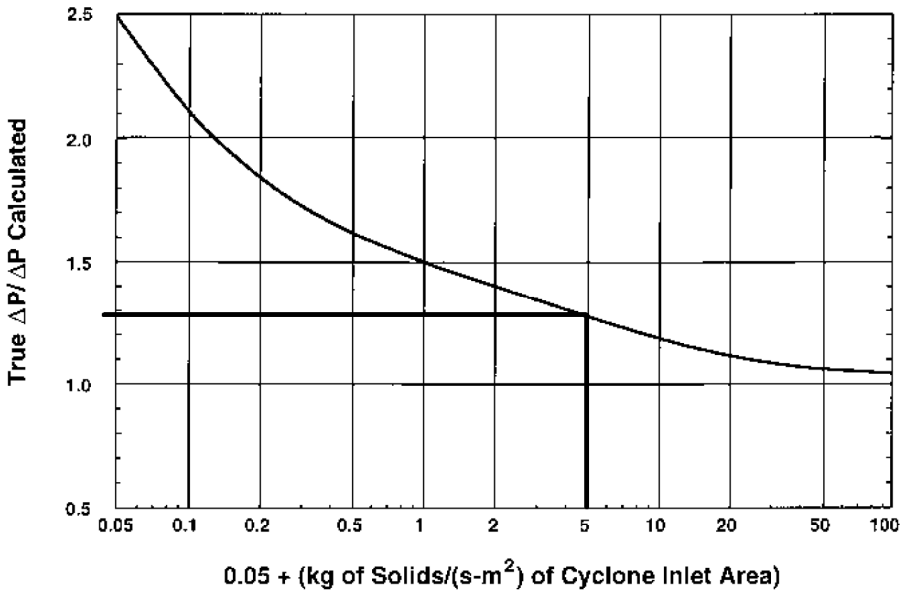
$$\Delta P_o = 0{,}5\cdot 0{,}5038\frac{kg}{m^3}\cdot\left(\left(12{,}38\frac{m}{s}\right)^2 - \left(4{,}83\frac{m}{s}\right)^2 + 0{,}3545\cdot\left(12{,}38\frac{m}{s}\right)^2\right) =$$

$$= 46{,}41\ Pa$$

La suma de los cinco términos de presión da el valor de caída de presión en el ciclón:

$$\Delta P_T = \Delta P_{(f-i)g} + \Delta P_{(f-i)p} + \Delta P_{bf} + \Delta P_r + \Delta P_o =$$
$$= 319{,}96 + 133{,}08 + 396{,}34 + 232{,}49 + 46{,}41\ Pa = 1.128{,}28\ Pa$$

Pero como el flujo de arrastre de sólidos obtenido fue de $4{,}96\,\frac{kg}{m^2 \cdot s}$, es más bajo de $100\,\frac{kg}{m^2 \cdot s}$, y hay que reajustar él cálculo de la caída de presión porque la carga de sólidos es demasiado baja. Para ello se utiliza la siguiente gráfica:



Gráfica 18 – Curva de corrección de la caída de presión del ciclón. Handbook of particle fluidization.

Eje x: $0{,}05 + E_h = 0{,}05 + 4{,}96\,\frac{kg}{m^2 \cdot s} = 5{,}01\,\frac{kg}{m^2 \cdot s}$

Eje y: $\frac{(\Delta P)_{verdadera}}{(\Delta P)_{calculada}} = 1{,}38$

$$\frac{(\Delta P)_{verdadera}}{1.128{,}28\ Pa} = 1{,}38\,;$$

$$(\Delta P)_{verdadera} = 1.557\ Pa$$

h) Longitud del vórtice: el gas gira hacia abajo pegado a la pared del cono, y llegado a un punto fluye hacia el núcleo giratorio central (vórtice) para invertir el sentido y salir por arriba. Si el ciclón es demasiado corto y provoca que el vórtice se acerque o toque el cono, los sólidos serán apartados de la pared del cono y arrastrados hacia fuera a través del vórtice. Por eso es importante estimar esta longitud del vórtice. Bryant et al. (1983) desarrollaron una ecuación para la longitud del vórtice:

$$\frac{L_v}{D_c} = \frac{2}{\left(A_e / A_i\right)^{1/2}}; \qquad \frac{L_v}{D_c} = \frac{2}{\left(\pi \cdot \left(\frac{D_e}{2}\right)^2 / B_c \cdot H_c\right)^{1/2}};$$

$$\frac{L_v}{1{,}05\ m} = \frac{2}{\left(\pi \cdot \left(\frac{0{,}656\ m}{2}\right)^2 / 0{,}2625 \cdot 0{,}525\ m^2\right)^{1/2}}; \qquad L_v = 1{,}34\ m$$

El ciclón tiene una altura de L_c + Z_c, es decir 3,15 metros, luego es suficientemente largo para que el vórtice esté contenido sin rozar las paredes. Según Bryant, para la mayoría de ciclones el valor mínimo práctico del cociente A_e/A_i es 0,4 ya que valores inferiores el diámetro de salida del gas se vuelve muy pequeño. En la ecuación dicho cociente es de 2,45.

ANEXO A.4:

DIMENSIONADO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

Se va a proceder al dimensionado del intercambiador de calor, de carcasa y tubos, mediante el cálculo de la superficie de intercambio. La ecuación de transmisión de calor que rige el proceso puede expresarse como:

$$q = U \cdot A \cdot F \cdot \Delta T_{ml}$$

Donde:

q:	Flujo de calor entre los dos fluidos (693,26 kW, del balance de energía, anexo A.1.3.3.)
U:	Coeficiente global de transmisión de calor: $$\frac{1}{U \cdot A_o} = R = \frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{R_{fi}}{A_i} + \frac{Ln\left(r_o / r_i\right)}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L} + \frac{R_{fo}}{A_o} + \frac{1}{h_o \cdot A_o}$$
A:	Superficie de intercambio del intercambiador.
F:	Factor de corrección para intercambiador de carcasa y tubos (ºC): Gráfica de factores de corrección P vs. R (según pasos por el casco): $$P = \frac{\left(T_{SAL} - T_{ENT}\right)_{LADO\ TUBO}}{\left(T_{ENT}\right)_{LADO\ CARCASA} - \left(T_{ENT}\right)_{LADO\ TUBO}}$$ $$S = \frac{\left(T_{ENT} - T_{SAL}\right)_{LADO\ CARCASA}}{\left(T_{SAL} - T_{ENT}\right)_{LADO\ TUBO}}$$
ΔT_{ml}:	Temperatura media logarítmica (ºC): $$\Delta T_{ml} = \frac{\left(T_C - T_F\right)_L - \left(T_C - T_F\right)_0}{Ln\left[\frac{\left(T_C - T_F\right)_L}{\left(T_C - T_F\right)_0}\right]}$$

A continuación se va a calcular cada parámetro para finalmente despejar la superficie de intercambio (A):

a) Temperatura media logarítmica:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_C - T_F)_L - (T_C - T_F)_0}{Ln\left[\frac{(T_C - T_F)_L}{(T_C - T_F)_0}\right]} = \frac{(740-170)-(375-25)}{Ln\left[\frac{(740-170)}{(375-25)}\right]} = \frac{220}{Ln\left[\frac{570}{350}\right]} = 451{,}1\ K$$

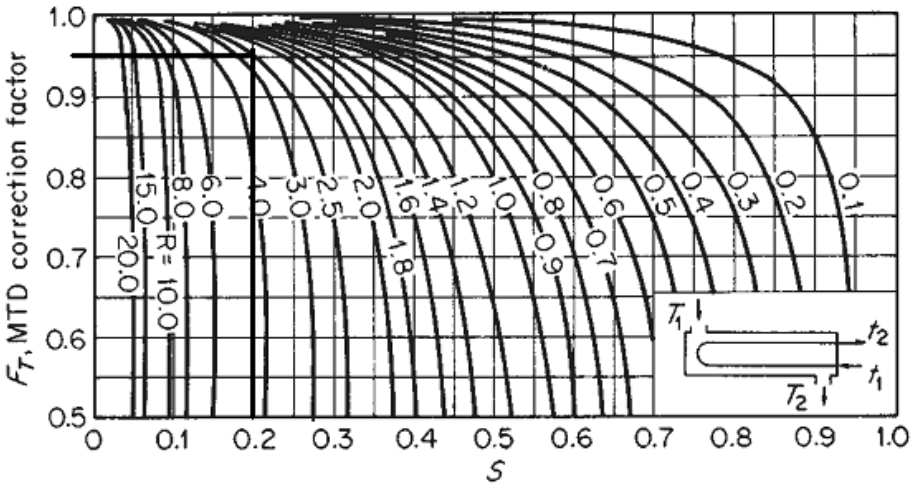
b) Factor de corrección:

$$P = \frac{(T_{SAL} - T_{ENT})_{LADO\ TUBO}}{(T_{ENT})_{LADO\ CARCASA} - (T_{ENT})_{LADO\ TUBO}} = \frac{170-25}{740-25} = 0{,}2$$

$$S = \frac{(T_{ENT} - T_{SAL})_{LADO\ CARCASA}}{(T_{SAL} - T_{ENT})_{LADO\ TUBO}} = \frac{740-375}{170-25} = 2{,}5$$

Se utilizan las gráficas para intercambiadores de carcasa y tubo con un paso por el casco y dos o más pasos de tubo; o para dos pasos de casco y 4 o más pasos de tubo:

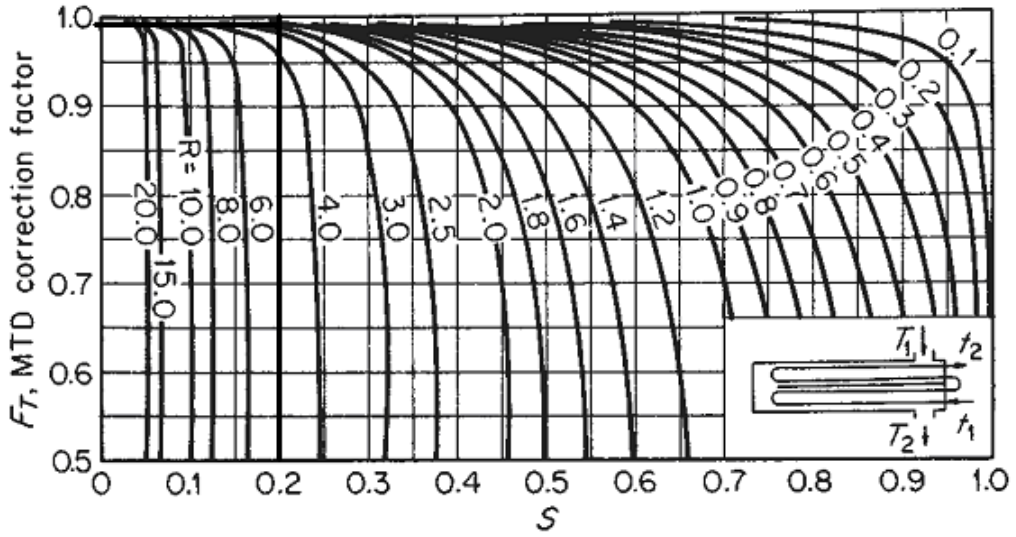
- Para un paso por el casco y dos o más pasos de tubo:



Gráfica 19 – Factor de corrección para 1 paso de casco en un intercambiador de carcasa y tubos. Manual del Ing. Químico. Perry.

En la gráfica para un paso de casco se obtiene un valor de F de 0,95.

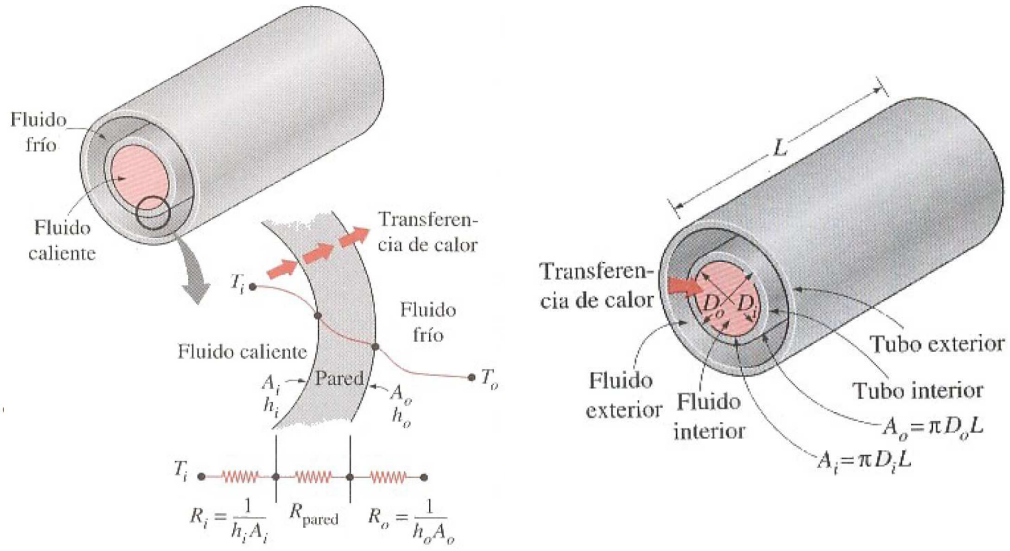
- Para dos pasos de casco y 4 o más pasos de tubo:



Gráfica 20 – Factor de corrección para 2 pasos de casco en un intercambiador de carcasa y tubos. Manual del Ing. Químico. Perry.

En la gráfica para dos pasos de casco se obtiene un valor de F de 0,99 prácticamente. Se utilizará para la ecuación de calor un valor intermedio entre ambas posibilidades de 0,97.

c) Coeficiente global de transmisión de calor: dentro del intercambiador, el flujo de calor entre ambos fluidos debe superar diferentes resistencias para transferirse.



Resistencia contra el flujo de calor por convección en la fase agua/vapor. ▶ | Resistencia contra el flujo de calor por ensuciamiento del interior de la tubería por el paso del agua/vapor. ▶ | Resistencia contra el flujo de calor por conducción a través de la tubería. ▶ | Resistencia contra el flujo de calor por ensuciamiento del exterior de la tubería por el paso del gas de pirólisis. ▶ | Resistencia contra el flujo de calor por convección en el gas de pirólisis.

Figura 70 – Red de resistencias térmicas asociada con la transferencia de calor en un intercambiador de calor de tubo doble. Amancio, Mg.

La ecuación que describe el proceso se expresa como:

$$R = \frac{1}{U \cdot A_o} = \frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{R_{fi}}{A_i} + \frac{Ln\left(r_o / r_i\right)}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L} + \frac{R_{fo}}{A_o} + \frac{1}{h_o \cdot A_o};$$

$$\frac{1}{U \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot L\right)} = \frac{1}{h_i \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot L\right)} + \frac{R_{fi}}{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot L} + \frac{Ln\left(r_o / r_i\right)}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L} + \frac{R_{fo}}{2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot L} + \frac{1}{h_o \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot L\right)}$$

$$\frac{1}{U \cdot D_o} = \frac{1}{h_i \cdot D_i} + \frac{R_{fi}}{D_i} + \frac{Ln\left(r_o / r_i\right)}{2 \cdot K} + \frac{R_{fo}}{D_o} + \frac{1}{h_o \cdot D_o}$$

Para calcular el coeficiente global de transmisión de calor (U) hay que averiguar el diámetro interno (D_i) y externo (D_o) de la tubería, los valores de resistencia por ensuciamiento a ambos lados de la tubería (R_{fi} y R_{fo}), el coeficiente de conductividad térmica de la tubería (K) y los coeficientes de convección a ambos lados de la tubería (h_i y h_o):

- Cálculo de los diámetros interiores y exteriores de la tubería:

$$Q_v = V \cdot S; \qquad \frac{\left(W_m\right)_{agua}}{\left(\rho_l\right)_{entrada\ agua\ (25^oC)}} = V \cdot \pi \left(\frac{D_{\text{int}\,erno\ tubería}}{2}\right)^2;$$

$$\frac{\left(51.736{,}23\ mol\ H_2O / h\right) \cdot \left(0{,}018\ kg\ H_2O / mol\ H_2O\right) \cdot \left(1\ h / 3.600\ s\right)}{998\ kg\ H_2O / m^3\ H_2O} = V \cdot \frac{\pi}{4}\left(D_{\text{int}\,erno\ tubería}\right)^2;$$

$$3{,}3 \cdot 10^{-4}\ \frac{m^3}{s} = V \cdot \left(D_{\text{int}\,erno\ tubería}\right)^2$$

Por lo común, las velocidades de los fluidos que se encuentran en los intercambiadores varían entre 0,7 y 7 m/s para los líquidos y entre 3 y 30 m/s para los gases (Amancio, Mg; Rojas Flores; www.

biblioteca.uns.edu). Como en la tubería entra el agua en estado líquido, se emplearán esos valores como intervalo.

$$V = 0{,}7\ m/s \rightarrow D_{\text{int}\,erno\,tubería} = \sqrt{\frac{3{,}3 \cdot 10^{-4}\ m^3/s}{0{,}7\ m/s}} = 0{,}02171\ m = 21{,}71\ mm$$

$$V = 7\ m/s \rightarrow D_{\text{int}\,erno\,tubería} = \sqrt{\frac{3{,}3 \cdot 10^{-4}\ m^3/s}{7\ m/s}} = 6{,}87 \cdot 10^{-3}\ m = 6{,}87\ mm$$

Por tanto, para que la velocidad del agua esté en ese rango debe tener un diámetro entre 6,87 y 21,71 milímetros. Se utiliza un valor intermedio: 14,3 milímetros de diámetro interno de tubería. Ahora, con este dato y utilizando la tabla del manual TEMA (Tubular Exchanger Manufacturer's Association) se obtendrá el diámetro interno más cercano disponible, su espesor y valor del diámetro externo asociado:

CHARACTERISTICS OF TUBING

Tube O.D. mm	B.W.G. Gage	Thickness mm	Internal Area Sq. Cm.	Sq. M External Surface Per M Length	Sq. M Internal Surface Per M Length	Weight Per M length Steel Kg.*	Tube I.D. mm
6.35	22	0.711	0.1910	0.0199	0.0155	0.098	4.93
	24	0.559	0.2148	0.0199	0.0164	0.080	5.23
	26	0.457	0.2323	0.0199	0.0171	0.067	5.44
	27	0.406	0.2406	0.0199	0.0174	0.060	5.54
9.53	18	1.245	0.3660	0.0299	0.0221	0.254	7.04
	20	0.889	0.4716	0.0299	0.0243	0.189	7.75
	22	0.711	0.5155	0.0299	0.0255	0.155	8.10
	24	0.559	0.5548	0.0299	0.0264	0.124	8.41
12.7	16	1.651	0.6935	0.0399	0.0295	0.449	9.40
	18	1.245	0.8167	0.0399	0.0321	0.351	10.21
	20	0.889	0.9368	0.0399	0.0343	0.259	10.92
	22	0.711	0.9987	0.0399	0.0360	0.210	11.28
15.88	12	2.769	0.8394	0.0499	0.0325	0.694	10.34
	13	2.413	0.9587	0.0499	0.0347	0.601	11.05
	14	2.108	1.0677	0.0499	0.0366	0.716	11.66
	15	1.829	1.1723	0.0499	0.0384	0.634	12.22
	16	1.651	1.2413	0.0499	0.0395	0.579	12.57
	17	1.473	1.3129	0.0499	0.0406	0.524	12.93
	18	1.245	1.4071	0.0499	0.0421	0.449	13.39
	19	1.067	1.4832	0.0499	0.0432	0.390	13.74
	20	0.889	1.5606	0.0499	0.0443	0.329	14.10
19.05	10	3.404	1.1774	0.0598	0.0385	1.240	12.24
	11	3.048	1.3181	0.0598	0.0407	1.202	12.95
	12	2.769	1.4342	0.0598	0.0425	1.112	13.51
	13	2.413	1.5890	0.0598	0.0447	0.990	14.22
	14	2.108	1.7284	0.0598	0.0466	0.881	14.83
	15	1.829	1.8606	0.0598	0.0484	0.777	15.39
	16	1.651	1.9477	0.0598	0.0495	0.708	15.75
	17	1.473	2.0368	0.0598	0.0506	0.638	16.10
	18	1.245	2.1542	0.0598	0.0520	0.548	16.56
	20	0.889	2.3432	0.0598	0.0543	0.399	17.27

Tabla 38: Características de los tubos del intercambiador. Manual TEMA.

Por tanto:

Diámetro interno del tubo: 14,83 mm.

Espesor del tubo: 2,108 mm.

Diámetro externo del tubo: 19,05 mm. (3/4‘‘)

- Cálculo de los valores de resistencia por ensuciamiento a ambos lados de la tubería (R_{fi} y R_{fo}):

Fouling Resistances For Industrial Fluids

Oils:	
Fuel Oil #2	0.002
Fuel Oil #6	0.005
Transformer Oil	0.001
Engine Lube Oil	0.001
Quench Oil	0.004
Gases And Vapors:	
Manufactured Gas	0.010
Engine Exhaust Gas	0.010
Steam (Non-Oil Bearing)	0.0005
Exhaust Steam (Oil Bearing)	0.0015-0.002
Refrigerant Vapors (Oil Bearing)	0.002
Compressed Air	0.001
Ammonia Vapor	0.001

Fouling Resistances For Water

Temperature Of Heating Medium	Up To 240° F		240 to 400° F	
Temperature Of Water	125 ° F		Over 125° F	
	Water Velocity Ft/Sec		Water Velocity Ft/Sec	
	3 and Less	Over 3	3 and Less	Over 3
Sea Water	0.0005	0.0005	0.001	0.001
Brackish Water	0.002	0.001	0.003	0.002
Cooling Tower And Artificial Spray Pond:				
Treated Make Up	0.001	0.001	0.002	0.002
Untreated	0.003	0.003	0.005	0.004
City Or Well Water	0.001	0.001	0.002	0.002
River Water:				
Minimum	0.002	0.001	0.003	0.002
Average	0.003	0.002	0.004	0.003
Muddy Or Silty	0.003	0.002	0.004	0.003
Hard (Over 15 Grains/Gal.)	0.003	0.003	0.005	0.005
Engine Jacket	0.001	0.001	0.001	0.001
Distilled Or Closed Cycle				
Condensate	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
Treated Boiler Feedwater	0.001	0.0005	0.001	0.001
Boiler Blowdown	0.002	0.002	0.002	0.002

Tabla 39: Resistencias por ensuciamiento. Manual TEMA.

Se considera el gas pirolítico como un "gas manufacturado", al igual que otros procedentes del carbón, madera, aceites pirolíticos o petróleo. Si el factor de conversión para las unidades del factor de ensuciamiento son *1 m^2·K/W = 5,6779 h ft^2·F/Btu*, los valores de resistencias quedan:

$R''_{f(gas\ pirolítico)}$ = 0,01 h ft^2·F/Btu = $1{,}76 \cdot 10^{-3}$ m^2·K/W

$R''_{f(vapor)} = R''_{f(agua)}$ = 0,0005 h ft^2·F/Btu = $8{,}8 \cdot 10^{-5}$ m^2·K/W

- Conductividad térmica de la tubería (K): se emplea como material para las tuberías un acero inoxidable austenítico AISI 316.

Una empresa de ThyssenKrupp Steel

ThyssenKrupp Aceros y Servicios S.A.

Catálogo Comercial

Propiedades físicas

Densidad a 20°C kg/dm^3	Conductividad Térmica 20 °C W·m^{-1}·K^{-1}	Calor Específico 20°C J·kg^{-1}K^{-1}	Resistencia Eléctrica 20°C Ω·mm^2/m
7,98	15	500	0,75

Tabla 40: Propiedades físicas del acero AISI 316

ThyssenKrupp

Por tanto: K = 15 W/m·K

- Cálculo de los coeficientes de convección a ambos lados de la tubería (h_i y h_o): se calculará para ello el número de Nusselt, y luego con el diámetro y conductividad térmica de la tubería hallados previamente se despeja el coeficiente de convección:

1º. Coeficiente de convección en el lado exterior del tubo (h_o): el gas de pirólisis fluye exteriormente alrededor de los tubos. Se emplea la correlación de Churchill-Bernstein para un flujo cruzado externo a un cilindro, aplicable a un intervalo de $10^2 < Re_D < 10^7$ y válida para $Re_D \cdot Pr > 0,2$ (todas las propiedades evaluadas a temperatura de película):

$$\overline{Nu_D} = \frac{h_o \cdot D_{externo}}{K_{gas\ pirólisis}} = 0,3 + \frac{0,62 \cdot Re_D^{1/2} \cdot Pr^{1/3}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right)^{1/4}} \cdot \left(1 + \left(\frac{Re_D}{282.000}\right)^{5/8}\right)^{4/5}$$

Se necesita calcular Re_D, Pr y K_{gas}:

- Cálculo del Reynolds:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{W_m \cdot 4}{\mu \cdot \pi \cdot D_{ext}} = \frac{1821{,}8\ \frac{kg}{h} \cdot \frac{1\ h}{3600\ s} \cdot 4}{\mu \cdot \pi \cdot 19{,}05 \cdot 10^{-3}\ m}$$; se necesita la viscosidad.

El caudal másico corresponde a la suma de caudales de los componentes del gas de pirólisis que no se recirculan al reactor y van al intercambiador, y cuya suma puede hacerse con el esquema del balance de materia. Se va a calcular la viscosidad a la temperatura de película, es decir, una media de la temperatura de los gases de pirólisis a la entrada y la salida del intercambiador:

$$T_{película} = \frac{T_{entrada\ gases} + T_{salida\ gases}}{2} = \frac{740 + 375}{2} = 557{,}5^{\circ}\ C = 830{,}5\ K$$

Para hallar la viscosidad se toma como representativo el valor de la viscosidad del metano a esa temperatura ya que es el componente más abundante y el único del que se tiene datos para emplear la fórmula de Sutherland de la viscosidad:

$$\mu = C_1 \cdot \frac{T^{1,5}}{T + C_2} = 0{,}983 \cdot 10^{-6}\ \frac{kg}{s \cdot m \cdot K^{0,5}} \cdot \frac{(830{,}5\ K)^{1,5}}{830{,}5\ K + 155\ K} = 2{,}38 \cdot 10^{-5}\ \frac{kg}{m \cdot s}$$

Por tanto:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{W_m \cdot 4}{\mu \cdot \pi \cdot D_{ext}} = \frac{0{,}506\ {kg}/{s} \cdot 4}{2{,}38 \cdot 10^{-5}\ \frac{kg}{m \cdot s} \cdot \pi \cdot 19{,}05 \cdot 10^{-3}\ m} = 1.421.138{,}4 > 10^4\ (Rég.Turbulento)$$

- Cálculo de número de Prandtl y la conductividad térmica del fluido:

$$\overline{\mathrm{Pr}} = \frac{\overline{Cp} \cdot \overline{\mu}}{\overline{K}}$$

Los valores de Cp, μ y K son los valores promedio de los componentes del gas de pirólisis a la temperatura de película (830,5 K). Como se ha visto antes, el metano, eteno y benceno son los más abundantes, con un 30%, 25,2% y 24,3%. Entre los tres forman el 80% del gas, por lo que se van a contar las propiedades de estos tres gases como representativas del gas:

- Valores de Cp:

Benceno:

$$Cp = 74{,}06 + 32{,}95 \cdot 10^{-2} \cdot (557{,}5) = 0{,}258 \frac{kJ}{mol \cdot ^{o}C} \cdot \frac{1\,mol}{0{,}078\,kg} = 3{,}3 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Eteno:

$$Cp = 40{,}75 + 11{,}47 \cdot 10^{-2} \cdot (557{,}5) = 0{,}1047 \frac{kJ}{mol \cdot ^{o}C} \cdot \frac{1\,mol}{0{,}028\,kg} = 3{,}73 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Metano:

$$Cp = 34{,}31 + 5{,}469 \cdot 10^{-2} \cdot (557{,}5) = 0{,}0648 \frac{kJ}{mol \cdot ^{o}C} \cdot \frac{1\,mol}{0{,}016\,kg} = 4{,}05 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

- Valores de μ y K:

	K (W/m·K)		μ (Pa·s)	
	500K	600K	500K	600K
Benceno	0,0335	0,0524	$0{,}127 \cdot 10^{-4}$	$0{,}154 \cdot 10^{-4}$
Eteno	0,0491	0,0653	$0{,}162 \cdot 10^{-4}$	$0{,}187 \cdot 10^{-4}$
Metano	0,0671	0,0948	$0{,}170 \cdot 10^{-4}$	$0{,}195 \cdot 10^{-4}$

Tabla 41- Propiedades de gases a presión atmosférica. Manual Perry.

Los datos disponibles sólo son para 500 y 600 K, así que haciendo extrapolación a 830,5 K se obtienen los valores

buscados y junto con el Cp ya se pueden hallar los números de Pr de cada componente, y luego se hará un promedio para el gas:

830,5 K (557,5º C)	**K (W/m·K)**	**μ (Pa·s)**	**Pr**
Benceno	0,096	$2{,}16 \cdot 10^{-5}$	0,743
Eteno	0,113	$2{,}44 \cdot 10^{-5}$	0,805
Metano	0,141	$2{,}43 \cdot 10^{-5}$	0,698

Tabla 42- Propiedades de los gases extrapoladas a 830,5 K.

Como puede verse, el valor de viscosidad calculado por Sutherland a la temperatura de película y usando el metano como referencia ofrece un valor muy similar a la media del gas viendo los demás componentes. Para ver la contribución de cada uno se supone que los tres componentes son los únicos de la mezcla:

Compuesto	**Composición total (%)**	**Composición relativa (%)**
Benceno	24,3	30,6
Eteno	25,2	31,7
Metano	30	37,7
	Σ=79,5	Σ =100

Por tanto:

$$\overline{\mathrm{Pr}} = 0{,}306 \cdot 0{,}743 + 0{,}317 \cdot 0{,}805 + 0{,}377 \cdot 0{,}698 = 0{,}746$$

$$\overline{K_{gas}} = 0{,}306 \cdot 0{,}096 + 0{,}317 \cdot 0{,}113 + 0{,}377 \cdot 0{,}141 = 0{,}1183 \, {}^{W}\!/_{m \cdot K}$$

Recordando las condiciones de la ecuación de Churchill-Bernstein para el coeficiente de convección, $10^2 < Re_D < 10^7$ y $Re_D \cdot Pr > 0{,}2$; se comprueba que se cumple:

$10^2 < 1.421.138{,}4 < 10^7$

$1.421.138{,}4 \cdot 0{,}746 = 1.060.169{,}25 > 0{,}2$

Ya se puede calcular por tanto el valor del coeficiente de convección en el lado exterior del tubo:

$$\frac{h_o \cdot 19{,}05 \cdot 10^{-3} m}{0{,}1183 \, {}^{W}\!/_{m \cdot K}} = 0{,}3 + \frac{0{,}62 \cdot (1.421.138{,}4)^{1/2} \cdot 0{,}746^{1/3}}{\left(1 + \left({}^{0{,}4}\!/_{0{,}746}\right)^{2/3}\right)^{1/4}} \cdot \left(1 + \left(\frac{1.421.138{,}4}{282.000}\right)^{5/8}\right)^{4/5}$$

; $h_o = 10.554{,}89 \, {}^{W}\!/_{m^2 \cdot K}$

2º. Cálculo del coeficiente de convección en el lado interior del tubo (h_i): el agua fluye por el interior de los tubos, donde se calienta y vaporiza. En este caso el coeficiente de transmisión de calor es fruto de diferentes contribuciones, y se han desarrollado diferentes modelos para su estimación. Uno de los más conocidos y que mejor se ajustan para la ebullición totalmente desarrollada en convección forzada es el modelo de Chen (Chen, 1966). Como otros de su tipo, supone que el mecanismo de ebullición que prevalece es el de la nucleación. Su correlación para el coeficiente de transferencia de calor en ebullición está compuesta por dos contribuciones aditivas, la de la convección forzada del fluido y la de la evaporación de éste:

$$h_i = h_{convección\ fluido} + h_{evaporación} = h_{CF} + h_E$$

- Contribución por convección forzada a una sola fase (h_{CF}).

$\overline{Nu_D} = \frac{h_{CF} \cdot D_{\text{int}\,erno}}{K_{agua}}$; se necesita Nu_D y K_{agua} :

Es un flujo interno al circular por el interior de una tubería, por lo que para hallar el número de Nu hay que averiguar los perfiles de

velocidad y temperatura a la entrada para utilizar una correlación de convección adecuada. Antes, hay que conocer el régimen de circulación del fluido:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{W_m \cdot 4}{\mu \cdot \pi \cdot D_{\mathrm{int}}} = \frac{0{,}258\ {}^{kg}\!/_{s} \cdot 4}{\mu \cdot \pi \cdot 14{,}83 \cdot 10^{-3}\ m} \rightarrow$$ se desconoce la μ.

En este caso, todas las propiedades se miden a una temperatura constante de superficie de pared, que es la media entre las temperaturas de entrada y salida del agua en el intercambiador:

$$T_m = \frac{T_{m,\,entrada\ tubo} + T_{m,\,salida\ tubo}}{2} = \frac{25+170}{2} = 97{,}5^{\circ}\,C$$

Con lo cual, la viscosidad del agua a 97,5º C:

AGUA

Temperatur ºC	Densidad ρ (Kg/m³)	Calor específico c_p J/KgºC	Conductiv. térmica "k" W/mºC	Dif. térmica $\alpha.10^6$ (m²/seg)	Visc. dinám. $\eta.10^6$ N.seg/m²	Visc. cinem. $\nu.10^6$ (m²/seg)	Nº de Prandt Pr
0	999,9	4226	0,558	0,131	1794	1,789	13,7
20	998,2	4182	0,597	0,143	1004	1,006	7,02
40	992,3	4178	0,633	0,151	653,0	0,658	4,34
60	983,2	4181	0,658	0,155	470,0	0,478	3,02
80	971,8	4194	0,673	0,165	353,7	0,364	2,22
100	958,4	4211	0,682	0,169	281,0	0,294	1,75
120	943,1	4245	0,685	0,171	233,0	0,247	1,45
140	926,1	4279	0,687	0,172	198,2	0,214	1,24
160	907,6	4338	0,682	0,173	171,5	0,189	1,10

Tabla 43 - Propiedades del agua a diferentes temperaturas.

www.fi.uba.ar/materias/6731/Tablas/Tabla9.pdf

Por interpolación se obtiene un valor de viscosidad a 97,5º C de $289 \cdot 10^{-6}$ Kg/m·s. Sustituyendo en Reynolds:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{W_m \cdot 4}{\mu \cdot \pi \cdot D_{\mathrm{int}}} = \frac{0{,}258\ {}^{kg}\!/_{s} \cdot 4}{289 \cdot 10^{-6}\ \frac{kg}{m \cdot s} \cdot \pi \cdot 14{,}83 \cdot 10^{-3}\ m} = 76.646{,}23 > 10^4\ \ (Rég.\,Turbulento)$$

Por tanto, el perfil de velocidad y temperatura a la entrada del tubo en régimen turbulento se calcula con la siguiente fórmula para longitudes de entrada hidrodinámica y térmica:

$$X_{h,turbulento} = X_{t,turbulento} = 10 \cdot D = 10 \cdot 14{,}83 \cdot 10^{-3} m = 14{,}83 \cdot 10^{-2} m$$

Suponiendo que esta longitud va a ser mucho menor que la longitud de la tubería, se considera que los perfiles tienen condición completamente desarrollada, y por tanto es aplicable la ecuación de Dittus-Boelter para *convección forzada de fluidos en calentamiento que circulan en flujo turbulento por el interior de tubos*. La ecuación es válida para Re > 7.000 y 0,7 < Pr < 700. El Re calculado previamente es mucho mayor, y por la tabla de las propiedades del agua interpolando a 97,5º C se obtiene un Pr de 1,8. Por lo tanto es válida:

$$Nu_D = 0{,}023 \cdot \mathrm{Re}_D^{\,0,8} \cdot \mathrm{Pr}^{0,4} = 0{,}023 \cdot (76.646{,}23)^{0,8} \cdot (1{,}8)^{0,4} = 235{,}19\,,$$

luego:

$$\overline{Nu_D} = \frac{h_{CF} \cdot D_{interno}}{K_{agua}} \rightarrow 235{,}19 = \frac{h_{CF} \cdot 14{,}83 \cdot 10^{-3} m}{0{,}679\ W/m \cdot K} \rightarrow$$

$$\rightarrow \quad h_{CF} = 10.768{,}57 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

- Contribución por convección producida por la evaporación del agua (h_E): se emplea la ecuación de Forster-Zuber, cuyas propiedades se miden a la temperatura de saturación del agua, que en este caso al estar a 5 atmósferas es de 151,9º C:

$$h_E = 0{,}00122 \cdot \frac{K_l^{0,79} \cdot Cp_l^{0,45} \cdot \rho_l^{0,49}}{\sigma^{0,5} \cdot \mu_l^{0,29} \cdot h_{lg}^{0,24} \cdot \rho_v^{0,24}} \cdot \Delta T_{sat}^{0,24} \cdot \Delta P_{sat}^{0,75} \cdot S\ ;$$

Donde:

K_l: conductividad térmica del agua a 152º C = 0,6865 W/m·K

Cp_l: calor específico del agua a 152º C = 4.305 J/kg·K

ρ_l: densidad del agua a 152º C = 915,24 kg/m^3

μ_l: viscosidad del agua a 152º C = 183·10^{-6} kg/m·s

h_{lg}: entalpía de vaporización del agua a 5 atm = 2.108,5 kJ/kg

ρ_v: densidad del vapor a 152º C y 5 atm. = 2,67 kg/m^3

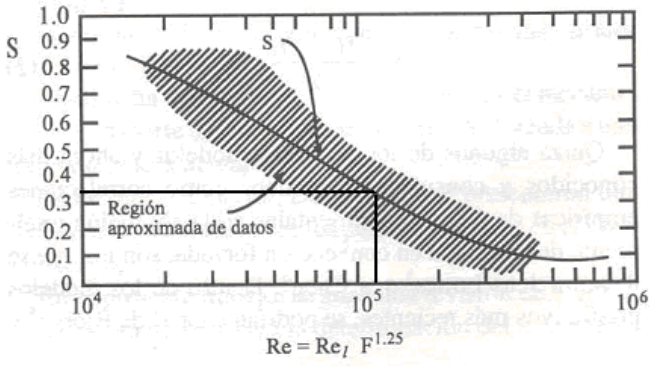
ΔT_{sat}: sobrecalentamiento = $T_{pel.} - T_{sat}$ = 557,5 – 152 = 405,5 º C

ΔP_{sat}:

$$\frac{\Delta T_{sat}\cdot h_{lg}}{T_{sat}\cdot\left(\frac{1}{\rho_v}-\frac{1}{\rho_l}\right)}=\frac{405{,}5^{o}\,C\cdot 2.108{,}5\cdot 10^{3}\ J/kg}{152^{o}\,C\cdot\left(\frac{1}{2{,}67}-\frac{1}{915{,}24}\right)\frac{m^3}{kg}}=15.062.634{,}65\frac{J}{m^3}=$$

$$=15.062.634{,}65\frac{N}{m^2}$$

S: factor empírico de supresión de la ebullición, determinado experimentalmente:



Gráfica 21 – Factor de supresión frente al Reynolds.

F es otro factor empírico modificador de Reynolds. Para este caso, con agua subenfriada (Valle et al. 1993) equivale a la unidad, con lo cual el Reynolds es el del líquido saturado:

$$\mathrm{Re} = \mathrm{Re}_l = \frac{Wm \cdot 4}{\mu_l \cdot \pi \cdot D_{\mathrm{int}}} = \frac{0{,}258\ {}^{kg}\!/_{s} \cdot 4}{183 \cdot 10^{-6}\ \frac{kg}{m \cdot s} \cdot \pi \cdot 14{,}83 \cdot 10^{-3}\ m} =$$

$$= 121.042{,}42 = 1{,}21 \cdot 10^{+5}$$

Con lo cual: S= 0,34.

σ: tensión superficial agua-vapor a 152º C (425 K) = 0,04835 N/m.

Temperature (K)	Surface Tension (mN/m)
275	75.39
298	**72.00**
300	71.69
310	**70.11**
325	67.63
350	63.25
375	58.56
400	53.58
425	48.35

Tabla 44 - Tensión superficial interfase líquida agua-vapor a presión de saturación. NIST.

		Volumen especifico		Energía interna		Entalpía			Entropía	
		m^3 / kg		kJ / kg		kJ / kg			kJ / kg , K	
		Liquido	Vapor	Liquido	Vapor	Liquido	Vapor	Vapor	Liquido	Vapor
Presión	Temp,	sat,	sat,	sat,	sat,	sat,	vaporiz,	sat,	sat,	sat,
bar	ºC	$v_f \times 10^3$	v_g	u_f	U_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
0,04	28,96	1,0040	34,800	121,45	2415,2	121,46	2432,9	2554,4	0,4226	8,4746
0,06	36,16	1,0064	23,739	151,53	2425,0	151,53	2415,9	2567,4	0,5210	8,3304
0,08	41,51	1,0084	18,103	173,87	2432,2	173,88	2403,1	2577,0	0,5926	8,2287
0,10	45,81	1,0102	14,674	191,82	2437,9	191,83	2392,8	2584,7	0,6493	8,1502
0,20	60,06	1,0172	7,649	251,38	2456,7	251,40	2358,3	2609,7	0,8320	7,9085
0,30	69,10	1,0223	5,229	289,20	2468,4	289,23	2336,1	2625,3	0,9439	7,7686
0,40	75,87	1,0265	3,993	317,53	2477,0	317,58	2319,2	2636,8	1,0259	7,6700
0,50	81,33	1,0300	3,240	340,44	2483,9	340,49	2305,4	2645,9	1,0910	7,5939
0,60	85,94	1,0331	2,732	359,79	2489,6	359,86	2293,6	2653,5	1,1453	7,5320
0,70	89,95	1,0360	2,365	376,63	2494,5	376,70	2283,3	2660,0	1,1919	7,4797
0,80	93,50	1,0380	2,087	391,58	2498,8	391,66	2274,1	2665,8	1,2329	7,4346
0,90	96,71	1,0410	1,869	405,06	2502,6	405,15	2265,7	2670,9	1,2695	7,3949
1,00	99,63	1,0432	1,694	417,36	2506,1	417,46	2258,0	2675,5	1,3026	7,3594
1,50	111,4	1,0528	1,159	466,94	2519,7	467,11	2226,5	2693,6	1,4336	7,2233
2,00	120,2	1,0605	0,8857	504,49	2529,5	504,70	2201,9	2706,7	1,5301	7,1271
2,50	127,4	1,0672	0,7187	535,10	2537,2	535,37	2181,5	2716,9	1,6072	7,0527
3,00	133,6	1,0732	0,6058	561,15	2543,6	561,47	2163,8	2725,3	1,6718	6,9919
3,50	138,9	1,0786	0,5243	583,95	2546,9	584,33	2148,1	2732,4	1,7275	6,9405
4,00	143,6	1,0836	0,4625	604,31	2553,6	604,74	2133,8	2738,6	1,7766	6,8959
4,50	147,9	1,0882	0,4140	622,25	2557,6	623,25	2120,7	2743,9	1,8207	6,8565
5,00	151,9	1,0926	0,3749	639,68	2561,2	640,23	2108,5	2748,7	1,8607	6,8212
6,00	158,9	1,1006	0,3157	669,90	2567,4	670,56	2086,3	2756,8	1,9312	6,7600

Tabla 45 - Propiedades del agua saturada (líquido-vapor). Tabla de presiones.

Ya se puede sustituir los valores en la ecuación de Forster-Zuber:

$$h_E = 0{,}00122 \cdot \frac{K_l^{0,79} \cdot Cp_l^{0,45} \cdot \rho_l^{0,49}}{\sigma^{0,5} \cdot \mu_l^{0,29} \cdot h_{lg}^{0,24} \cdot \rho_v^{0,24}} \cdot \Delta T_{sat}^{0,24} \cdot \Delta P_{sat}^{0,75} \cdot S =$$

$$= 0{,}00122 \cdot \frac{\left(0{,}6865\ {}^{W}\!/_{m \cdot K}\right)^{0,79} \cdot \left(4.305\ {}^{J}\!/_{kg \cdot K}\right)^{0,45} \cdot \left(915{,}24\ {}^{kg}\!/_{m^3}\right)^{0,49}}{\left(0{,}04835 \frac{N}{m}\right)^{0,5} \cdot \left(183 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{m \cdot s}\right)^{0,29} \cdot \left(2.108{,}5 \cdot 10^3 \frac{J}{kg}\right)^{0,24} \cdot \left(2{,}67 \frac{kg}{m^3}\right)^{0,24}} \cdot$$

$$\cdot (405{,}5\ K)^{0,24} \cdot (15.062.634{,}65)^{0,75} \cdot 0{,}34 = 508.326{,}71 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Por tanto:

$$h_i = h_{CF} + h_E = 10.768{,}57 \frac{W}{m^2 \cdot K} + 508.326{,}71 \frac{W}{m^2 \cdot K} = 519.095{,}28 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Ya se puede calcular el Coeficiente global de transmisión de calor:

$$\frac{1}{U \cdot D_o} = \frac{1}{h_i \cdot D_i} + \frac{R_{fi}}{D_i} + \frac{Ln\left({}^{r_o}\!/_{r_i}\right)}{2 \cdot K} + \frac{R_{fo}}{D_o} + \frac{1}{h_o \cdot D_o};$$

$$\frac{1}{U \cdot 19{,}05 \cdot 10^{-3} m} = \frac{1}{519.095{,}28 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 14{,}83 \cdot 10^{-3} m} + \frac{8{,}8 \cdot 10^{-5}\ m^2 \cdot {K}/{W}}{14{,}83 \cdot 10^{-3} m} +$$

$$+ \frac{Ln\left({}^{19{,}05 \cdot 10^{-3} m}\!/_{14{,}83 \cdot 10^{-3} m}\right)}{2 \cdot 15 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{1{,}76 \cdot 10^{-3}\ m^2 \cdot {K}/{W}}{19{,}05 \cdot 10^{-3} m} + \frac{1}{10.554{,}89 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 19{,}05 \cdot 10^{-3} m};$$

$$\frac{1}{U \cdot 19{,}05 \cdot 10^{-3} m} = 1{,}299 \cdot 10^{-4} \frac{m \cdot K}{W} + 5{,}934 \cdot 10^{-3} \frac{m \cdot K}{W} + 8{,}347 \cdot 10^{-3} \frac{m \cdot K}{W} + 0{,}0924 \frac{m \cdot K}{W} +$$

$$+ 4{,}973 \cdot 10^{-3} \frac{m \cdot K}{W};$$

$$; U = 469{,}6 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Ya se han calculado todos los parámetros de la ecuación de transmisión de calor, por lo que puede despejarse la superficie de intercambio:

$$q = U \cdot A \cdot F \cdot \Delta T_{ml};$$

$$693{,}26 \cdot 10^3 \text{ W} = 469{,}6 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot A \cdot 0{,}97 \cdot 451{,}1\, K; \qquad A = 3{,}37\ m^2 = 36{,}27\ ft^2$$

Resumiendo todos los parámetros impuestos y calculados:

O.D. tubos	14,83 mm.
O.I. tubos	19,05 mm.
Espesor tubos	2,108 mm.
Presión tubos	5 bar
Presión carcasa	1 bar
Temperatura tubos	97,5º C
Temperatura carcasa	557,5º C
Coeficiente global intercambio	469,6 W/m·K
Calor intercambiado	693,26 kW
Área intercambio	3,37 m^2

Tabla 46- Resumen de parámetros de diseño del intercambiador.

ANEXO B:

ESTUDIO DE MERCADO

Indice:

B.1. Existencia de un mercado de residuos plásticos en Andalucía….pág. 1

B.2. Análisis de la competencia

B.2.1. Competencia por la adquisición de materia prima…….pág. 10

B.2.2. Competencia por la venta de productos……..pág. 14

B.3. Zonas de acopio de residuos plásticos…….....pág. 14

B.4. Análisis de clientes potenciales…….pág. 16

B.4.1. Zona industrial del área metropolitana de Huelva…….pág. 17

B.4.2. Zona industrial del área metropolitana de Sevilla…….pág. 17

B.4.3. Zona industrial del Campo de Gibraltar……..pág. 18

B.1. Existencia de un mercado de residuos plásticos en Andalucía:

Cuando los materiales plásticos finalizan su ciclo de vida pasan a convertirse en residuos. En el caso del sector de envases y embalajes (el de mayor distribución del plástico), en un tiempo de vida muy corto todo el material plástico termina por transformarse rápidamente en un deshecho.

Es lógico pensar que el constante incremento en el consumo de materiales plásticos genere paralelamente un aumento paralelo de sus residuos, los cuales, por su elevado valor energético y por su capacidad de impacto ambiental, han sido reciclados también en mayores cantidades cada año.

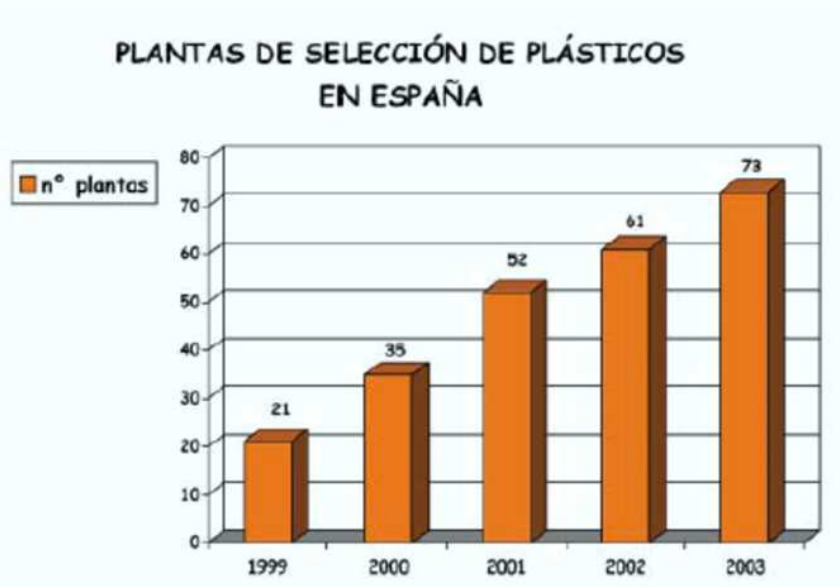
Gráfica 22 - Evolución del reciclado de plásticos en España. Cicloplast.

Dicho incremento en el reciclaje de residuos plásticos se debió sobre todo por el inicio de los Sistemas Integrados de Gestión (SIG) iniciados en 1998 a través de la Ley 11/1997 de envases y residuos en envases, ley traspuesta de la Directiva Europea 94/62/CE por la que "*los Estados Miembros deben adoptar medidas para evitar la formación de residuos de envases e impulsar los*

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

sistemas de reutilización de envases y deben establecer sistemas de devolución, recogida y recuperación con objeto de alcanzar objetivos cuantitativos". Implicó la instalación de contenedores específicos para residuos de envases y dio pie al comienzo del reciclaje de residuos plásticos en España.

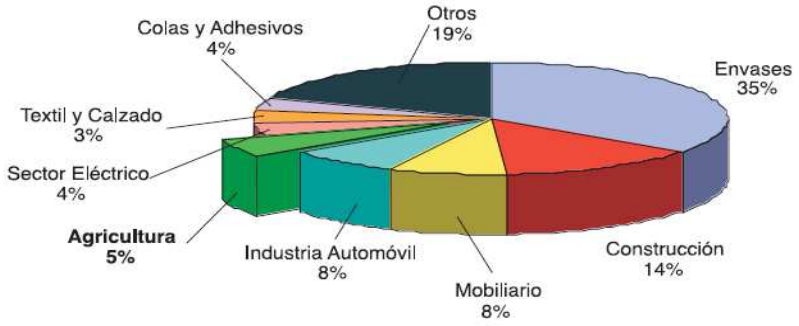
Este hecho a su vez provocó la puesta en marcha de plantas de selección de residuos plásticos, ya que ahí es donde se valorizan mediante su separación del resto de fracciones de los RSU y su disposición en palets.



Gráfica 23 - Número anual de plantas de selección de plásticos. Cicloplast.

De esta forma, en 2009 había ya en España 94 plantas de selección de plásticos (40 automatizadas) y 37 recicladores de plásticos homologados (reciclaje mecánico). Según datos de Cicloplast del año 2007, se recogieron 526.000 toneladas de plásticos de los cuales un 60% eran PEAD y PEBD. Estos tipos son los de mayor consumo de plásticos y los de mayor reciclaje.

De todos los sectores de la sociedad que generan residuos plásticos, los sectores de Envases y Agricultura son los que tienen mayores índices de reciclado debido al gran volumen de consumo del plástico que emplean, el corto ciclo de vida que tienen, y la homogeneidad de los residuos generados, lo cual facilita su valorización.



Gráfica 24 - Distribución de consumo de materiales plásticos en España según sector. Cicloplast.

- Sector de plásticos de Envases: los plásticos de envases y embalajes suman el mayor porcentaje del total de los plásticos consumidos en España, y por ello y gracias a los SIG representan la mayor fracción del plástico reciclado. Estos datos se repiten en todos los países desarrollados, donde suponen el 40% del consumo total de plásticos.

Año	Envases de plástico reciclado (ton)	% del total reciclado
2005	185.519	25´90%
2006	223.251	29`90%
2007	252.673	32´50%
2008	289.823	38`40%
2009	306.941	41`90%

Tabla 47 – Datos del reciclaje de envases de plástico en España. Ecoembes.

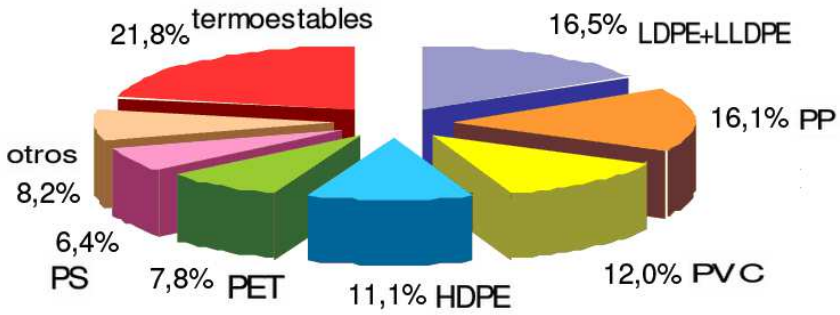
Según el 8º Informe Anual de *Cicloplast* titulado "Estadísticas sobre Consumo, Generación y Gestión de Plásticos en España, año 2003", el plástico de mayor consumo en España es el polietileno (entre el PEAD y el PEBD suman el 32% de la composición de los residuos plásticos) y es líder en términos de reciclado mecánico. El polietileno de alta y baja densidad representa el 71,4% del total del plástico reciclado en España.

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

Siglas	Código reciclaje	Nombre y principales usos	Composición de los residuos plásticos
PET	1	***Tereftalato de polietileno.*** Botellas de bebidas y bandejas para microondas.	5%
HDPE	2	***Polietileno de alta densidad.*** Botellas para leche y de líquidos de limpieza.	13%
PVC	3	***Cloruro de polivinilo.*** Bandejas de comida, film transparente, botellas para agua mineral y champús.	14%
LDPE	4	***Polietileno de baja densidad.*** Bolsas de plástico y basura.	19%
PP	5	***Polipropileno.*** Envases margarinas y bandejas para microondas.	15%
PS	6	***Poliestireno.*** Botes de yogur, bandejas de espuma para carnes y pescados, cajas de hamburguesas, envases de huevos, cubertería de plástico, envases protectores de equipos electrónicos y juguetes.	6%
OTROS	7	***Termoplásticos.***	12%
		Termoestables.	16%

Tabla 48 - Tipos de plásticos más comunes y composición en RSU. Fuente: Tesis Deseada Berenguer Muñoz.

En el resto de Europa, la tendencia es similar respecto al polietileno:



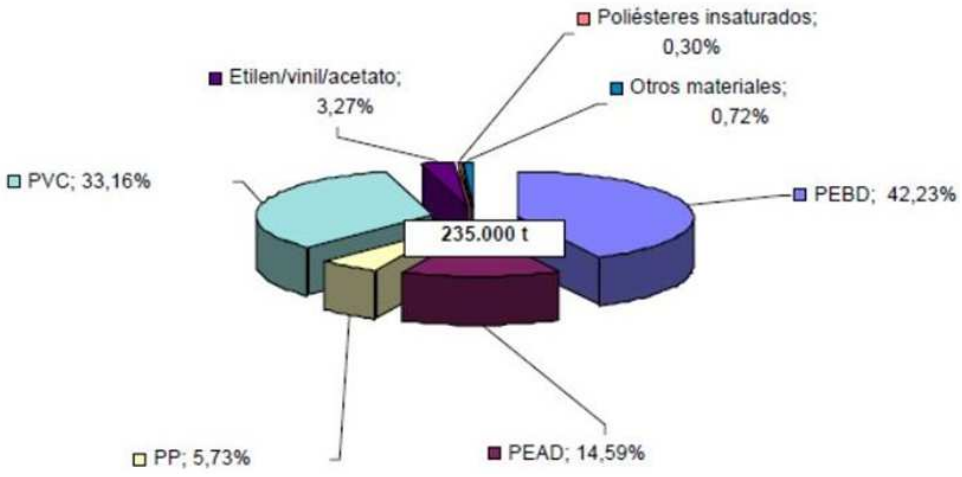
Gráfica 25 - Distribución consumo plástico por tipo (en % de peso) en la UE15, Noruega y Suiza (APME, 2004).

- Sector de plásticos de uso agrícola (PUA): el empleo de los plásticos en la agricultura ha logrado convertir zonas aparentemente improductivas en modernas áreas agrícolas. Usando láminas de plástico para las técnicas de acolchado, tunelillo e invernadero se consigue proteger los cultivos y el suelo de la acción de los agentes atmosféricos. También existen otros tipos

de plásticos agrícolas, como las mallas mosquiteras, tuberías, goteros, envases, cajas de almacenamiento y recogida, etc.

Imagen 6 – Empleo de las técnicas de acolchado y tunelillo en cultivos.

Por tipo de plásticos empleados, la distribución del consumo en la agricultura también presenta una mayoría de utilización del polietileno, con un 54% (PEAD y filmes de PEBD) y el PVC con un 36%. Además, las reformas en los sistemas españoles de cultivo para aumentar su rendimiento y equipararlo a la media europea conllevan el incremento del uso del plástico.



Gráfica 26 - Distribución del consumo de plásticos por el sector de la agricultura. Cicloplast.

El uso de los PUAs en cultivo protegido hace que inevitablemente se generen residuos de aquellos que son desechados (RPUAs). Las

estimaciones de generación y reciclaje en el 2006 en España se resumen en la siguiente tabla:

Datos estimados de generación y reciclaje de RPUA (ton/año) - 2006

	PUA	RPUA generados	RPUA reciclados
Acolchado	37.000	29.600	8.000 (27%)
Tunelillo	6.450	5.000	5.000 (100%)
Invernaderos	51.000	40.800	37.000 (90%)
Total cultivo protegido	94.450	75.400	50.000 (66%)

Tabla 56 - Datos estimados de generación y reciclaje RPUA. Fuente: ANAIP Y CICLOAGRO

No todo los PUA desechados son susceptibles de ser reciclados (mecánicamente, pues necesita unas condiciones de calidad), se estima que el porcentaje es como mucho del 80% dada la degradación del mismo, pero aún así de la tabla se deduce que el porcentaje de reciclado de los plásticos agrícolas es bastante elevado, gracias a las campañas de limpieza y sensibilización de los agricultores, así como la promulgación de ordenanzas municipales prohibiendo la quema incontrolada o abandono de estos residuos.

Para situar en datos a Andalucía en España, en la siguiente tabla se muestra la cantidad de plástico de uso agrícola tipo “film” consumido durante el 2003 en las CCAA:

PUA: FILMES/LAMINAS EN CULTIVO PROTEGIDO (toneladas)

PUA	ACOLCHADO	TUNELILLO	INVERNADERO	TOTAL
ANDALUCIA	26.320	3.967	34.203	64.491
ARAGON	0	3	0	3
ASTURIAS	0	0	0	0
BALEARES	283	0	122	405
CANARIAS	0	0	7.533	7.533
CANTABRIA	0	0	0	0
CAST. LA MANCHA	2.484	47	0	2.531
CAST Y LEON	0	27	0	27
CATALUÑA	366	71	688	1.125
EXTREMADURA	1.644	0	0	1.644
GALICIA	90	5	500	595
MADRID	0	179	0	179

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

MURCIA	2.900	0	5.162	8.062
NAVARRA	1.513	0	177	1.690
LA RIOJA	171	0	0	171
COM. VALENCIANA	1.302	1.831	2.588	5.721
PAIS VASCO	0	86	0	86
TOTAL	**37.072**	**6.215**	**50.974**	**94.262**

Tabla 57 - Plásticos de uso agrario en 2003. Cicloagro.

Como puede observarse, Andalucía es la Comunidad Autónoma de España con mayor consumo de plásticos en agricultura (un 68% del total), con un claro predominio del cultivo bajo plástico en su sector primario, cifrándose este consumo en 58.200 toneladas en el año 2008. Este hecho la convierte en la región con mayor preocupación en gestionar adecuadamente los residuos procedentes de la actividad agrícola intensiva.

Dentro de Andalucía, se pueden situar las principales áreas generadoras de residuos plásticos por provincias (en hectáreas):

	Hortícolas protegidas	**Flor bajo plástico**	**Fresa**	**Algodón**	**TOTAL PROVINCIA**
Almería	38.966	119	-	-	39.085
Cádiz	249	570	12	13.899	14.730
Córdoba	391	88	21	11.008	11.508
Granada	2.535	100	20		2.655
Huelva	7.498	69	7.104	846	15.517
Jaén	-	85	40	5.948	6.073
Málaga	1.787	188	5	107	2.087
Sevilla	95	237	30	53.500	53.862
TOTAL CULTIVO	51.521	1.456	7.232	95.507	155.716

Tabla 58 - Principales producciones agrícolas generadoras de residuos plásticos (ha).

Las provincias occidentales de Sevilla, Cádiz y Huelva suman un 54% del total de superficie de cultivo cubierta por plástico, por lo que es una zona de alta generación de RPUA en España, por lo que presenta un mayor interés de cara a la instalación de una planta que los gestione junto con los

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

residuos de envase. La siguiente zona más interesante en Andalucía está en la zona oriental, en Almería, con un 25% del total por sí sola, por lo que sería conveniente evaluar más adelante un posible transporte de RPUA desde allí o la propia instalación de una planta similar. Más cerca en Córdoba, con un 7% del total, es otra zona interesante para extender el mercado tras comenzar la actividad.

Hoy en día el mercado de los RPUA está ocupado por las plantas de tratamiento de estos residuos a través del reciclaje mecánico. Las plantas existentes en España y sus capacidades de tratamiento son:

RECICLADORES DE PLASTICO AGRICOLA EN ESPAÑA

Planta	Comunidad Autónoma	Capacidad (t/a)
EGMASA-Los Palacios (Sevilla)	Andalucía	10.000
DENPLAX-El Ejido (Almería)	Andalucía	20.000
BEFESA-Alhama de Murcia (Murcia)	Murcia	18.000
GENTPLAST-Don Benito (Badajoz)	Extremadura	10.000
Otros recicladores	Andalucía y Murcia principalmente, así como otras CCAA en las que se producen RPUA	15.000
TOTAL CAPACIDAD INSTALADA EN ESPAÑA:		73000

Tabla 49 - Recicladores de plástico en España. Cicloplast.

Andalucía es pionera, con la construcción de dos plantas para el tratamiento de los plásticos y su reciclaje mecánico para la obtención de productos reciclados; una situada en Los Palacios (Sevilla) y la otra en El Ejido (Almería).

Un factor que influyó decisivamente para que se pudieran obtener estos datos tan positivos de gestión en Andalucía fue el *Decreto 104/2000*, que regula la gestión de los plásticos agrícolas de invernaderos y cultivos protegidos. Su objetivo es promover y mejorar la recogida, transporte,

reciclaje y eliminación de estos residuos y además de su manejo y los lugares donde se depositan, para evitar que se produzcan abandonos o incineración incontrolada de los plásticos agrícolas. Para ello se han habilitado una serie de “puntos limpios” por toda la comunidad, donde los agricultores pueden depositarlos.

Además de eso, la Consejería de Medio Ambiente ha firmado acuerdos de colaboración para apoyar la gestión de los plásticos usados, gestión que corresponde según la Ley 7/98 Reguladora de las Bases de Régimen Local a los Municipios.

Convenio	Agentes	Acuerdos	Fecha
Acuerdo de Colaboración para el Tratamiento de Residuos plásticos agrícolas en el Litoral Almeriense	- Agencia de Medio Ambiente - Ayuntamientos Litoral Almeriense - Fundación de plásticos para la Protección del Medio Ambiente - EGMASA	- Campañas de información y limpieza - Proyecto de valorización energética - Elaboración de ordenanza municipales	6-5-1993
Convenio de cooperación en materia de actividades relacionadas con la gestión de plásticos usados en la agricultura	- Exma. Diputación de Huelva - Agencia de Medio Ambiente	- Creación de centros de almacenamientos para plásticos. - Posibilitar el traslado y preselección de los plásticos reciclables - Campañas concienciación	16-12-1994
Convenio para la realización de una experiencia piloto destinada a establecer las bases para la recogida y tratamiento de plásticos de la actividad agrícola.	- Exma. Diputación Provincial de Sevilla - Mancomunidad de Municipios del Bajo Guadalquivir	- Experiencia recogida y tratamiento de plásticos en los municipios de Utrera, Los Palacios y Villafranca, Los Molares, El Coronil, Las Cabezas de San Juan, Lebrija y el Cuervo	26-2-1999
Convenio en materia de Gestión de plásticos usados	- Mancomunidad Municipios del Bajo Guadalquivir - Consejería de Medio Ambiente	- Coordinar la gestión de los plásticos usados y preseleccionar los reciclables - Campañas concienciación - Plan de recogida de choque durante 1998	16-12-1998

Tabla 50 - Acuerdos de colaboración firmados por la Consejería Medio Ambiente. Junta Andalucía.

B.2. Análisis de la competencia:

B.2.1. Competencia por la adquisición de materia prima:

El mayor competidor por la materia prima es sin duda el sector del reciclado mecánico, con años de adelanto en instalaciones comerciales y una capacidad de reciclaje del 20% del total de residuos plásticos generados. Además, tiene considerable implantación en Andalucía en el contexto nacional.

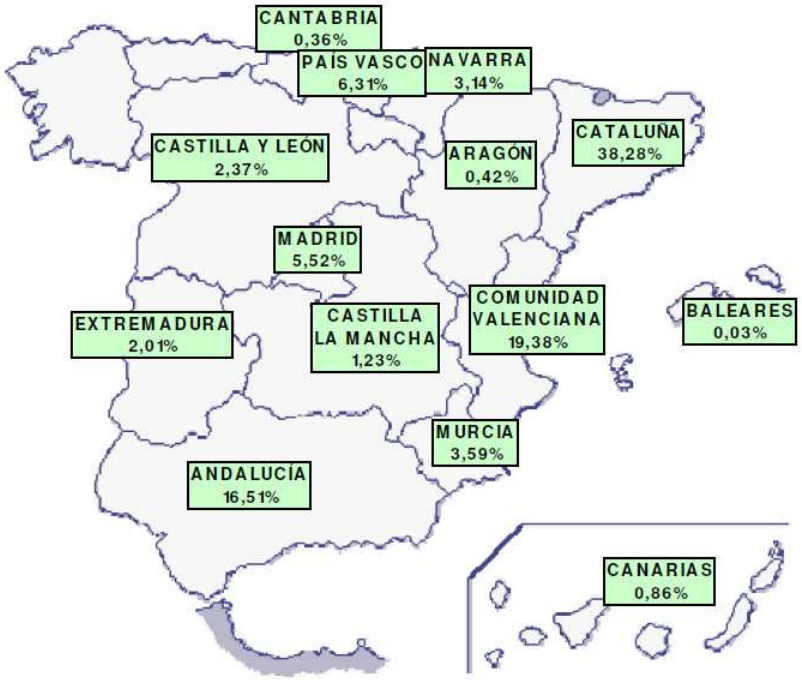
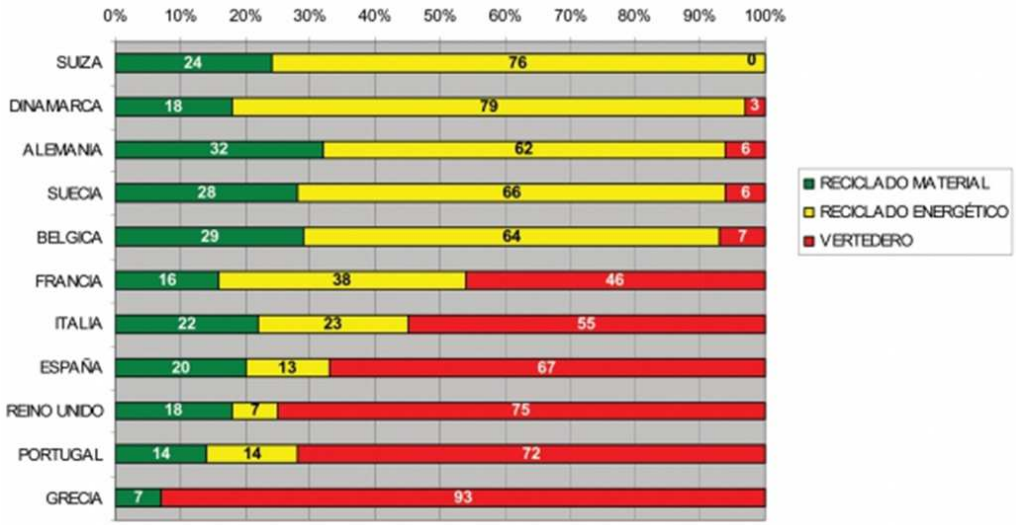


Figura 71 - Distribución del reciclaje mecánico de plásticos en España por CC.AA. en 2006. CICLOPLAST

El reciclaje mecánico es actualmente el único que existe en Andalucía y el resto de España, y se emplea sobre todo para la obtención de una granza de plástico con una calidad que pretende ser similar al plástico virgen. Pero hoy día, aproximadamente el 25% del plástico film agrícola no puede ser reciclado mecánicamente debido a los altos niveles de degradación o contaminación. La recuperación energética de plástico de polietileno urbano y usado en invernaderos puede ser un complemento al reciclado mecánico para un enfoque integrado de gestión de residuos, ya que aunque que ambas

actividades se nutren del mismo tipo de materia prima, ofrecen productos totalmente diferentes.

Las empresas de incineración de residuos con recuperación energética sí pueden adquirir residuos plásticos degradados (13% del total de residuos plásticos generados), pero bajo el amparo la normativa de residuos este tipo de gestión está por debajo en la jerarquización de operaciones de gestión de residuos y además en Andalucía no existen plantas de incineración. Lamentablemente, en la actualidad todavía el depósito en vertedero de los residuos plásticos ocupa la mayor parte del destino de los residuos plásticos en España (67% del total), con la consecuente pérdida de una materia prima de alto contenido energético que tardará muchos años en desaparecer.



Gráfica 27 – Distribución de formas de gestión de residuos en la U.E. Informe PlasticsEurope, EUPC, EUPr, EPRO. 2008.

En España el reciclado mecánico se halla en un estado más evolucionado que el energético, aunque en los países del norte de Europa la tendencia es a la inversa.

Para la adquisición de la materia prima en el caso de los envases de plástico, la empresa gestora es ECOEMBES, la cual controla la homologación de los recicladores que operan con los residuos de plásticos domiciliarios.

Actualmente, las empresas que operan a nivel nacional en el reciclaje mecánico de plásticos se observan en la siguiente tabla:

RECICLADORES	PET	PEAD	FILM (PEBD)	PLÁSTICO MEZCLA
EXTREMADURA TORRE PET S.L.	X			
IPARPET RECYCLING S.L.	X			
PET COMPAÑÍA PARA SU RECICLADO S.A.	X			
RECICLADOS DE PET DE ANDALUCÍA, S.L.	X			
RECICLAJES FELMA S.A.	X	X	X	X
RECUPROD, S.L.	X			
RIBERPET S.A.	X			
AWS ECO PLASTICS LTD.	X			
ROLPLAS S.L.	X	X		
SEGARIA PLÁSTICOS S.L.	X	X		
TECNICAS EN RESIDUOS Y RECICLAJES URBANOS, S.A.U.	X			
ABORNASA		X		
BALLESTER DE PLÁSTICOS S.L.		X		
CORDOPLÁS S.A.		X	X	X
ESLAVA PLÁSTICOS S.A.		X	X	
INSERPLASA S.L.		X	X	
PLASCAN S.A.		X	X	X
PLASTICOS RIAZA S.L.		X		
RECICLADOS LA RED S.L.		X	X	
REPLACAL S.L.		X		
SEVELAR, S.A.		X		
SUMINCO S.A.		X		
VIELPA S.A.		X		
BIZKAIKI PLASTIKO BERZIKLATEGIA, S.L.			X	
DENPLAX S.A.			X	
BANALES I S.L.				X
LASENTIU S.L.				X
LIGEPLAS S.A.				X

Tabla 51 - Principales recicladores en España. Ecoembes.

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

De todos los recicladores anteriores recogidos en la tabla, los que están sombreados son los que operan en Andalucía Occidental con los polietilenos de alta y baja densidad (PEAD/PEBD), y por tanto sería la competencia potencial de la planta de valorización energética. La totalidad de ellos realiza un reciclado mediante métodos mecánicos.

Ecoembes asume la responsabilidad de la designación de los recuperadores/recicladores de los distintos materiales separados por tipo en las plantas de transferencia de residuos. Las ofertas son publicadas en la página web de Ecoembes para su convocatoria en abierto. Las convocatorias para materiales plásticos son por zonas, cada una de las cuales comprende varias plantas de transferencia. Cada empresa recicladora interesada debe hacer llegar la oferta a Ecoembes en sobre cerrado y dentro del plazo establecido en el documento de convocatoria. Los criterios de adjudicación se basan por un lado en el precio, donde recibirán más puntos las ofertas más ventajosas, y en la proximidad planta de transferencia-empresa recicladora. La media de precios que se vienen ofertando en los últimos meses para algunos materiales plásticos según Ecoembes son:

PRECIOS DE REFERENCIA DE LOS RESIDUOS PLASTICOS (€/kg)				
Residuos plásticos	**mar-10**	**feb-10**	**ene-10**	**Media**
R-PET	0,0840	0,0646	0,0597	0,0694
R-PEAD color	0,1537	0,1211	0,1022	0,1257
R-PEAD natural	0,1878	0,1477	0,1265	0,1540

Tabla 52 - Precios para residuos plásticos. Ecoembes.

Las características del proceso de reciclaje energético del proyecto hacen que se pueda alimentar el reactor además de con residuos plásticos separados, con mezclas de cualquier tipo de plástico PEAD/PEBD/PP/PVC, lo cual será beneficioso a la hora de ofertar compras de plástico-mezcla, que interesan en menor medida a las empresas de reciclaje mecánico, dado los costes de separación y pretratamiento adicionales que tendrían que asumir.

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

Respecto a los residuos plásticos agrícolas, la empresa gestora del SIG es CICLOAGRO, la cual homologa a los principales recicladores de plásticos agrícolas que se nombraron en epígrafes anteriores:

- EGMASA - Los Palacios (Sevilla).
- DENPLAX - El Ejido (Almería).
- BEFESA – Alhama de Murcia (Murcia).
- GENPLAST – Don Benito (Badajoz).

Todos realizan reciclaje mecánico, y de todos, la planta de EGMASA en Los Palacios (Sevilla) sería el principal competidor para la obtención de materia prima. La ventaja frente a otros recicladores de residuos plásticos agrícolas, al igual que con los residuos de envases, es que el procesado de la planta de valorización energética permite trabajar con plásticos muy degradados por las condiciones meteorológicas, que en el caso del reciclaje mecánico no podría llevarse a cabo.

B.2.2. Competencia por la venta de productos:

En España no existe un sector de valorización energética de residuos plásticos mediante procesos termoquímicos con el que competir, aunque sí existen otros sectores de venta de energía eléctrica (empresas de energía) e hidrocarburos líquidos (empresas petroquímicas). No pasa desapercibido que una empresa de reciente instalación en un sector novedoso y con competidores fuertemente instalados no puede prosperar sin apoyos por parte de las administraciones públicas, basándonos en criterios de sostenibilidad y medioambiente.

B.3. Zonas de acopio de residuos plásticos:

Es importante en un estudio de mercado ubicar los principales puntos de acopios de la materia prima que va a entrar en la planta, los residuos plásticos de polietileno, polipropileno y PVC. Por las cantidades de generación de RPUA, el ámbito de actuación inicial se centra en Andalucía Occidental.

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

Los residuos plásticos de envases, una vez recogidos en sus contenedores en ciudades, polígonos industriales y puntos limpios, son transportados a las diferentes plantas de acopio que hay repartidas por todo la geografía, donde se clasificarán por tipo y almacenarán en palets para su venta. Las principales plantas que los aglutinarán serán las plantas de clasificación (Ecoembes), las plantas de recuperación y compostaje (vertederos controlados) y las plantas de transferencia.

En el Anexo C, de mapas de localización, se puede observar la concentración de estas plantas en el ámbito geográfico de Andalucía Occidental, y en mayor medida se ve una mayor aglutinación en la zona metropolitana de Sevilla, lo cual convierte a Aznalcóllar en una beneficiosa ubicación de una planta de gestión de este tipo de residuos, primando las reducciones en los costes ocasionados por el transporte de los residuos plásticos a la planta.

Se observa en el mapa de la zona metropolitana de Sevilla, que al establecer un radio de acción de 100 km a la redonda, entrarían bastantes plantas de acopio de residuos plásticos que pueden corresponderse con los centros potenciales de suministro de materia prima de la planta.

Para el caso de los residuos plásticos agrícolas, la competencia de su gestión se encuentra en la actualidad transferida a los ayuntamientos en los que se generan dichos residuos. Estos ayuntamientos pueden suscribir con los grupos de gestión autorizados (CICLOAGRO) para encomendarles parcial o totalmente dichas actividades.

En la actualidad, la mancomunidad de municipios del Bajo Guadalquivir (Sevilla y Cádiz) ha acondicionado un total de 20 puntos de depósito en las localidades de la comarca, donde los agricultores deben depositar los plásticos agrícolas. En la provincia de Huelva, se encuentran otros 18 puntos de depósito, gestionados por el SIG de CICLOAGRO, distribuidos en los principales puntos

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

de generación (Lepe, Cartaya, Moguer, etc.). Para estas tres provincias, una planta en Aznalcóllar sigue estando en buenas condiciones para el acopio de RPUA.

B.4. Análisis de clientes potenciales:

Los productos que se van a generar con la actividad de la planta serán unos aceites de pirólisis y electricidad, la cual en caso de haber excedente o variaciones de demanda podría será comercializada. Se prevé que los principales clientes a los que les puede interesar el suministro de dichos productos son:

- Refinerías de petróleo: podrían recoger los aceites pirolíticos para su reformado (procesos BTX), y así obtener nuevos productos químicos.

- Centrales eléctricas: podrían adquirir la energía eléctrica generada como intermediario, así como los aceites pirolíticos como combustible.

- Industrias constructoras, fabricantes de pavimentos, asfaltos MBC, MBF (mezclas bituminosas en caliente y en frio) y betunes a partir de la fracción pesada de los aceites (alquitranes): ya que posee características similares al obtenido en los aceites de pirólisis.

- Otras industrias que utilicen los aceites pesados de alquitrán como materia prima de sus productos, como por ejemplo para fabricar jabones, pinturas, plásticos y productos químicos.

Por tanto, se tiene en cuenta una ubicación de la planta de reciclado químico cercana a posibles clientes de los productos obtenidos, con el fin de minimizar costes de transporte. En los mapas del Anexo C se puede observar la situación de la planta de reciclaje con respecto a las principales zonas industrializadas de Andalucía Occidental. A continuación se hace un examen de estas zonas,

donde se ubican refinerías de petróleo, centrales de ciclo combinado y grupos cogeneradores, e industrias que utilizan asfaltos con el fin de estimar la proximidad a cada una de ellas.

B.4.1. Zona industrial del área metropolitana de Huelva:

En el área metropolitana de Huelva existen 2 centrales de ciclo combinado, 8 grupos cogeneradores y 1 refinería de petróleo (CEPSA) distribuidos entre los términos municipales de Palos de la Frontera y Huelva. Existen 4 grupos cogeneradores más distribuidos por el resto de la provincia. Aunque en el plano solo se observan 2, se ubican hasta 8 empresas que trabajan con asfalto.

Los productos obtenidos en la planta pueden ser vendidos a la refinería de Palos de la Frontera, y el gas generado podría sustituir al gas natural en las centrales de ciclo combinado y cogeneración.

La planta se ha decidido ubicar en Aznalcóllar (Sevilla) por estar relativamente cercana a la zona industrial de Huelva, con el beneficio de reducir costes en los trasportes por carretera de los gases y alquitranes producidos. La distancia entre Aznalcóllar y el Polo Industrial de Huelva es de unos 97 km, y los costes relativos al transporte de los productos al cliente no son significativos.

B.4.2. Zona industrial del área metropolitana de Sevilla:

En la provincia de Sevilla no existe ninguna refinería de petróleo, ni centrales de ciclo combinado; existen sólo algunos grupos dispersos de cogeneración y generación con gas. En cambio, en el plano se puede observar la ubicación de algunas empresas que trabajan con asfalto (aunque se estima que en la provincia de Sevilla pueda haber hasta 21 empresas) y pueden ser clientes.

En cualquier caso, una ubicación próxima a esta área de Sevilla será favorable puesto que es donde se sitúan los principales focos generadores de residuos

plásticos, como se vio en el estudio de mercado. La distancia entre la planta de Aznalcóllar y la zona metropolitana de Sevilla ronda los 10-30 kilómetros, lo cual será beneficioso en el transporte de materia prima a la planta, minimizando costes.

B.4.3. Zona industrial del Campo de Gibraltar:

En el Campo de Gibraltar existe 1 refinería de petróleo (CEPSA), 2 centrales de ciclo combinado y 2 grupos cogeneradores. En el resto de la provincia de Cádiz existe una central de ciclo combinado en Arcos de la Frontera y el total de grupos de cogeneración es de 13, distribuidas por Arcos de la Frontera, San Roque, Campo de Gibraltar, Algeciras, y Cádiz Capital. En el mapa se observan 3 empresas que trabajan con asfalto, pero en la provincia de Cádiz hay hasta 9 empresas que trabajan con asfalto para este fin.

Los productos obtenidos en el reciclaje químico de los residuos plásticos pueden ser vendidos a la refinería de petróleo de Algeciras, y el gas generado podría sustituir al gas natural en las centrales de ciclo combinado y cogeneración que hay repartidas por la zona industrial y el resto de la provincia.

La distancia entre la planta de Aznalcóllar y la zona industrial Campo de Gibraltar es de 220 kilómetros, con lo cual los costes de transporte son más significativos con respecto a los clientes de la zona industrial de Huelva y Sevilla.

ANEXO C:

MAPAS DE LOCALIZACIÓN

Indice:

C.1. Ubicación de la planta……..pág. 1

C.2. Zonas industriales metropolitanas.

C.2.1. Zona industrial metropolitana de Huelva…….pág. 4

C.2.2. Zona industrial metropolitana de Sevilla……..pág. 5

C.2.3. Zona industrial metropolitana Campo de Gibraltar…….pág. 6

C.3. Distribución geográfica suministradores de residuos plásticos….pág. 7

C.4. Distribución geográfica de los clientes potenciales…….pág. 8

C.1. Ubicación de la planta:

Para representar la ubicación de la planta se va a mostrar primero los datos del "catastro geométrico": un registro administrativo dependiente del Estado en el que se describe la medición, subdivisión, representación y ubicación del bien. Para ello se accede a la "Dirección General del Catastro", en la web del Ministerio de Economía y Hacienda:

DATOS DEL INMUEBLE

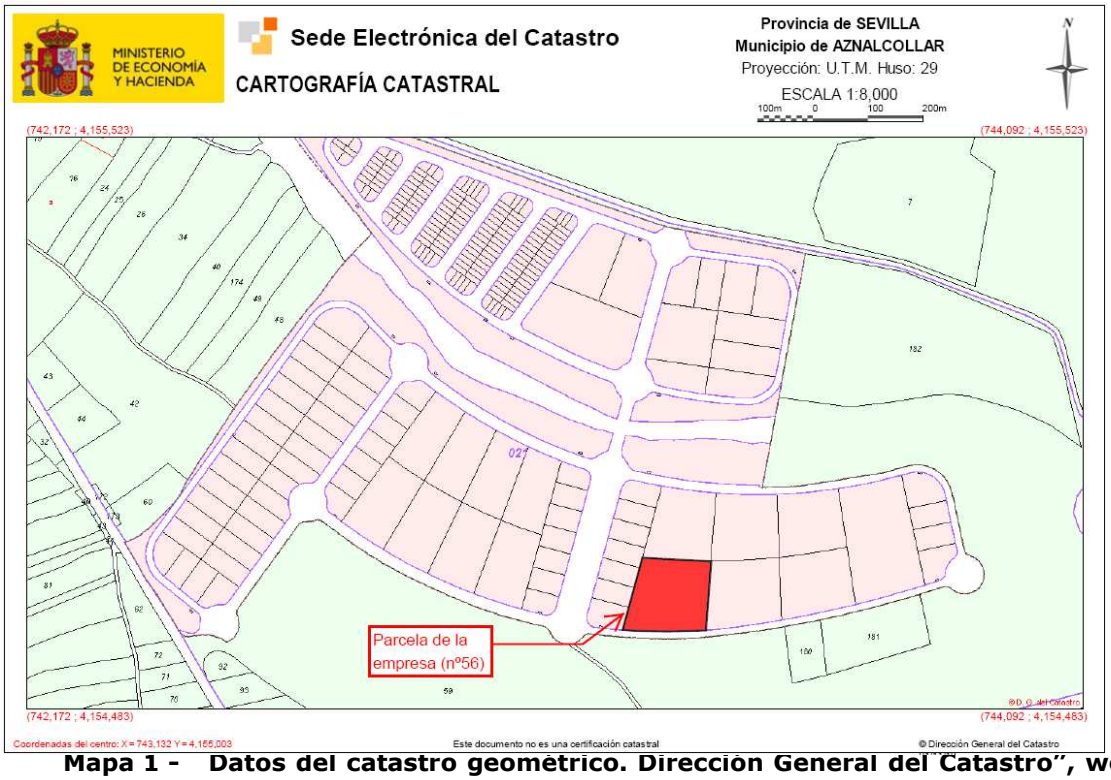
LOCALIZACIÓN
CL EL MATORRAL 56 Suelo
41870 AZNALCOLLAR [SEVILLA]

USO LOCAL PRINCIPAL: Suelos sin edificar, obras de urbanización y jardinería
AÑO CONSTRUCCIÓN: --
COEFICIENTE DE PARTICIPACIÓN: 100,000000
SUPERFICIE CONSTRUIDA [m²]: --

DATOS DE LA FINCA A LA QUE PERTENECE EL INMUEBLE

SITUACIÓN
CL EL MATORRAL 56
AZNALCOLLAR [SEVILLA]

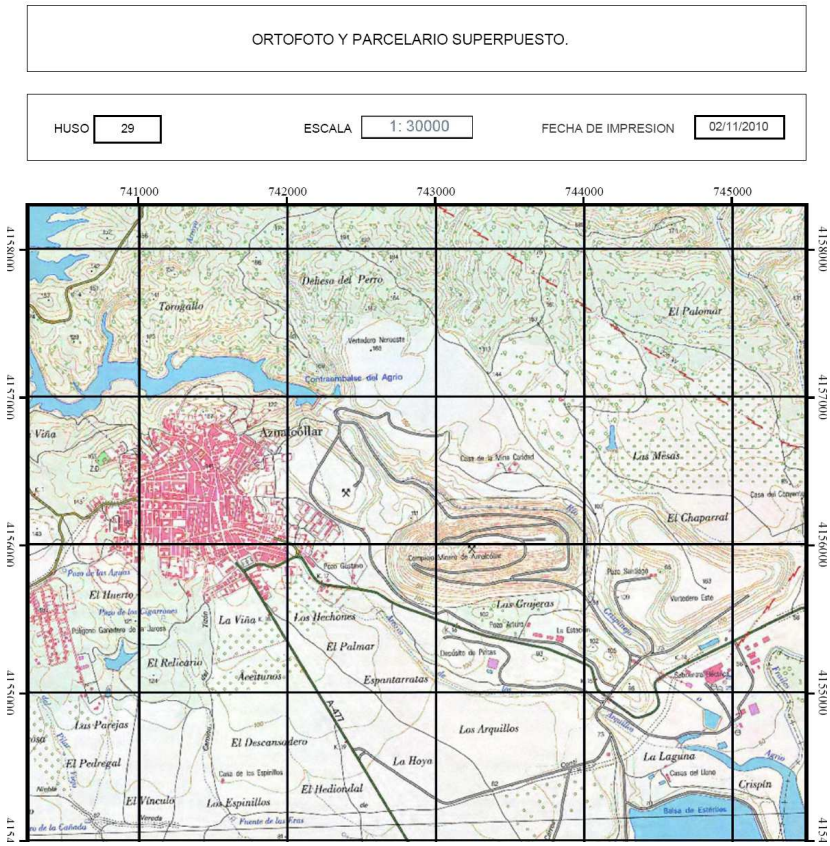
SUPERFICIE CONSTRUIDA [m²]: --
SUPERFICIE SUELO [m²]: 17.953
TIPO DE FINCA: Suelo sin edificar



Mapa 1 - Datos del catastro geométrico. Dirección General del Catastro", web del Ministerio de Economía y Hacienda.

Así mismo se va a utilizar el Sistema de Información Geográfica de Identificación de Parcelas Agrícolas (SIGPAC), creado a través de la colaboración entre el Fondo Español de Garantía Agraria (FEGA) y las distintas Comunidades Autónomas. Se encuentra disponible en la web del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Aunque se concibió inicialmente con el propósito de facilitar a los agricultores la presentación de solicitudes, se ha convertido en una herramienta de enorme utilidad en campos diferentes del agrario (geología, infraestructuras, urbanismo...) debido al uso de las tecnologías más avanzadas en información geográfica automatizada. La información disponible se muestra a través del VISOR SIGPAC, que la publica en modo de capas. Para cada una de las capas se pueden consultar sus datos así como emitir informes que nos relacionen y muestren datos calculados.



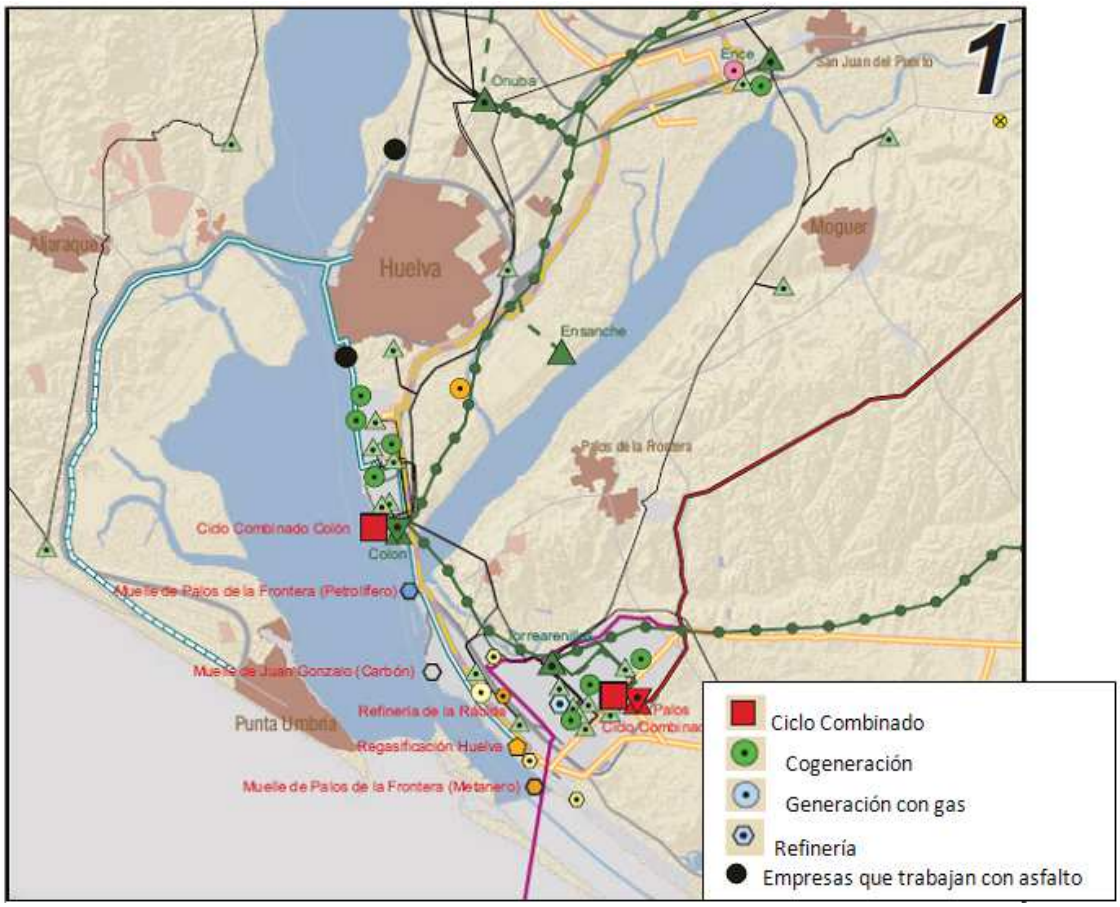
Mapa 2 - Ortofoto y parcelario superpuesto. Visor SIGPAC, web del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Mapa 3 - Situación parcela. Visor SIGPAC

Imagen 7 - Panorámica de la parcela 56.

C.2. Zonas industriales metropolitanas:

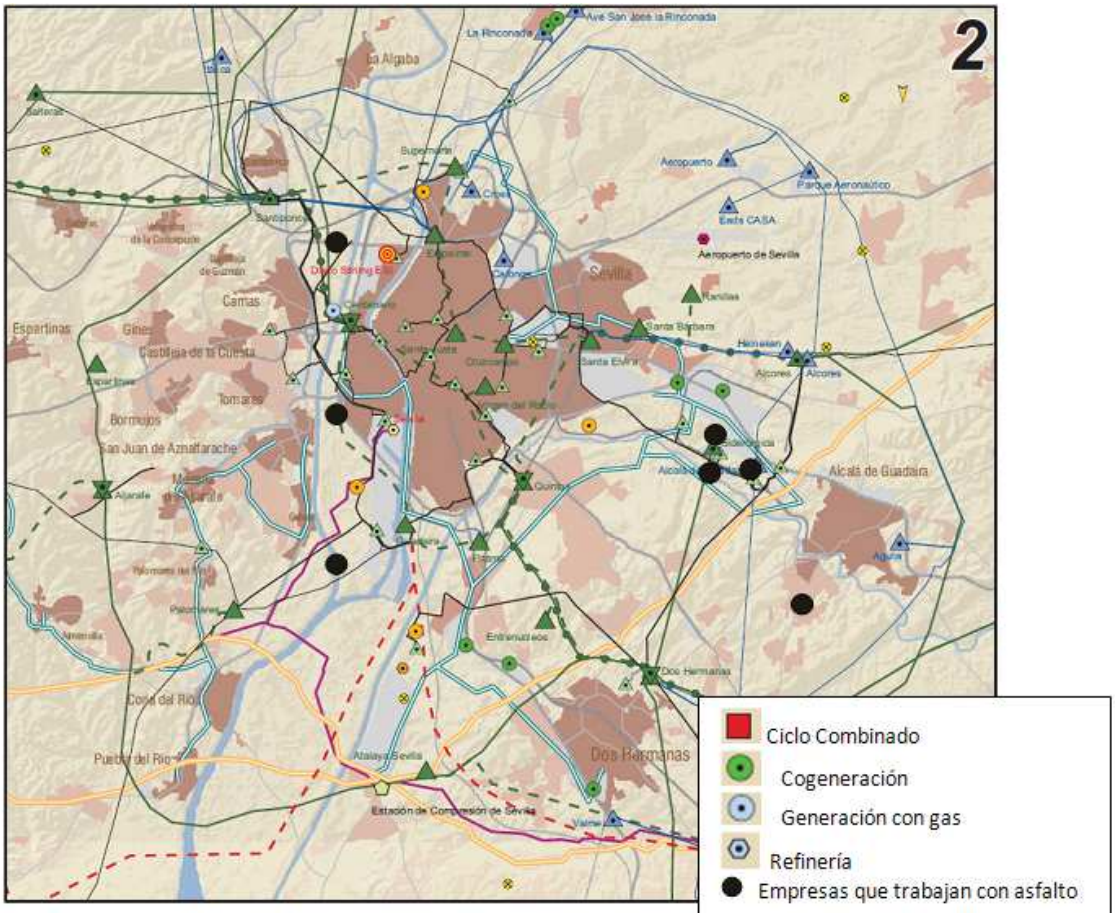
C.2.1. Zona industrial metropolitana de Huelva:



Mapa 4 - Zona industrial metropolitana de Huelva.

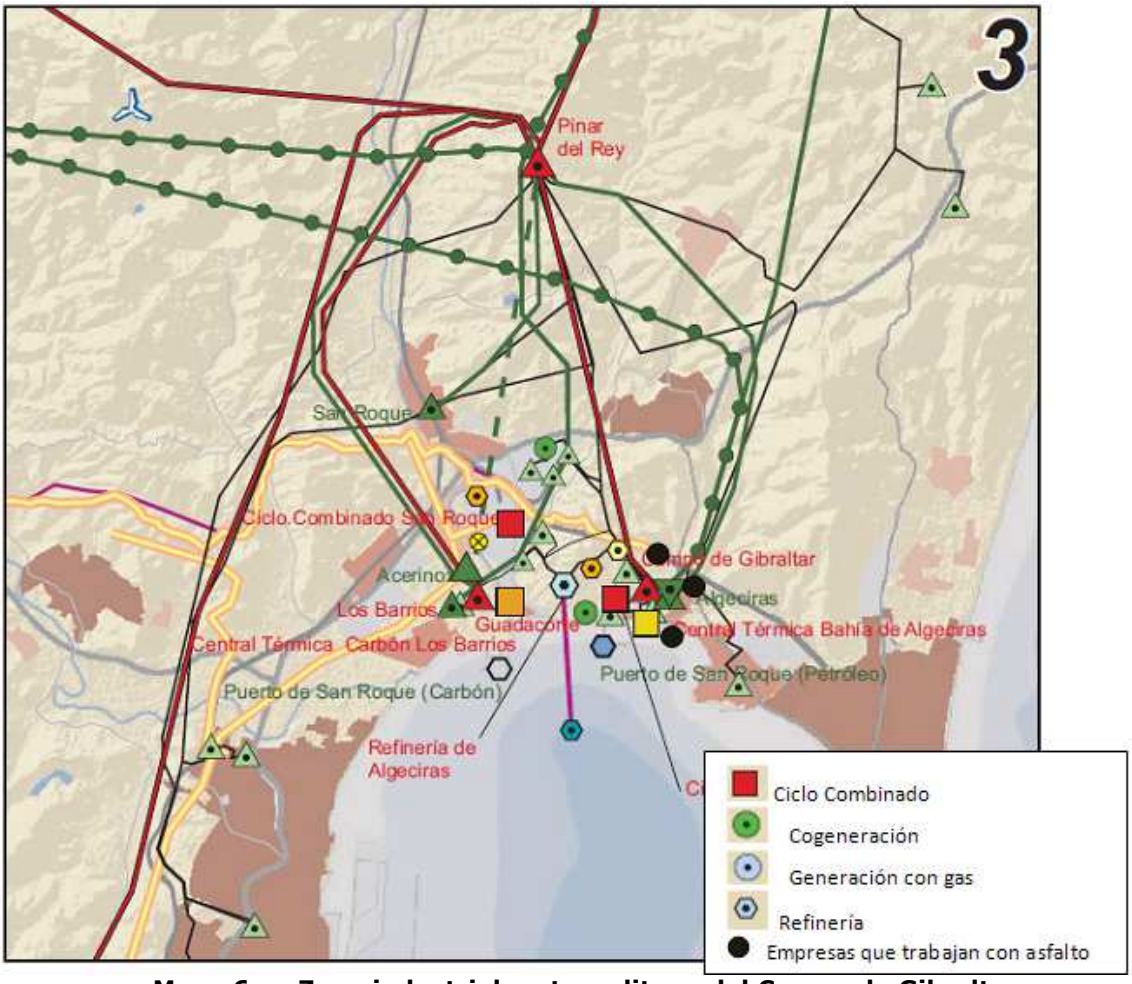
Agencia Andaluza de la Energía.

C.2.2. Zona industrial metropolitana de Sevilla:



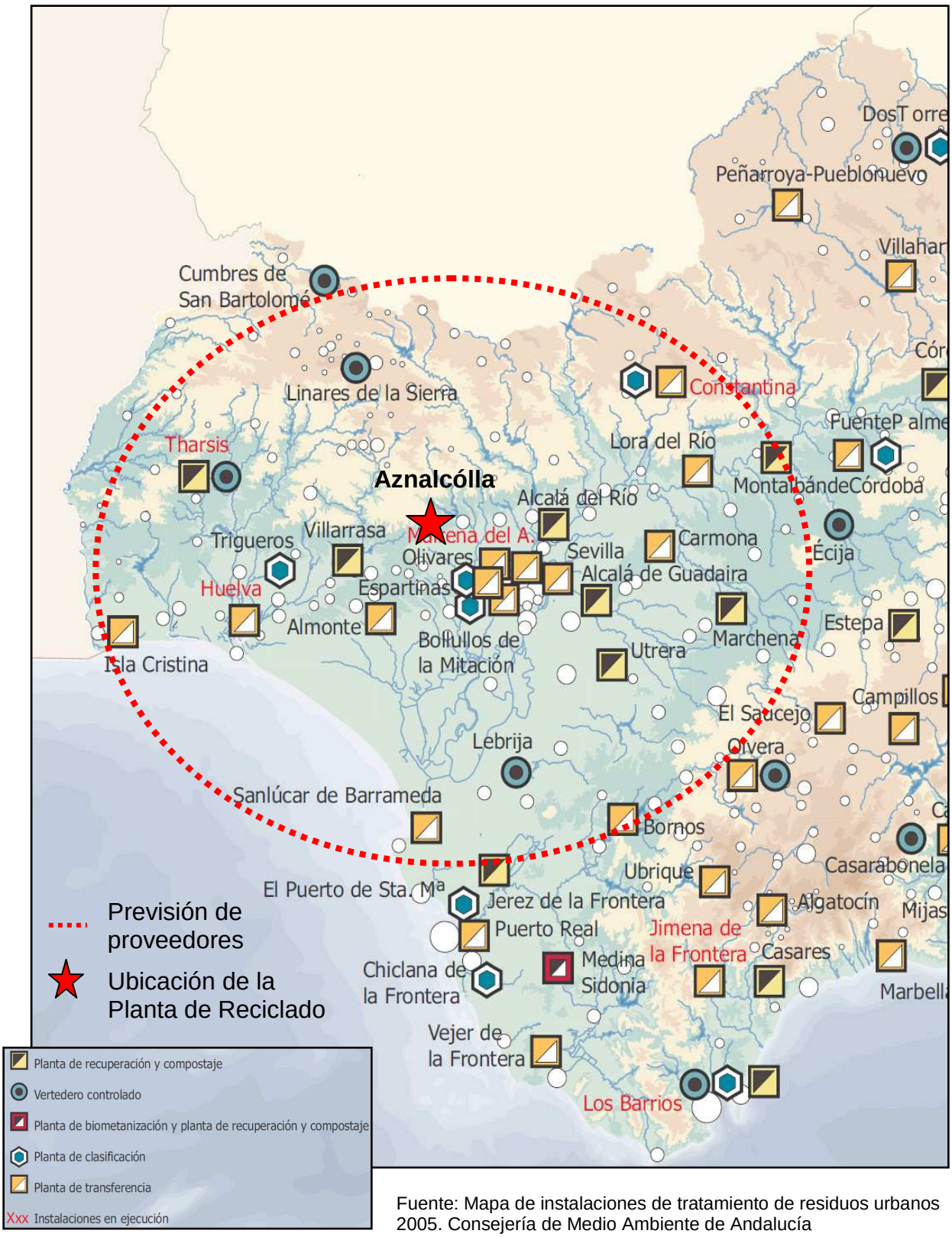
Mapa 5 - Zona industrial metropolitana de Sevilla. Agencia Andaluza de la Energía.

C.2.3. Zona industrial metropolitana Campo de Gibraltar:



Mapa 6 - Zona industrial metropolitana del Campo de Gibraltar. Agencia Andaluza de la Energía.

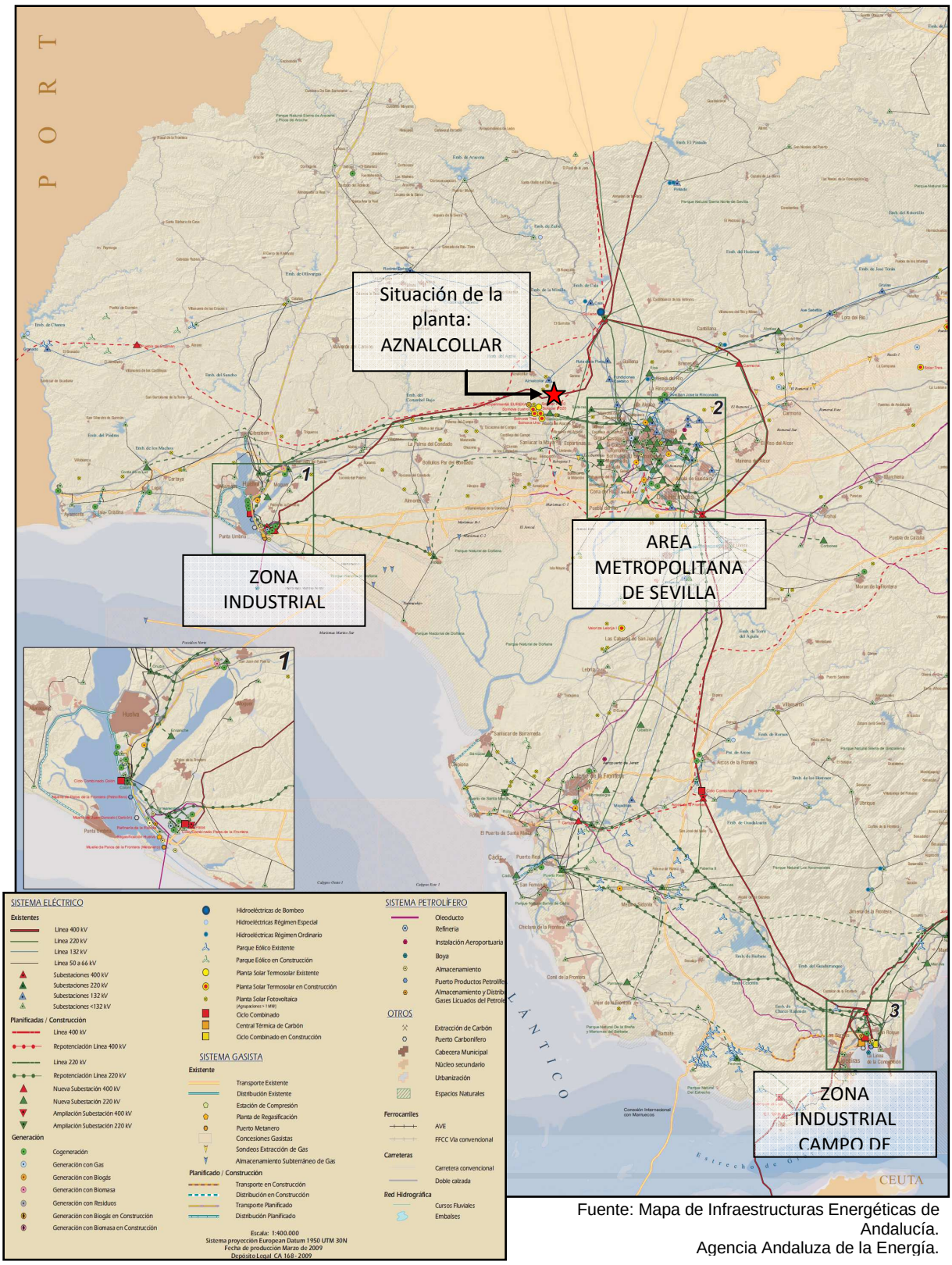
C.3. Distribución geográfica suministradores de residuos plásticos:



Fuente: Mapa de instalaciones de tratamiento de residuos urbanos 2005. Consejería de Medio Ambiente de Andalucía

Mapa 7 - Distribución geográfica suministradores de residuos plásticos

C.4. Distribución geográfica de los clientes potenciales:



Fuente: Mapa de Infraestructuras Energéticas de Andalucía.
Agencia Andaluza de la Energía.

Mapa 8 - Distribución geográfica suministradores de clientes potenciales.

ANEXO D:

TRÁMITES ADMINISTRATIVOS

Indice:

D.1. Requerimientos

D.1.1. Documentos necesarios constitución sociedad limitada.…pág. 1

D.1.2. Documentos necesarios para el proyecto de la planta.…..pág. 2

D.1.3. Pequeño productor de residuos peligrosos…….pág. 4

D.1.4. Gestor de residuos……..……..pág. 4

D.1.5. Producción de energía eléctrica:……..……..pág. 4

D.1.6. Emisiones……..pág. 5

D.1.7. Homologación ECOEMBES…….....pág. 5

D.1.8. Registro en régimen especial……pág. 6

D.2. Subvenciones……..…….pág. 7

D.3. Ayudas.

D.3.1. Ayuda al sector energético sostenible……...pág. 8

D.3.2. Ayudas medioambiente y desarrollo sostenible……...pág. 8

D.4. Documentación administrativa.

D.4.1. Solicitud inscripción pequeño productor res. peligrosos....pág. 9

D.4.2. Libro registro de residuos peligrosos (productores)……pág. 10

D.4.3. Solicitud de admisión de residuos peligrosos……..pág. 12

D.4.4. Información anual productores residuos peligrosos…….....pág. 13

D.4.5. Documento seguimiento y control res. peligrosos……...pág. 14

D.4.6. Solititud autorización vertido aguas depuradas……pág. 15

D.4.7. Solicitud acogida al régimen especial ……..……pág. 16

D.4.8. Declaración acceso a cofinanciación FEDER……..pág. 17

D.4.9. Declaración responsable sobre solvencia financiera……pág. 18

D.1. Requerimientos:

En la implantación de una instalación de valorización energética de residuos plásticos es necesaria una serie de trámites a nivel administrativo para su correcta instauración. Estos trámites abarcan desde la constitución de la propia organización hasta las subvenciones y las autorizaciones necesarias para su funcionamiento dentro de la legislación aplicable.

D.1.1. Documentos necesarios para la constitución de la sociedad (limitada):

- Solicitud del Certificado de Denominación Social: instancia oficial con los nombres elegidos (un máximo de tres por orden de preferencia). Se presenta en el Registro Mercantil Central.
- Apertura de Cuenta Bancaria.
- Redacción de Estatutos y firma de Escritura de Constitución.
- Pago de Impuesto de Transmisiones Patrimoniales.
- Inscripción en el Registro Mercantil: se realiza en el Registro Mercantil de la provincia en que se encuentre domiciliada la Sociedad. Documentación a presentar:
  - La Escritura Pública de Constitución de la Sociedad.
  - Liquidación del Impuesto de Transmisiones Patrimoniales.
- Solicitud CIF, Declaración Censal: se presenta en la Administración o Delegación de la Agencia Estatal de la Admón. Tributaria correspondiente al domicilio fiscal de la sociedad. En el plazo de 6 meses, se retira el CIF definitivo. Documentos a presentar:
  - Impreso modelo 036.
  - Original y copia simple de la escritura de constitución.
- Pago de Impuesto de Actividades Económicas: se presenta en la Administración o Delegación de la Agencia Estatal de la Administración Tributaria correspondiente al lugar en que se ejerza la actividad.

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

- Alta en el Régimen General de socios y trabajadores. Se presenta en la Tesorería General de la Seguridad Social correspondiente. Documentos a presentar:
  - Documento de afiliación.
  - Parte de alta de asistencia sanitaria.
  - Parte de alta de cotización por cuadriplicado.
  - Fotocopia del alta en el IAE.
  - CIF.
- Solicitud del Libro de Visitas: debe tramitarse en la Inspección Provincial de Trabajo y Seguridad Social.

D.1.2. Documentos necesarios para el proyecto de la planta:

- Compra del suelo.
- Solicitud de subvenciones.
- Redacción del proyecto.
- Calificación Ambiental: según la *Ley 7/2007 de* Gestión Integral de la Calidad Ambiental, es un informe resultante de la evaluación de los efectos ambientales de las actuaciones sometidas a este *Instrumento de prevención y control ambiental*, y que se debe integrar en la licencia municipal. En el Anexo I de dicha Ley "Categorías de actuaciones sometidas a los instrumentos de prevención y control ambiental", en la categoría 2 "Instalaciones Energéticas" en su punto 2.5. "Instalaciones industriales de la categoría 2.4. con potencia térmica inferior", el instrumento a emplear será la *Calificación Ambiental*. Así mismo en la categoría 11 "Proyectos de tratamiento y gestión de residuos", en su punto 11.9 "Instalaciones de gestión de residuos no incluidas en las categorías anteriores", el instrumento a emplear también es la *Calificación Ambiental*. Consta de:

  - Proyecto Técnico suscrito por técnico competente, el cual debe incluir a efectos ambientales:

  - Objeto de la actividad.
  - Emplazamiento, adjuntando planos escala 1:500 y descripción del edificio en que se haya la instalación. En la descripción del emplazamiento se señalan las distancias a las viviendas más próximas, pozos y tomas de agua, centros públicos, industrias calificadas, etc., aportando planos que evidencien estas relaciones.
  - Maquinaria, equipos y proceso productivo a utilizar.
  - Materiales empleados, almacenados y producidos, señalando las características de los mismos que los hagan potencialmente perjudiciales para el medio ambiente.
  - Riesgos ambientales previstos y medidas correctoras propuestas, indicando el resultado final previsto en situaciones de funcionamiento normal y en caso de producirse anomalías o accidentes. Como mínimo en relación con:
    - Ruidos y vibraciones.
    - Emisiones a la atmósfera.
    - Utilización del agua y vertidos líquidos.
    - Generación, almacenamiento y eliminación de residuos.
    - Almacenamiento de productos.
  - Medidas de seguimiento y control que permiten garantizar el mantenimiento de la actividad dentro de los límites permisibles.

- Síntesis de las características de la actividad o actuación para la que se solicita la licencia, cumplimentada, en su caso, en el modelo oficial correspondiente.
- Aquellos otros documentos que el Ayuntamiento exija con arreglo a su propia normativa.

- Informe de compatibilidad urbanística.
- Plan de gestión de residuos.
- Solicitud del permiso de suministro.
- Solicitud de licencia de obra.
- Se tramitará a través del ayuntamiento de la localidad.

- Ejecución de obra.
- Licencia de Apertura.
- Se tramita a través del ayuntamiento de la localidad.

D.1.3. Pequeño productor de residuos peligrosos:

- Inscripción como pequeño productor: es una empresa que genera menos de 10.000 Ton de residuos peligrosos al año (principalmente relacionados con los hidrocarburos que se desechan como vertido o residuo), por lo que se tramita a través de las Delegaciones Provinciales de la Consejería de Medio Ambiente.
- Registro.
- Informe anual: se tramita a través de las Delegaciones Provinciales de la Consejería de Medio Ambiente.
- Solicitud de admisión a gestor autorizado: se solicita un compromiso documental de aceptación por parte del gestor
- Documento de control y seguimiento: se presenta en las Delegaciones Provinciales de la Consejería de Medio Ambiente una vez que los residuos hayan sido recepcionados por los gestores de destino autorizados.

D.1.4. Gestor de residuos:

- Inscripción como gestor de residuos.
- Registro documental.

D.1.5. Producción de energía eléctrica:

- Autorización como instalación de producción de energía eléctrica: la instalación consta de unos motores cogeneradores que producen energía eléctrica que posteriormente será transferida a la red de distribución. Es por ello que este tipo de instalación se incluye en la legislación vigente sobre

productores de energía eléctrica. El Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, incluye dicha actividad en el Subgrupo a.1.4 (Resto de cogeneraciones que incluyen como posibles combustibles a emplear, gases residuales de refinería, coquería, combustibles de proceso, carbón y otros no contemplados en los subgrupos anteriores).

- Inscripción en el Registro administrativo de instalaciones de producción de energía eléctrica.

D.1.6. Emisiones:

Según la Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero; en su anexo I incluye como actividad de aplicación de dicha ley: "Instalaciones de combustión con una potencia térmica nominal *superior* a 20 MW, incluyendo las instalaciones de cogeneración que producen energía eléctrica en régimen ordinario o en régimen especial, independientemente del sector en el que den servicio." Por la capacidad de la planta, no se espera que las máquinas cogeneradoras utilizadas para la producción de electricidad en la instalación generen más de los MW indicados, por lo que no se requiere autorización para la emisión de CO_2.

D.1.7. Homologación por ECOEMBES como reciclador de plásticos de envase:

Para poder optar a los materiales procedentes de las plantas de selección de envases es necesario estar previamente homologados por ECOEMBES, con el objeto de poder garantizar el correcto tratamiento de los materiales. La homologación pasa por el cumplimiento de una serie de requisitos técnicos y administrativos definidos en función del material al que la empresa opta.

El proceso de homologación, es un proceso totalmente externalizado y transparente que consiste en la superación de una auditoría, en la que se

contemplan los aspectos fundamentales de cualquier actividad industrial del sector, agrupados en los siguientes módulos:

- Documentación administrativa.
- Aspectos económicos (documentación básica).
- Gestión medioambiental y de calidad.
- Capacidad tecnológica y calidad producto terminado.
- Capacidad de tratamiento y trazabilidad.

Una vez realizada la auditoría de homologación se emite el informe de auditoría en el que se recogen todos los aspectos contemplados en la norma de referencia, así como comentarios sobre puntos fuertes y débiles y propuestas de mejoras. Los costes de la auditoría son asumidos por el solicitante de la homologación. La vigencia de la homologación es por dos años y se entra a formar parte del listado de recuperadores/recicladores homologados de Ecoembalajes España.

D.1.8. Registro en régimen especial:

Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. En su artículo 7 de presentación de la solicitud: "[…] la solicitud de inclusión en el régimen especial deberá ser presentada por el titular de la instalación […] Esta solicitud deberá acompañarse de la documentación acreditativa de los requisitos a que se refiere el artículo anterior, así como de una memoria-resumen de la entidad peticionaria que deberá contener:

a) Nombre o razón social y domicilio del peticionario.
b) Capital social y accionistas con participación superior al cinco por ciento, en su caso, y participación de estos. Relación de empresas filiales en las que el titular tenga participación mayoritaria.

c) Las condiciones de eficiencia energética, técnicas y de seguridad de la instalación para la que se solicita la inclusión en el régimen especial.
d) Relación de otras instalaciones acogidas al régimen especial de las que sea titular.
e) Copia del balance y cuenta de resultados correspondiente al último ejercicio fiscal."

D.2. Subvenciones:

Existen organismos públicos y privados que con el fin de incentivar tanto el desarrollo como la investigación de energías y tecnologías limpias dan una serie de ayudas a las empresas para que lleven a cabo estas actividades. Algunos de éstos son:

- Instituto de Crédito Oficial (ICO): entidad pública que actúa como institución financiera para promoción de actividades económicas que contribuyan al crecimiento y mejora de la riqueza nacional. Existe un programa de financiación dedicado a proyectos de uso de residuos para producción de energía y eficiencia energética en colaboración con el IDAE (Instituto para la diversificación y el ahorro de la energía). Bajo el programa de financiación de la ICO había inicialmente unos 136 millones de euros disponibles en préstamos bancarios hasta de un 70% de la inversión.
- Fondo europeo de desarrollo regional (FEDER), cofinanciado con el gobierno de España y la Junta de Andalucía.
- Programa de Fomento de la Investigación Técnica (PROFIT): proyectos I+D mediante préstamos a interés cero, subsidios y una mezcla de ambos (www.mcyt.es/profit).
- Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI): subvenciona proyectos de I+D de instituciones públicas o privadas.

D.3. Ayudas:

D.3.1. Ayuda al sector enérgico sostenible:

Orden de 4 de febrero de 2009, por la que se establecen las bases reguladoras de un programa de incentivos para el desarrollo energético sostenible de Andalucía y se efectúa su convocatoria para los años 2009-2014. En su Anexo I, punto 2.3: Incentivos a las instalaciones de aprovechamiento energético:

> 2.3.3. Valorización energética de residuos no biomásicos. Proyectos destinados a la reducción de la contaminación generada por otras empresas mediante la producción de energía eléctrica a partir de sus residuos no biomásicos, siempre que cumplan las condiciones siguientes:
>
> a) Las instalaciones objeto de incentivo empleen tecnología innovadora, y se destinen a la reducción de la contaminación generada por otras empresas…
> c) La valorización energética objeto del incentivo deberá formar parte de un proyecto de gestión de residuos, en el que se cumplan los siguientes requisitos:
>
> 1. La ayuda no libera indirectamente a los contaminadores de cargas que deberían soportar con arreglo a la legislación comunitaria ni de cargas que se deberían considerar costes empresariales normales para los contaminadores.
>
> […]

D.3.2. Ayudas a favor del medioambiente y desarrollo energético sostenible:

Decreto 23/2009, de 27 de enero, por el que se establece el marco regulador de las ayudas a favor del medio ambiente y del desarrollo energético sostenible que se concedan por la Administración de la Junta de Andalucía (el plazo de

presentación de solicitudes se iniciará en la fecha de entrada en vigor de la presente y finalizará el 30 de diciembre de 2014). En su artículo 2 “Finalidad de las ayudas”, en el punto 2: “Las ayudas reguladas en el presente Decreto, en orden al objetivo de dicho interés común, irán destinadas a”:

[…]

g) La gestión de residuos.

En su artículo 11 “Ayudas para la gestión de residuos”:

1. Se podrán conceder ayudas que tengan como objeto la realización de inversiones para la gestión de residuos de otras empresas, incluidas las actividades de reutilización, reciclaje y recuperación.
2. Dicha gestión de residuos se ajustará a la clasificación jerárquica de los principios aplicables según la Estrategia comunitaria de gestión de residuos, adoptada por la Comisión el 18 de septiembre de 1989, y revisada el 1 de agosto de 1996.
3. Las ayudas a la inversión para la gestión de residuos deberán cumplir los siguientes requisitos:

   […]

   c) La inversión irá más allá de la tecnología punta o utiliza tecnologías convencionales de forma innovadora.

D.4. Documentación administrativa:

D.4.1. Solicitud de inscripción como pequeño productor de residuos peligrosos:

Los residuos peligrosos que se van a producir en la planta en mayor cantidad son cenizas del reactor y el ciclón, alquitranes pesados y lodos de la depuradora. Por la capacidad de la planta se supone que a lo largo de un año se van a generar menos de 10 toneladas de estos residuos, luego la empresa tiene la obligación por el R.D. 833/1988 de inscribirse como “*pequeña productora de residuos peligrosos*”.

SOLICITUD DE INSCRIPCIÓN COMO PEQUEÑO PRODUCTOR DE RESIDUOS PELIGROSOS

De acuerdo con el art. 22 del RD 833/1988 por el que se aprueba el reglamento de residuos tóxicos y peligrosos, el abajo firmante solicita la inscripción como pequeño productor, así como el(los) libro(s) de registro correspondiente del centro cuyos datos se indican a continuación, para lo cual se aporta la presente solicitud acompañada de la siguiente documentación:

A.)
B.)
C.)
D.)
E.)

RAZÓN SOCIAL

Razón social				CIF	
Domicilio social					
Provincia		Municipio		CP	
Teléfono		Fax	e-mail		
Representante legal				NIF	

DATOS DEL CENTRO PRODUCTOR

Denominación del centro				NIRI	
Dirección					
Provincia		Municipio		CP	
Teléfono		Fax	e-mail		
Actividad				CNAE	

DATOS DE LOS RESIDUOS

Descripción del residuo	Código CER	Cantidad anual estimada	Modo de almacenamiento	Proceso en el que se genera

Asimismo me hago conocedor de que la efectividad de la inscripción que, en su caso, conceda la delegación provincial de medio ambiente, se subordina al cumplimiento del capítulo II del RD 833/1988 de 20 de julio, por el que se aprueba el reglamento de residuos tóxicos y peligrosos.

En , a de de 200

Fdo.:

D.4.2. Libro de Registro de Residuos Peligrosos para los productores:

El productor de R.P. está obligado a controlar cada generación de residuo peligroso con todos sus datos (cantidad, naturaleza, identificación, origen, métodos de tratamiento, fecha de generación, etc). Debe conservarlo en la empresa al menos 5 años.

LIBRO DE REGISTRO DE RESIDUOS PELIGROSOS (PRODUCTORES)

CAPÍTULO II, Sección Segunda, artículos 16.1 y 17 del Real Decreto 833/1988.

Nombre de la empresa / C.I.F.
Domicilio:
C.P.: / Población:
Teléfono /Fax / E-mail:
Actvidad: / C.N.A.E.
Representante de la empresa:
D.N.I. / Cargo

Denominación	Cantidad unidad (1)	Origen (2)		Naturaleza (3)	Código (Anexo I RD 833/98 y 952/97)	LER	Pretratamiento (4)		Almacenamiento - Fechas - (5)			Tratamiento y/o eliminación (6)		Recogida (7)		Residuos Importados (8)		Otros Datos	
		P/I	Proceso				Fecha	Descripcion	Inicio	Fin	Cesión	Fecha	Descripción	Frecuencia	Transporte	Fecha	Nº Part. Arancel.	D.C.S. (9)	Gestor (9)

(1). Indicar cuál es la unidad de medida son m3, Kg, Tn....
(2). Señalar si es de generación propia (P) o de importación (I). Si es de generación propia, identificar el proceso o subproceso donde se genera el residuo.
(3). Datos más relevantes de su naturaleza física y/o características del residuo
(4). A rellenar en el caso de que se den pretratamientos del residuo
(5). En el almacenamiento, la fecha de cesión es el cambio de titularidad, habitualmente coincide con la fecha fin de almacenamiento
(6). Se refiere los casos de productores autorizados a realizar operaciones de gestión in situ
(7). Frecuencia de recogida y medio de transporte utilizado en la misma
(8). Si el origen del residuo es la importación, aportar los datos de la fecha y nº de partida arancelaria de la misma
(9). Indicar el gestor destinatario y el número del Documento de Control y Seguimiento del envío.

D.4.3. Solicitud de admisión de Residuos Peligrosos:

Tanto las cenizas como los lodos de depuradora se entregan a un gestor autorizado, que se encarga de ellos a través de este compromiso documental.

SOLICITUD DE ADMISIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS

(R.D. 833/88, R.D. 952/97 y Orden MAM/304/2002)

SOLICITUD Nº			
1.- PRODUCTOR DEL RESIDUO			
Razón Social			
Dirección del domicilio social:			
Municipio	**Provincia**		**Código Postal**
Teléfono:	**Fax:**	**E-mail:**	
N.I.F.:	**N.I.R.I.:**	**C.N.A.E.:**	
Persona Responsable: (Nombre y dos apellidos)	D.N.I.	Cargo	
2.- GESTOR DEL RESIDUO / DATOS DE GESTOR AUTORIZADO			
Razón Social		**Nº de Gestor Autorizado**	
Dirección del domicilio social:			
Municipio	**Provincia**		**Código Postal**
Teléfono:	**Fax:**	**E-mail:**	
N.I.F.:	**N.I.R.I.:**	**C.N.A.E.:**	
3.- IDENTIFICACION DEL RESIDUO			
Código LER	**Descripción del residuo**		
Cantidad a Gestionar:	Peso (Tm)	Volumen	
Composición Química	Componentes:		
	Concentración		
Propiedades Físico Químicas	Densidad	Punto Inflamación	Punto Ebullición
	pH	Poder Calorífico	Viscosidad
	Otras Propiedades		
CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN DEL RESIDUO	• Razón por la que el residuo debe ser gestionado		**Q**
	• Operación de gestión		**D/R**
	• Tipo genérico del residuo plegroso		**L / P / S / G**
	• Constituyentes que dan al residuo su carácter peligroso		**C**
	• Características de peligrosidad		**H**
	• Actividad generadora del residuo		**A**
	• Proceso generador del residuo peligroso		**B**
Forma entrega (bidones, contenedor, etc)	**Plazo de recogida (Fecha)**	**Frecuencia de recogida**	
Protección necesaria para la manipulación			
OBSERVACIONES	**Fecha, Firma y sello del Productor**		

D.4.4. Información Anual de Productores de Residuos Peligrosos:

Antes del 1 de marzo de cada año el productor de R.P. debe entregar a la Consejería de Medioambiente un resumen con todos los datos de generación y características de los R.P. generados, y debe conservar una copia al menos durante 5 años.

INFORMACIÓN ANUAL DE PRODUCTORES DE RESIDUOS PELIGROSOS

(Artículos 18 y 19, Real Decreto 833/88, "B.O.E." del 30/VII/88 y artículo 21 Ley 10/98, "B.O.E." del 22/IV/98)

COMUNIDAD AUTÓNOMA DE ANDALUCÍA **Provincia del Centro:** _____

Cumplimentar los dos ejemplares. Enviar el **ejemplar A** al Organo Ambiental de la provincia del centro declarante. El **ejemplar B** es para el interesado.

Información correspondiente al año _____	
NÚMERO DE PRODUCTOR DE RESIDUOS PELIGROSOS: _____	
Fecha _____	Firma del representante legal de la empresa

Cumplimentar obligatoriamente TODOS los campos de este recuadro

Ejemplar A para el Organo Ambiental de la Comunidad Autónoma

DATOS DE LA EMPRESA

Razón Social	C.I.F.
Dirección del domicilio social	Código Postal
Municipio	Teléfono
Representante legal de la empresa	N.I.F.
Número de centros productores de residuos peligrosos	Fax

DATOS DEL CENTRO

Denominación del centro	N.I.R.I.
Dirección del centro	Código Postal
Municipio	Teléfono
Actividad del centro	Fax

(Cumpliméntese un ejemplar por centro)

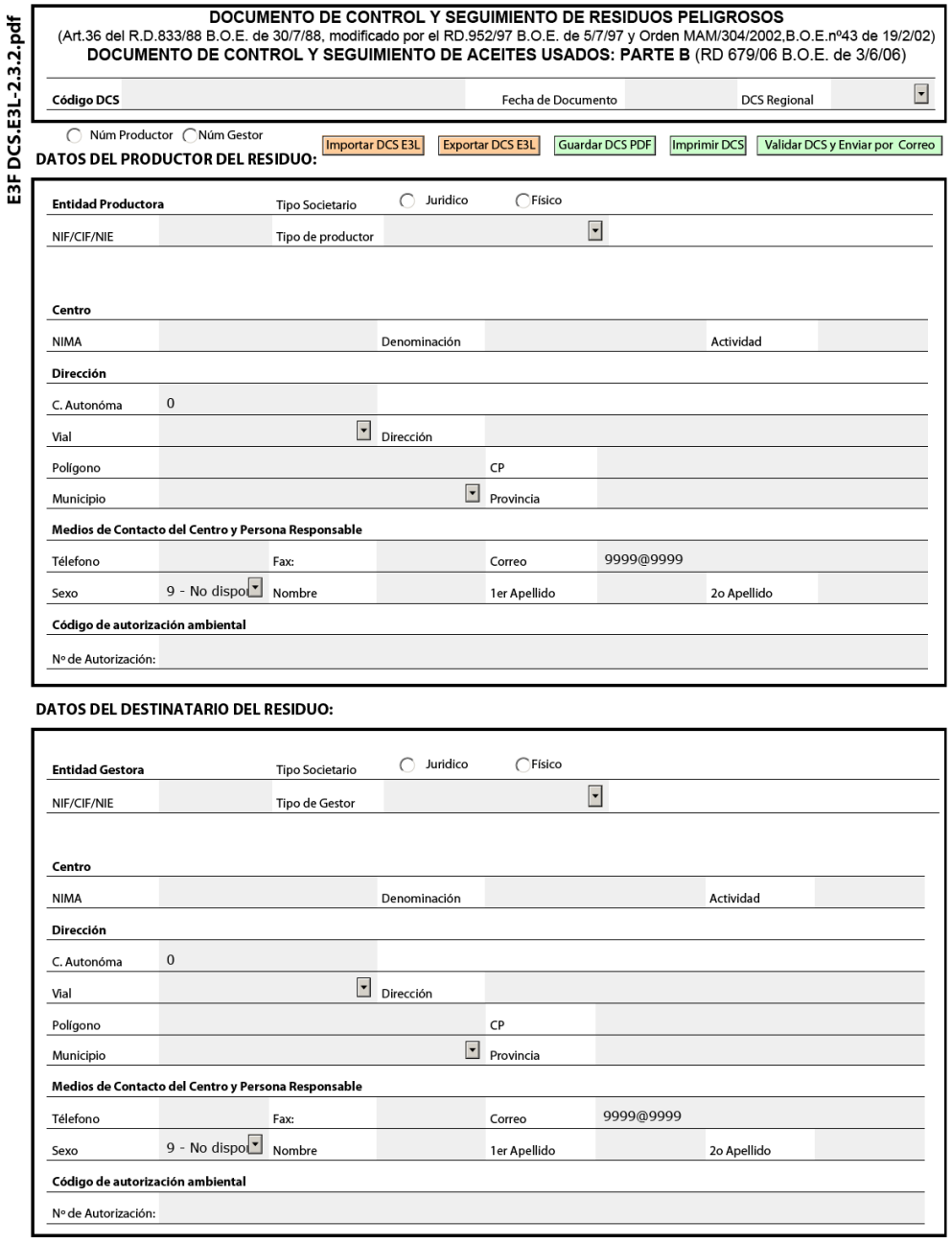
Página 2 (Residuos)

1. Residuos procedentes de la reparación y mantenimiento de todo tipo de vehículos
2. Laboratorios fotográficos, imprenta, edición y artes gráficas
3. Industria de la madera y muebles
4. Construcción. Extracción y fabricación de materiales de construcción
5. Clínicas, hospitales y similares
6. Comercios. Centros comerciales
7. Centros Universitarios, escuelas técnicas, bachilleratos, centros de educación secundaria, laboratorios en general
8. Administraciones Públicas
9. Cuerpos y fuerzas de seguridad del Estado. Defensa nacional
10. Tintorerías, lavanderías, etc
11. Estaciones de servicio
12. Residuos procedentes de servicios de climatización.
13. Agricultura y ganadería
14. Otras actividades

Nota: fotocópiese esta página si es necesario.
Anote un apunte por recogida y Documento de Control y Seguimiento (DCS)

D.4.5. Documento de Seguimiento y Control de Residuos Peligrosos:

Una vez se transfiere la titularidad del R.P. de la planta al gestor autorizado, se formaliza este documento (DCS), en el que constan los datos identificadores del productor, del gestor así como los residuos que se transfieren.



E3F DCS.E3L-2.3.2.pdf

DOCUMENTO DE CONTROL Y SEGUIMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS
(Art.36 del R.D.833/88 B.O.E. de 30/7/88, modificado por el RD.952/97 B.O.E. de 5/7/97 y Orden MAM/304/2002,B.O.E.nº43 de 19/2/02)
DOCUMENTO DE CONTROL Y SEGUIMIENTO DE ACEITES USADOS: PARTE B (RD 679/06 B.O.E. de 3/6/06)

Código DCS | Fecha de Documento | DCS Regional

Núm Productor Núm Gestor | Importar DCS E3L | Exportar DCS E3L | Guardar DCS PDF | Imprimir DCS | Validar DCS y Enviar por Correo

DATOS DEL PRODUCTOR DEL RESIDUO:

Entidad Productora | Tipo Societario: Juridico Físico
NIF/CIF/NIE | Tipo de productor

Centro
NIMA | Denominación | Actividad

Dirección
C. Autonóma: 0
Vial | Dirección
Polígono | CP
Municipio | Provincia

Medios de Contacto del Centro y Persona Responsable
Télefono | Fax: | Correo: 9999@9999
Sexo: 9 - No dispo | Nombre | 1er Apellido | 2o Apellido

Código de autorización ambiental
Nº de Autorización:

DATOS DEL DESTINATARIO DEL RESIDUO:

Entidad Gestora | Tipo Societario: Juridico Físico
NIF/CIF/NIE | Tipo de Gestor

Centro
NIMA | Denominación | Actividad

Dirección
C. Autonóma: 0
Vial | Dirección
Polígono | CP
Municipio | Provincia

Medios de Contacto del Centro y Persona Responsable
Télefono | Fax: | Correo: 9999@9999
Sexo: 9 - No dispo | Nombre | 1er Apellido | 2o Apellido

Código de autorización ambiental
Nº de Autorización:

Además, se hacen 7 copias de 7 colores del DCS, que se enviarán a los siguientes destinatarios, teniendo el gestor que conservarlo al menos 5 años.

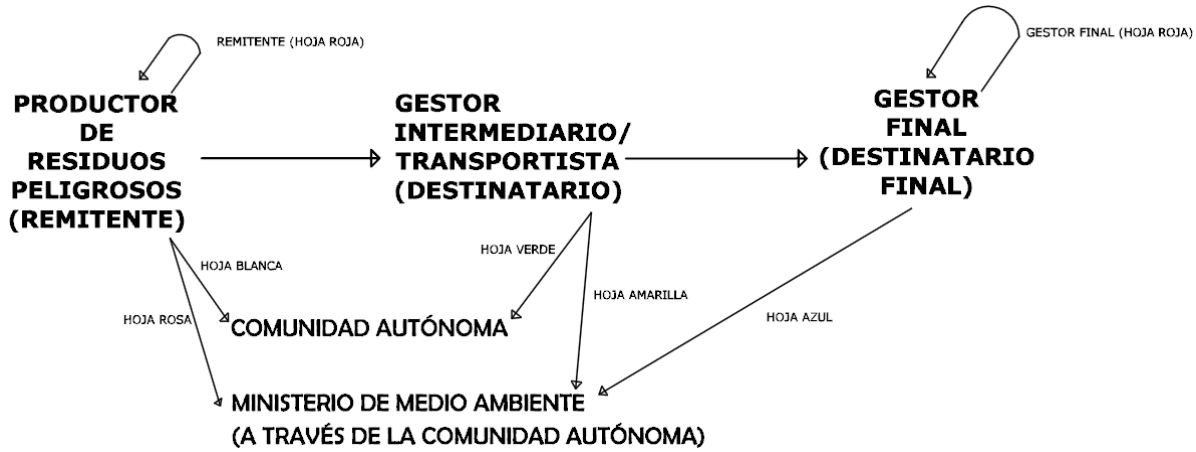
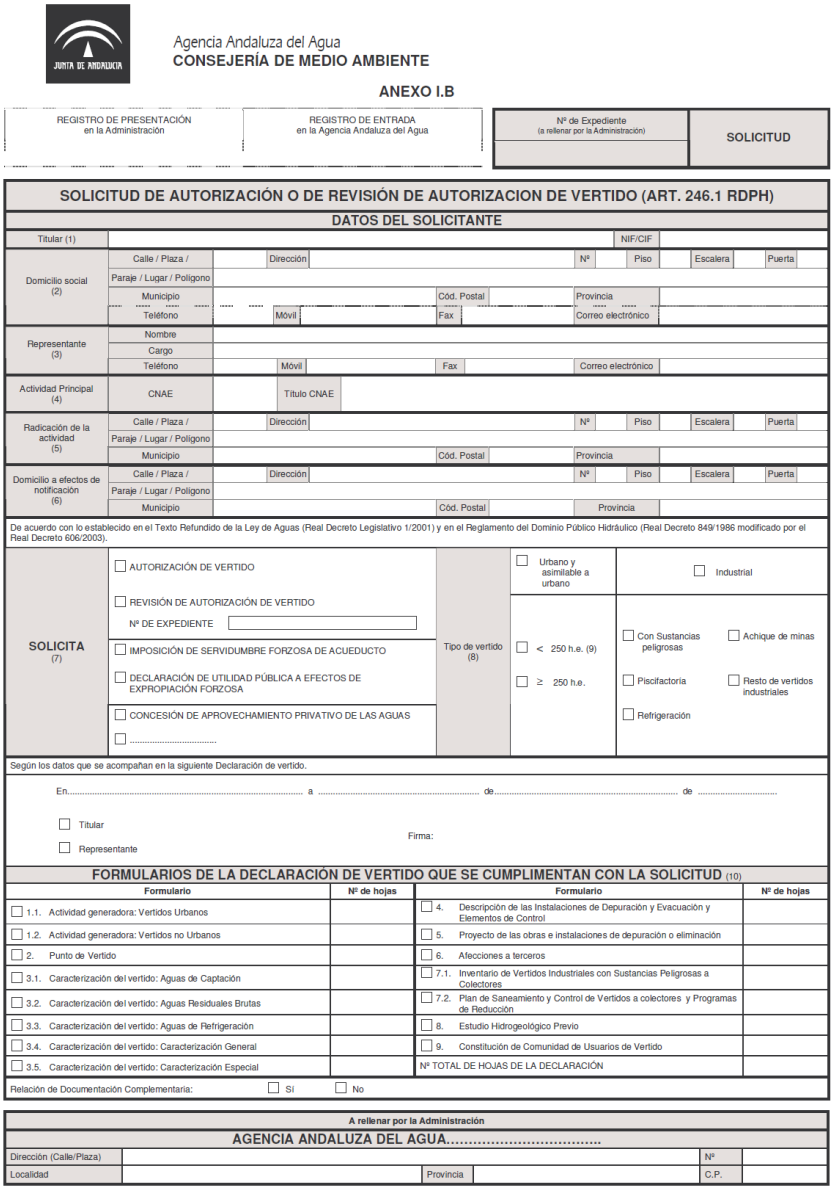


Figura 72 - Esquema itinerario de la documentación DCS.

D.4.6. Solicitud de autorización de vertido de aguas depuradas:

Para poder verter el agua depurada a colector (en caso de alcantarillado) o a Dominio Público Hidráulico (en caso de no haber alcantarillado), la planta debe contar con la autorización de la Agencia Andaluza del Agua, para lo que hay que completar la siguiente documentación.



Agencia Andaluza del Agua
CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE

ANEXO I.B

REGISTRO DE PRESENTACIÓN en la Administración	REGISTRO DE ENTRADA en la Agencia Andaluza del Agua	Nº de Expediente (a rellenar por la Administración)	SOLICITUD

SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN O DE REVISIÓN DE AUTORIZACION DE VERTIDO (ART. 246.1 RDPH)

DATOS DEL SOLICITANTE

Titular (1)								NIF/CIF			
Domicilio social (2)	Calle / Plaza /		Dirección			Nº		Piso		Escalera	Puerta
	Paraje / Lugar / Polígono										
	Municipio				Cód. Postal			Provincia			
	Teléfono		Móvil		Fax			Correo electrónico			
Representante (3)	Nombre										
	Cargo										
	Teléfono		Móvil		Fax			Correo electrónico			
Actividad Principal (4)	CNAE		Título CNAE								
Radicación de la actividad (5)	Calle / Plaza /		Dirección			Nº		Piso		Escalera	Puerta
	Paraje / Lugar / Polígono										
	Municipio				Cód. Postal			Provincia			
Domicilio a efectos de notificación (6)	Calle / Plaza /		Dirección			Nº		Piso		Escalera	Puerta
	Paraje / Lugar / Polígono										
	Municipio				Cód. Postal			Provincia			

De acuerdo con lo establecido en el Texto Refundido de la Ley de Aguas (Real Decreto Legislativo 1/2001) y en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (Real Decreto 849/1986 modificado por el Real Decreto 606/2003).

SOLICITA (7)	☐ AUTORIZACIÓN DE VERTIDO	Tipo de vertido (8)	☐ Urbano y asimilable a urbano	☐ Industrial
	☐ REVISIÓN DE AUTORIZACIÓN DE VERTIDO Nº DE EXPEDIENTE		☐ < 250 h.e. (9)	☐ Con Sustancias peligrosas ☐ Achique de minas
	☐ IMPOSICIÓN DE SERVIDUMBRE FORZOSA DE ACUEDUCTO		☐ ≥ 250 h.e.	☐ Piscifactoría ☐ Resto de vertidos industriales
	☐ DECLARACIÓN DE UTILIDAD PÚBLICA A EFECTOS DE EXPROPIACIÓN FORZOSA			☐ Refrigeración
	☐ CONCESIÓN DE APROVECHAMIENTO PRIVATIVO DE LAS AGUAS ☐			

Según los datos que se acompañan en la siguiente Declaración de vertido.

En..... a ..... de..... de .....

☐ Titular
☐ Representante

Firma:

FORMULARIOS DE LA DECLARACIÓN DE VERTIDO QUE SE CUMPLIMENTAN CON LA SOLICITUD (10)

Formulario	Nº de hojas	Formulario	Nº de hojas
☐ 1.1. Actividad generadora: Vertidos Urbanos		☐ 4. Descripción de las Instalaciones de Depuración y Evacuación y Elementos de Control	
☐ 1.2. Actividad generadora: Vertidos no Urbanos		☐ 5. Proyecto de las obras e instalaciones de depuración o eliminación	
☐ 2. Punto de Vertido		☐ 6. Afecciones a terceros	
☐ 3.1. Caracterización del vertido: Aguas de Captación		☐ 7.1. Inventario de Vertidos Industriales con Sustancias Peligrosas a Colectores	
☐ 3.2. Caracterización del vertido: Aguas Residuales Brutas		☐ 7.2. Plan de Saneamiento y Control de Vertidos a colectores y Programas de Reducción	
☐ 3.3. Caracterización del vertido: Aguas de Refrigeración		☐ 8. Estudio Hidrogeológico Previo	
☐ 3.4. Caracterización del vertido: Caracterización General		☐ 9. Constitución de Comunidad de Usuarios de Vertido	
☐ 3.5. Caracterización del vertido: Caracterización Especial		Nº TOTAL DE HOJAS DE LA DECLARACIÓN	

Relación de Documentación Complementaria: ☐ Sí ☐ No

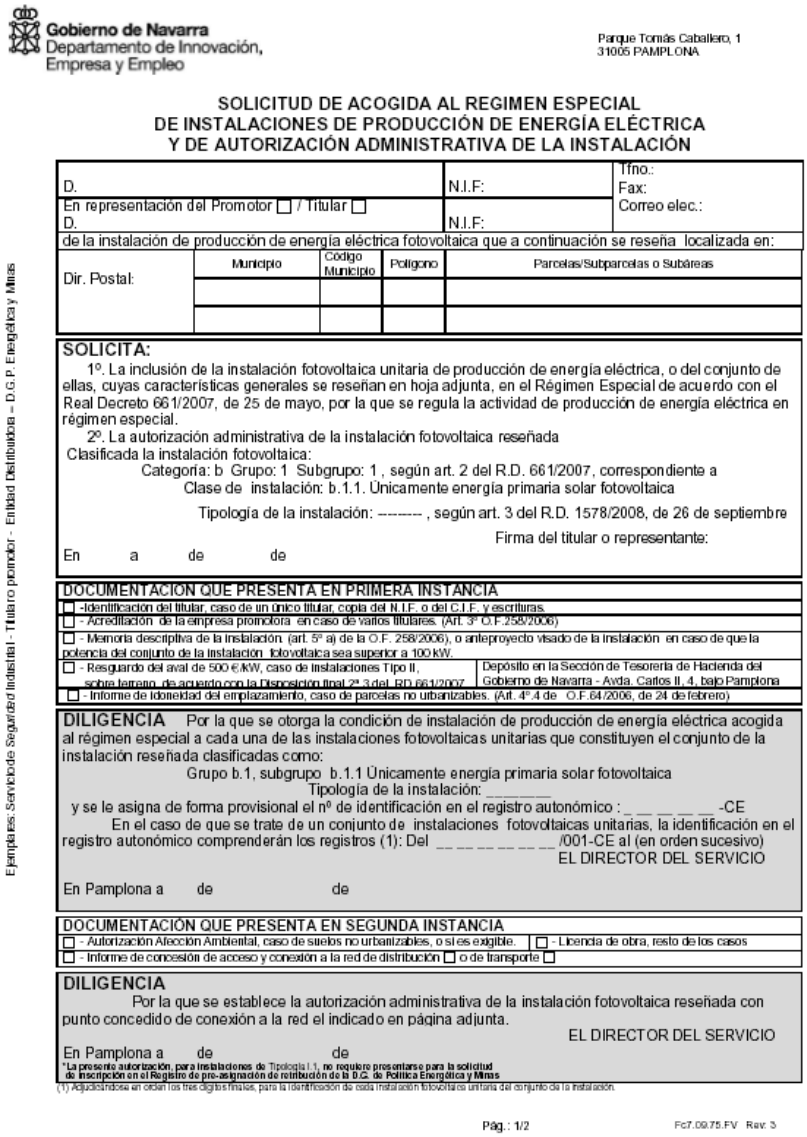
A rellenar por la Administración

AGENCIA ANDALUZA DEL AGUA.....

Dirección (Calle/Plaza)				Nº	
Localidad		Provincia		C.P.	

D.4.7. Solicitud acogida al régimen especial de instalaciones de producción de energía eléctrica y de autorización administrativa de la instalación:

En Andalucía no está desarrollada aún la valorización energética de residuos ni otras actividades susceptibles de acogerse al régimen especial, con lo cual no hay documentación suministrada por la Junta de Andalucía para estos casos. Por tanto, se ha recurrido a emplear una solicitud homóloga de la Comunidad de Navarra.



Gobierno de Navarra
Departamento de Innovación, Empresa y Empleo

Parque Tomás Caballero, 1
31005 PAMPLONA

SOLICITUD DE ACOGIDA AL REGIMEN ESPECIAL DE INSTALACIONES DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y DE AUTORIZACIÓN ADMINISTRATIVA DE LA INSTALACIÓN

D.	N.I.F:	Tfno.: Fax: Correo elec.:
En representación del Promotor ☐ / Titular ☐ D.	N.I.F:	

de la instalación de producción de energía eléctrica fotovoltaica que a continuación se reseña localizada en:

Dir. Postal:	Municipio	Código Municipio	Polígono	Parcelas/Subparcelas o Subáreas

SOLICITA:

1º. La inclusión de la instalación fotovoltaica unitaria de producción de energía eléctrica, o del conjunto de ellas, cuyas características generales se reseñan en hoja adjunta, en el Régimen Especial de acuerdo con el Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por la que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

2º. La autorización administrativa de la instalación fotovoltaica reseñada

Clasificada la instalación fotovoltaica:

Categoría: b Grupo: 1 Subgrupo: 1 , según art. 2 del R.D. 661/2007, correspondiente a

Clase de instalación: b.1.1. Únicamente energía primaria solar fotovoltaica

Tipología de la instalación: -------- , según art. 3 del R.D. 1578/2008, de 26 de septiembre

Firma del titular o representante:

En a de de

DOCUMENTACIÓN QUE PRESENTA EN PRIMERA INSTANCIA

☐ -Identificación del titular, caso de un único titular, copia del N.I.F. o del C.I.F. y escrituras.

☐ - Acreditación de la empresa promotora en caso de varios titulares. (Art. 3º O.F.258/2006)

☐ - Memoria descriptiva de la instalación (art. 5º a) de la O.F. 258/2006), o anteproyecto visado de la instalación en caso de que la potencia del conjunto de la instalación fotovoltaica sea superior a 100 kW.

☐ - Resguardo del aval de 500 €/kW, caso de instalaciones Tipo II, sobre terreno, de acuerdo con la Disposición final 2ª 3 del RD 661/2007 — Depósito en la Sección de Tesorería de Hacienda del Gobierno de Navarra - Avda. Carlos II, 4, bajo Pamplona

☐ - Informe de idoneidad del emplazamiento, caso de parcelas no urbanizables. (Art. 4º.4 de O.F.64/2006, de 24 de febrero)

DILIGENCIA Por la que se otorga la condición de instalación de producción de energía eléctrica acogida al régimen especial a cada una de las instalaciones fotovoltaicas unitarias que constituyen el conjunto de la instalación reseñada clasificadas como:

Grupo b.1, subgrupo b.1.1 Únicamente energía primaria solar fotovoltaica

Tipología de la instalación: _____

y se le asigna de forma provisional el nº de identificación en el registro autonómico : _ __ __ __ __ -CE

En el caso de que se trate de un conjunto de instalaciones fotovoltaicas unitarias, la identificación en el registro autonómico comprenderán los registros (1): Del _ __ __ __ __ __ __ /001-CE al (en orden sucesivo)

EL DIRECTOR DEL SERVICIO

En Pamplona a de de

DOCUMENTACIÓN QUE PRESENTA EN SEGUNDA INSTANCIA

☐ - Autorización Afección Ambiental, caso de suelos no urbanizables, o si es exigible. ☐ - Licencia de obra, resto de los casos

☐ - Informe de concesión de acceso y conexión a la red de distribución ☐ o de transporte ☐

DILIGENCIA

Por la que se establece la autorización administrativa de la instalación fotovoltaica reseñada con punto concedido de conexión a la red el indicado en página adjunta.

EL DIRECTOR DEL SERVICIO

En Pamplona a de de

*La presente autorización, para instalaciones de Tipología I.1, no requiere presentarse para la solicitud de inscripción en el Registro de pre-asignación de retribución de la D.G. de Política Energética y Minas

(1) Adjudicándose en orden los tres dígitos finales, para la identificación de cada instalación fotovoltaica unitaria del conjunto de la instalación.

Ejemplares: Servicio de Seguridad Industrial - Titular promotor - Entidad Distribuidora – D.G.P. Energética y Minas

Pág.: 1/2 Fc7.09.75.FV Rev: 3

D.4.8. Declaración para acceder a cofinanciación mediante el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER):

Es el documento a rellenar para poder a optar según la Orden de 4 de Febrero de 2009 a la subvención por desarrollo energético sostenible en Andalucía.

Hoja 1 de 2

Agencia Andaluza de la Energía
CONSEJERÍA DE ECONOMÍA, INNOVACIÓN Y CIENCIA

Unión Europea

Incentivos para el desarrollo energético sostenible de Andalucía

Andalucía se mueve con Europa

Nº REGISTRO, FECHA y HORA

DECLARACIÓN PARA ACCEDER A COFINANCIACIÓN MEDIANTE EL FONDO EUROPEO DE DESARROLLO REGIONAL (FEDER – tramo nacional)

DATOS DEL EXPEDIENTE	
NÚMERO EXP	DENOMINACION DEL PROYECTO/ACTUACIÓN

DATOS DEL/DE LA SOLICITANTE Y DE SU REPRESENTANTE LEGAL	
NOMBRE O RAZÓN SOCIAL	NIF/CIF/NIE
APELLIDOS Y NOMBRE DEL/DE LA REPRESENTANTE LEGAL (No cumplimentar en caso de que el solicitante sea una personas física)	NIF

En virtud de la participación de la Unión Europea en la financiación del proyecto para el que se solicita un incentivo a través de la Orden de 4 de febrero de 2009, por la que se establecen las bases reguladoras de un programa de incentivos para el desarrollo energético sostenible de Andalucía, y se efectúa su convocatoria para período 2009 - 2014, según se establece en el artículo 6 de sus bases reguladoras, y atendiendo a las medidas de información dirigidas a los beneficiarios potenciales que se recogen en el artículo 5, apartado 2, del Reglamento (CE) núm. 1828/2006 de la Comisión, de 8 de diciembre, así como a lo establecido en el artículo 13, apartado 1, de dicho Reglamento, en cuanto a la capacidad de los beneficiarios,

la persona abajo firmante, bajo su expresa responsabilidad,

DECLARA conocer

1. Que la subvención que se solicita se financiará con fondos procedentes del FEDER dentro del Programa Operativo de Andalucía 2007-2013, mediante cofinanciación con los procedentes de la Junta de Andalucía y de la Administración General del Estado en el marco del Convenio de Colaboración suscrito, con fecha 3 de febrero de 2009, entre la Comunidad Autónoma de Andalucía y el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), para la definición y puesta en práctica de las actuaciones de apoyo público con fondos FEDER en el ámbito territorial de la Comunidad Autónoma de Andalucía.

2. Las condiciones que han de cumplirse para poder acceder a la financiación y los criterios de selección de las operaciones que se van a financiar, según se establecen en los Temas Prioritarios 40, 41 ó 52, según corresponda, del Eje 4 "Trasporte y Energía" del Programa Operativo FEDER de Andalucía 2007-2013, cuyos criterios de selección, en lo referente a las actuaciones a desarrollar por la Administración General del Estado, se encuentran disponibles a través de la página Web de la Agencia Andaluza de la Energía.

3. Las condiciones establecidas en las bases reguladoras de la Orden de 4 de febrero de 2009, y específicamente las exigidas por la participación de la Unión Europea en la financiación del proyecto para el que se solicita el incentivo, que se refieren a los siguientes aspectos:

- Normativa general
- Financiación de los incentivos
- Compatibilidad con otras ayudas
- Requisitos de los proyectos incentivables

D.4.9. Declaración responsable sobre solvencia financiera:

Enmarcado dentro de los incentivos para el desarrollo sostenible de Andalucía, es una declaración de liquidez previa al concurso de concesiones de las subvenciones.

IMPRIMIR

Agencia Andaluza de la Energía
CONSEJERÍA DE ECONOMÍA, INNOVACIÓN Y CIENCIA

Unión Europea

Incentivos para el desarrollo energético sostenible de Andalucía

Andalucía se mueve con Europa

Nº REGISTRO, FECHA y HORA

DECLARACIÓN RESPONSABLE SOBRE SOLVENCIA FINANCIERA

DATOS DEL EXPEDIENTE	
NÚMERO EXP	DENOMINACION DEL PROYECTO/ ACTUACIÓN

DATOS DEL/DE LA SOLICITANTE Y DE SU REPRESENTANTE LEGAL	
NOMBRE O RAZÓN SOCIAL	NIF/CIF/NIE
APELLIDOS Y NOMBRE DEL/DE LA REPRESENTANTE LEGAL	NIF

En relación a la capacidad de la empresa beneficiaria para el mantenimiento de la actividad solicitada, la persona abajo firmante, bajo su expresa responsabilidad,

DECLARA

que la empresa cuyos datos aparecen en el presente documento, no se encuentra en ninguna de las siguientes circunstancias:

a) Tratándose de una sociedad cuyos socios tengan una responsabilidad limitada, que haya perdido más de la mitad de su capital suscrito y haya perdido más de una cuarta parte del mismo en los últimos 12 meses.

b) Tratándose de una sociedad en la que al menos algunos de sus socios tienen una responsabilidad ilimitada sobre la deuda de la empresa, que hayan perdido más de la mitad de sus fondos propios, tal como se indican en los libros de la misma, y se haya perdido más de una cuarta parte de los mismos en los últimos 12 meses.

c) Que reúna las condiciones establecidas en el ordenamiento jurídico para someterse a un procedimiento concursal o que se haya solicitado declaración de concurso, haya sido declarada insolvente en cualquier procedimiento, se encuentre declarada en concurso, esté sujeta a intervención judicial o haya sido inhabilitada conforme a la Ley Concursal sin que haya concluido el periodo de inhabilitación fijado en la sentencia de calificación del concurso, haya sido declarada en quiebra, en concurso de acreedores, insolvente fallido en cualquier procedimiento o sujeto a intervención judicial, o si se ha iniciado expediente de quita y espera o de suspensión de pagos o presentado solicitud judicial de quiebra o de concurso de acreedores.

En..... a ..... de ..... de .....

EL / LA REPRESENTANTE LEGAL

Fdo.: .....
(Firma y sello de la empresa)

ANEXO E:

ASPECTOS AMBIENTALES Y DE SEGURIDAD

Indice:

E.1. Aspectos ambientales.

E.1.1. Descripción de aspectos ambientales……pág. 1

E.1.2. Metodología identificación y evaluación aspectos ambientales……pág. 3

E.1.3. Impactos ambientales……...pág. 7

E.1.4. Medidas correctoras para impactos ambientales negativos…….....pág. 8

E.1.5. Mejoras propuestas para los aspectos ambientales……....pág. 17

E.2. Sistemas de emergencia……..……pág. 18

E.3. Fichas de seguridad de productos generados en la actividad……pág. 21

E.1. Aspectos ambientales:

E.1.1. Descripción de Aspectos Ambientales:

Como en cualquier otra actividad industrial, las acciones, productos o servicios de la planta interaccionan con el medioambiente, positiva y negativamente. Estas interacciones se denominan *aspectos ambientales*. En este apartado se hace un estudio y análisis de los aspectos ambientales más importantes que se generan, y de la valoración se deducirán los *aspectos medioambientales significativos*. Los aspectos ambientales a considerar son:

- Vertidos:
  - Aguas de pretratamiento, se producen por la limpieza de los residuos plásticos que entran en la planta. Estas aguas van a estar mezcladas con tierras, plaguicidas, fertilizantes, grasas-aceites, etc.
  - Aguas mezcladas con hidrocarburos provenientes de la salida del tanque separador de aceites de pirólisis y agua.
  - Aguas grises de limpieza de las instalaciones.
  - Aguas negras de los servicios para el personal y visitantes.
  - Combustibles derramados de camiones y carretillas.
  - Aguas con clorhídrico como consecuencia del funcionamiento del scrubber al tratar residuos de PVC.

- Contaminación del suelo:
  - Alquitranes y aceites que se derraman accidentalmente.
  - Combustibles que se derraman accidentalmente.

- Emisiones atmosféricas:
  - Emisiones de CO_2 y NO_x que surgen de las chimeneas de la cogeneración y el horno, de los camiones y las carretillas.
  - Ruidos generados por la maquinaria, el horno y tránsito de vehículos.

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

- Olores, generados por la acumulación de residuos plásticos que pueden venir impregnados de materia orgánica, pesticidas, plaguicidas, etc., y aquellos derivados de la producción de aceites de pirólisis en las instalaciones.

- Residuos:
  - Residuos no peligrosos:
    - Papel de oficina usado, plástico de oficina u asociado a otra actividad, envases de briks, aluminios, etc.
    - Pilas alcalinas de la oficina.
    - Restos de materia orgánica generados por los trabajadores.
  - Residuos especiales (dentro de los no peligrosos pero con condicionantes especiales en su gestión):
    - Fungibles (tóner, fluorescentes, material eléctrico).
    - Neumáticos estropeados de las carretillas y camiones.
  - Residuos peligrosos:
    - Pilas de plomo generadas en oficina.
    - Trapos impregnados de aceites de mantenimiento de la maquinaria.
    - Aceites refinados artificiales para el buen funcionamiento de la maquinaria.
    - Cenizas generadas por el proceso de pirólisis.
    - Alquitranes que se derramen al ser transportados.
    - Lodos producidos en la depuradora de aguas.

- Consumo de materias primas y recursos naturales: es interesante señalar que en este proyecto la materia prima va a ser lo que en otra industria o actividad se considera como residuo, en este caso los plásticos, con lo cual esto supone un beneficio ambiental.
  - Plásticos (materia prima).
  - Agua para la limpieza de las instalaciones, limpieza de plásticos.
  - Combustibles para el horno, los camiones y las carretillas.
  - Electricidad para el funcionamiento de las instalaciones.

E.1.2. Metodología de identificación y evaluación de aspectos ambientales.

Para estimar qué aspectos ambientales son lo suficientemente significativos como para considerarse *impactos ambientales* se les atribuye una "Significancia", que es la suma de otra serie de variables:

SIGNIFICANCIA = EXTENSIÓN + FRECUENCIA + MAGNITUD + GRAVEDAD

Cuando dicha significancia sea superior a 10, se considera impacto ambiental. Los rangos de las variables utilizadas para el cálculo de la Significancia de los aspectos ambientales se llevan a cabo a través de las siguientes tablas:

	EXTENSIÓN (EXT)		
	BAJA (1)	**MEDIA (2)**	**ALTA (3)**
RESIDUOS	GESTIÓN LOCAL	GESTIÓN PROVINCIAL	GESTOR AUTONÓMICO O SUPERIOR
RESTO	QUEDA EN EXTENSIÓN DE LA EMPRESA	DESDE LA EMPRESA HASTA 2 km.	DESDE 2 Km. EN ADELANTE

	DURACIÓN/FRECUENCIA (DR/FR)		
	BAJA (0)	**MEDIA (1)**	**ALTA (2)**
	1 DÍA A LA SEMANA	DE 2 A 6 DÍAS EN SEMANA	DIARIAMENTE

	MAGNITUD (MAG)			
	REFERENCIA	**BAJA (2)**	**MEDIA (4)**	**ALTA (6)**
EMISIONES DE GASES	EMISIONES CON RESPECTO AL LÍMITE LEGAL	< 60% DEL LÍMITE LEGAL	60-80% DEL LÍMITE LEGAL	>80% DEL LÍMITE LEGAL
RUIDOS	DECIBELIOS	<60 dB	60-100 dB	>100 dB
VERTIDOS	CANTIDAD DE CONTAMINANTE	<5l. / 5kg.	5-15 l. / 5-15 kg.	>15 l. / 15 kg.
CONTAMINACIÓN DEL SUELO	CANTIDAD DE CONTAMINANTE	<5l. / 5kg.	5-15 l. / 5-15 kg.	>15 l. / 15 kg.
RESIDUOS	kg. DE RESIDUOS / t. DE PLÁSTICO	< 1 kg. / t.	1-5 kg./ t.	>5 kg. / t.

	TRATADO			
	kg. DE LODO / 100 l. DE AGUA DE LAVADO DE PLÁSTICO	< 1 kg./ 100 l.	1-15 kg. / 100 l.	>15 kg. /100 l.
CONSUMO DE RECURSOS	VOLUMEN DE AGUA/ kg. DE PLÁSTICO TRATADO	<10 l./kg.	10-20 l./kg.	>20 l./kg.
	VOLUMEN DE CARBURANTE/ kg. DE PLÁSTICO TRATADO			
	W. DE ENERGÍA/ TONELADA DE PLÁSTICO	<200 W./t.	200-500 W./t.	>500 W./t.
	kg. DE RESIDUO RECICLADO/ SEMANA	<75 kg./SEMANA	75-150 kg./SEMANA	>150 kg./SEMANA

	GRAVEDAD (GRAV)		
	BAJA (2)	**MEDIA (4)**	**ALTA (6)**
EMISIONES DE GASES	EMISIONES DIFUSAS DE POLVO Y PARTÍCULAS EMISIONES DE CALOR O RUIDO	EMISIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN (CO, CO2, METANO…)	EMISIONES DE COMPUESTOS TÓXICOS
VERTIDOS	AGUAS DOMÉSTICAS A RED DE SANEAMIENTO	AGUAS RESIDUALES CON DETERGENTES, GRASAS,… A RED SANEAMIENTO	AGUAS RESIDUALES CON SUSTANCIAS PELIGROSAS
CONTAMINACIÓN DEL SUELO	DEPÓSITO DE RSU	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PRODUCTOS DE LIMPIEZA RESIDUOS PELIGROSOS	GASÓLEO PINTURAS Y BARNICES DESINFECTANTES
RESIDUOS	RESIDUOS URBANOS O ASIMILABLES SEPARADOS	RESIDUOS NO RECICLABLES RESIDUOS URBANOS NO SEPARADOS	RESIDUOS PELIGROSOS
CONSUMO DE RECURSOS	CONSUMO RED ELÉCTRICA INFERIOR A 200 W/h CONSUMO DE AGUA REUTILIZADA CONSUMO TOTAL O	CONSUMO RED ELÉCTRICA ENTRE 200 Y 1000 W/h CONSUMO DE AGUA DE RED NO CONTIENEN	CONSUMO RED ELÉCTRICA SUPERIOR A 1.000 W/h CONSUMO ENERGÍA ELECTRICA DE

	PARCIAL DE ENERGÍA RENOVABLE CONSUMO DE COMBUSTIBLES ECOLÓGICOS	SUSTANCIAS PELIGROSAS	GRUPOS ELECTRÓGENOS CONSUMO AGUA SUBTERRÁNEA O SUPERFICIALES CONTIENEN SUSTANCIAS PELIGROSAS CONSUMO DE COMBUSTIBLES FÓSILES

Tabla 53 - Variables de evaluación de la significancia.

En la siguiente tabla se analizan y evalúan los aspectos ambientales del proyecto empleando dicho criterio:

Tipo de Aspecto		Aspecto	Origen	EXT	MAG	DR/FR	GRAV	SIG
Vertidos		Aguas del pretratamiento y Scrubber	Pretratamiento y Producción	2	4	1	6	13
		Aguas del Separador de aceites de alquitrán	Producción	2	4	1	6	13
		Aguas Grises (lavado de utensilios, duchas)	General	2	2	1	4	9
		Aguas Negras (servicios de las oficinas)	Oficinas	2	2	1	2	7
Contaminación del Suelo		Alquitrán	Transporte, Distribución, Almacén	2	2	1	4	9
		Combustibles	Transporte, Mantenimiento	2	2	1	4	9
Emisiones Atmosféricas		Contaminantes de combustión: CO_2, NO_x	Distribución, Transporte, Producción	3	2	1	4	10
		Contaminantes por trazas de HCl: dioxinas y furanos.	Producción	3	4	1	6	14
		Ruido	Distribución, Transporte, Producción	2	4	1	2	9
		Calor	Producción	2	2	1	2	7
		Olores	Almacén	2	2	1	2	7
Residuos	No Peligrosos	Papel y Cartón	Oficinas	1	2	1	2	6
		Plástico, Briks	Oficinas	1	2	1	2	6
		Pilas Alcalinas	Oficinas	1	2	0	4	7
		Materia Orgánica	Oficinas	1	2	1	2	6
		Aluminios	Oficinas	1	2	1	2	6
	Especiales	Fungibles (tóner, fluorescentes, mat. eléctrico…)	General	2	2	0	4	8
		Neumáticos	Transporte, Distribución interna	2	2	0	4	8
	Peligrosos	Pilas de Plomo	Oficinas	1	2	0	6	9
		Trapos impregnados de aceites	Mantenimiento, almacén	2	2	1	6	11
		Aceites	Mantenimiento	2	2	1	6	11
		Cenizas	Producción	2	4	1	6	13
		Envases de Sustancias Peligrosas	Mantenimiento	2	2	0	6	10
		Lodos	Depuradora	2	4	1	6	13
		Alquitranes	Producción	2	4	1	6	13
Consumo de Recursos		Residuos plásticos (materia prima)	Producción	3	4	1	2	10
		Agua	Pretratamiento, Oficinas, Producción	2	2	1	2	7
		Combustible (gasolina, gas natural)	Transporte, Distribución, Producción	2	2	1	4	9
		Electricidad	General	2	4	1	2	9

Tabla 54 – Evaluación de Impactos Ambientales.

E.1.3. Impactos Ambientales:

Los aspectos ambientales significativos encontrados en el análisis anterior van a ser los *impactos ambientales* que genera la actividad de la planta. Son los siguientes:

- Vertidos: de aguas residuales procedentes del pretratamiento, del separador de aceites de pirólisis y del scrubber.

- Emisiones: presencia de dioxinas y furanos por combustión de gases en presencia de gas clorhídrico, así como otros contaminantes tipo NO_x.

- Residuos peligrosos:

    - Las posibles cenizas resultantes del reactor de pirólisis y el ciclón ya que pueden contener restos de aromáticos y PAH's.
    - Lodos de la depuradora por presencia de pesticidas y productos químicos del cultivo y PAH's de la pirólisis.
    - Trapos impregnados con sustancias peligrosas (aceites, etc).
    - Aceites derramados que provienen del mantenimiento de la central y de los vehículos.
    - Fracción pesada de los aceites que se deposita al fondo del separador de aceites pirolíticos.
    - Envases que contenían sustancias peligrosas.

- Consumo de recursos: residuos plásticos como materia prima.

Dentro del conjunto de impactos ambientales, únicamente el consumo de residuos plásticos como materia prima es "positivo" ya que la planta está evitando la presencia de residuos plásticos en los vertederos o la quema de éstos de forma incontrolada.

Otro consumo de recurso con un impacto positivo y que no aparece indicado en la tabla, es la mano de obra, la cual implica una creación de empleo directa, relacionada con la industrialización del proyecto.

E.1.4. Medidas correctoras para impactos ambientales negativos:

Estas medidas correctoras se implantan con el fin de minimizar los impactos ambientales negativos encontrados tras el análisis de los aspectos ambientales generados por las actividades de la planta. Es imposible prevenirlas porque forman parte del proceso, pero pueden atenuarse con una serie de acciones y medidas. Algunas medidas se llevan a cabo en el encuadre técnico de la planta, y otras acciones se realizan gestionando los impactos ya producidos:

- Vertidos:

  - El lavado de residuos plásticos en el pretratamiento: el agua de lavado de los plásticos de origen urbano lleva materia orgánica, carburantes y aceites/grasas; la del lavado de plásticos agrícola lleva tierra, arena, restos vegetales, sustancias plaguicidas, pesticidas y fertilizantes.
  - El tanque separador de aceites y agua: la corriente de agua a la salida de este tanque aún contiene hidrocarburos que no pueden verterse al medio natural. Además también contiene ácido clorhídrico si se gestiona plástico PVC, porque en ese caso los gases de pirólisis llevarán consigo HCl que en el condensador de aceites se disocia en agua para dar el clorhídrico.
  - El Scrubber: se coloca posterior a la condensación de aceites de pirólisis para purificar el gas de pirólisis de vapor de agua pero sobre todo del HCl remanente, en dos etapas. Una de ellas disocia el HCl a clorhídrico con una corriente de agua que debe tratarse.

Si el polígono donde se encuentra la planta dispone de alcantarillado, los vertidos deben cumplir con los parámetros de calidad exigidos por la empresa municipal del agua para verter a colector, que serán los de cualquier Agua Residual Urbana. En cambio, si el polígono no dispone de alcantarillado el vertido deberá cumplir con las exigencias de la normativa del Dominio Público Hidráulico. Por las características de los vertidos mencionados antes, va a ser necesaria de cualquier forma la instalación de una depuradora para que los vertidos cumplan con la normativa.

Ante esto, se propone la instalación de una depuradora de aguas residuales con capacidad suficiente para depurar el caudal de agua que se produce en la instalación. Además, existe una generación de aguas negras y grises que sin ser impactos ambientales deben ser gestionadas. El agua depurada de esta forma se puede recircular toda o parte de ella para su reutilización en los procesos mediante el uso de un circuito cerrado que comunica la depuradora con las tomas de agua. La depuradora debe tener al menos tres etapas en línea:

1º. Etapa de decantación/sedimentación de materia inorgánica (tierra, arena) y flotación de aceites/grasas/hidrocarburos.
2º. Etapa de digestión aerobia de la materia orgánica por fangos activados.
3º. Etapa de tratamiento químico del agua (neutralización del pH, eliminación de fósforo y nitrógeno).

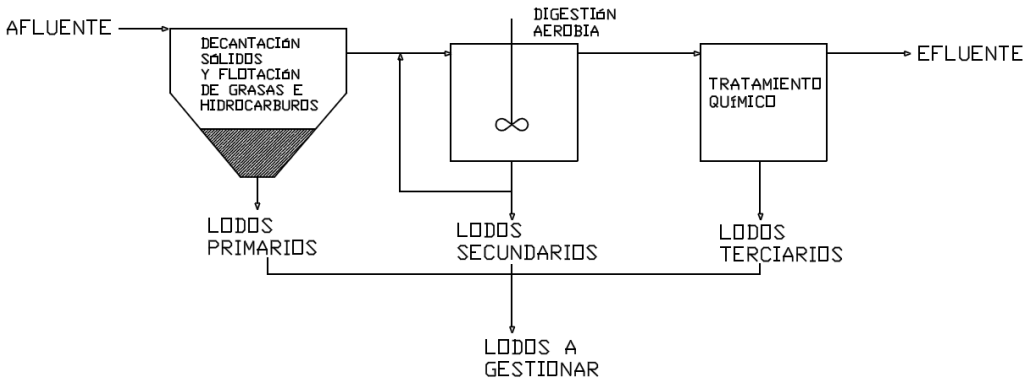


Figura 73 - Esquema de depuración de los vertidos. Elaboración propia.

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

- Emisiones de dioxinas y furanos por presencia de HCl: en el caso de incluir también el PVC entre los residuos plásticos a pirolizar, aunque es un residuo plástico con una tasa de generación mucho menor que el PE y PP al tener un mayor Ciclo de Vida, en las reacciones de craqueo y debido a la presencia del átomo de Cloro se van a producir, además de los hidrocarburos usuales:

  - Acido clorhídrico: su eliminación es necesaria ya que ocasiona a elevadas temperaturas la formación de compuestos clorados de combustión incompleta tales como hidrocarburos volátiles clorados, clorobencenos, clorofenoles o dioxinas y furanos (Lee y col., 1999). Luego, al salir del reactor y contactar con el agua pulverizada de la torre de enfriamiento se disocia rápidamente y pasa a su forma acuosa como ácido clorhídrico, pudiendo dañar conducciones metálicas en ciertas concentraciones.

  - Compuestos aromáticos clorados: formados a temperaturas entre 200-500º C. De todos ellos, las PCDDs y los PCDFs, comúnmente denominados *dioxinas y furanos*, representan el grupo de compuestos de mayor interés medioambiental debido a la elevada toxicidad de algunos de ellos, incluso a muy bajas concentraciones. Son sólidos cristalinos a temperatura ambiente, incoloros, con una alta estabilidad térmica y química. En la pirólisis si se producen dioxinas o furanos precipitarán en la torre de condensación y precipitará en el tanque de separación de aceites.

  Por eso los residuos de PVC es conveniente mezclarlos con gran cantidad de los otros tipos de plásticos, para diluir la generación de dicho ácido, y tras la torre de enfriamiento todos los depósitos de líquidos serán de poliéster reforzado con fibra de vidrio (separador de aceites y depuradora).

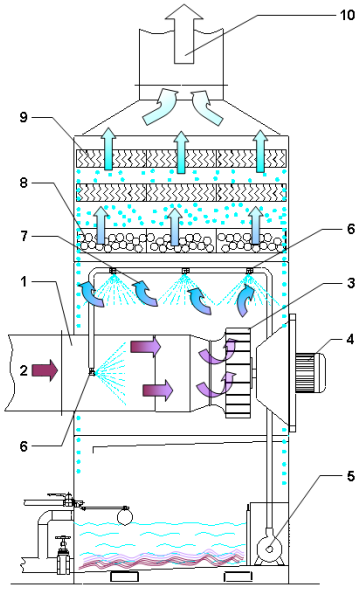
Aún así, el gas de pirólisis sale de la torre de enfriamiento con gas HCl remanente; y como se ha descrito, si se valoriza en la cogeneración puede generar dioxinas y furanos también. Para ello se emplea como Mejor Tecnología Disponible (MTD) un "Scrubber", donde se introduce el gas de pirólisis y pasa por una etapa húmeda y otra seca: la etapa húmeda es similar a la torre de condensación de los alquitranes; el gas circula en contracorriente con agua pulverizada para que siga disociando el resto de HCl en clorhídrico. Luego en la etapa seca los gases pasan por una zona de absorción con cal para que el HCl restante sea eliminado.

$$2HCl(g) + CaCO_3(s) \leftrightarrow CaCl_2(s) + CO_2(g) + H_2O(g)$$

$$2HCl(g) + Ca(OH)_2(s) \leftrightarrow CaCl_2(s) + 2H_2O(s)$$

$$2HCl(g) + CaO(s) \leftrightarrow CaCl_2(s) + H_2O(s)$$

Posteriormente al Scrubber, el gas de salida puede pasarse por un filtro de mangas para retener las partículas que en la etapa seca hayan sido arrastradas con la cal (i.e. cloruro de calcio formado).



1. Abertura de entrada.
2. Entrada del gas a depurar.
3. Ventilador de centrifugación.
4. Motor del ventilador.
5. Bomba de circulación
6. Aberturas para el agua pulverizada.
7. Flujo gas-líquido.
8. Filtro (etapa seca).
9. Condensador de gotas.
10. Salida del gas depurado.

Figura 74- Ejemplo de Scrubber. Fuente: Gemata, equipos de acabado.

- Residuos peligrosos: la mayoría de residuos generados en la planta se encuadran en el apartado 19 del código LER: "Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de agua para consumo humano de agua para uso industrial".

TIPO DE RESIDUO GENERADO	CÓD. LER	DESCRIPCIÓN
Residuos de la incineración o pirólisis de residuos	19 01	19 01 13*: Cenizas volantes que contienen sustancias peligrosas.
		19 01 14: Cenizas volantes distintas de las especificadas en el código 19 01 13.
		19 01 18: Residuos de pirólisis distintos de los especificados en el código 19 01 17.
		19 01 19: Arenas de lechos fluidizados.
Residuos de plantas de tratamiento de aguas residuales, no especificados en otra categoría.	19 08	19 08 02: Residuos de desarenado.
		19 08 13*: Lodos que contienen sustancias peligrosas procedentes de otros tratamientos de aguas residuales industriales.

Tabla 55 - Listado de residuos producidos por código LER.

Los residuos con un asterisco en su código son considerados “residuos peligrosos”, los cuales tienen una normativa y gestión específica:

- Cenizas del reactor: las cenizas son aquellas partículas sólidas que se recogen del reactor, del ciclón o de otras operaciones de postratamiento para evitar que contaminen los productos gaseosos de salida. Están formadas por arena, restos que no se consiguieron eliminar en el pretratamiento, trozos de residuos plásticos no pirolizados, aglomerados de arena y residuos plásticos pastosos, coque, etc.

  Debido a que el residuo plástico se somete a elevadas temperaturas, entre las cenizas también aparecen algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), que son sustancias tóxicas producidas por reacciones radicalarias de deshidrogenación. Por tanto, las cenizas recogidas son consideradas por normativa medioambiental como *residuos peligrosos*. Las medidas correctoras que se proponen para atenuar este impacto son:

  1. Instalar una etapa de pre-tratamiento en el proceso para reducir sustancias indeseables que al calentarse generen cenizas.
  2. Tratamiento para compactar las cenizas ya producidas y disponerlas en “Big bags”, las cuales se traspasarán a un gestor de residuos peligrosos que las transportará a un vertedero de residuos peligrosos.

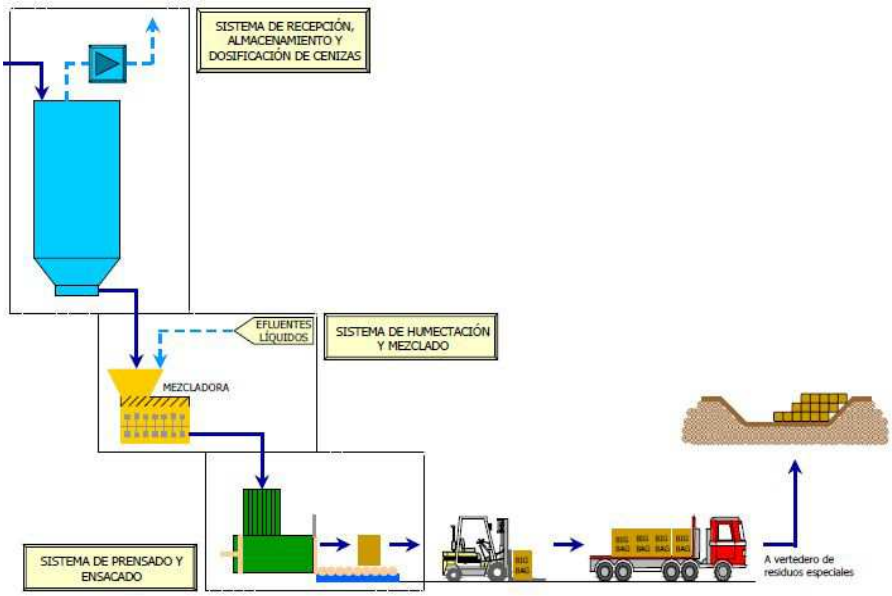


Figura 75 - Esquema del tratamiento de las cenizas.
Fuente: Proceso KOMPACTAT© de RESA.

- Lodos, procedentes de dos focos:

  - Lodos producidos en la depuradora: la depuración de vertidos genera unos lodos que se consideran residuos peligrosos debido al origen de las diferentes actividades del proceso en las que el agua arrastra sustancias peligrosas (hidrocarburos y aceites, pesticidas, plaguicidas, fertilizantes, etc.).

  - Lodos producidos en la condensación de aceites de pirólisis: al salir del reactor, por recombinaciones de tipo radicalarias de los productos gaseosos a temperaturas superiores a 650º C o por degradación del residuo sólido en el interior, pueden formarse una gran variedad de compuestos, entre los que destacan los compuestos aromáticos de un anillo (benceno, tolueno, estireno, etc.), a partir los cuales puede tener lugar la formación de compuestos aromáticos policíclicos (PACs). Estos compuestos, muy estables térmicamente, son el resultado de las reacciones de pirosíntesis (Atal y col., 1997), y se consideran intermedios entre los hidrocarburos ligeros y el hollín, puesto que cuando alcanzan tamaños de varios cientos de umas se unen

mediante fuerzas de coalescencia para formar el hollín. Si los PACs están formados únicamente por hidrógeno y carbono son denominados PAHs (hidrocarburos poliaromáticos).

Dichos PAHs son sólidos a temperatura ambiente, y tienen una gran importancia medioambiental debido a su elevada toxicidad. Cuando se introduce el gas de pirólisis en la torre de condensación se solidifican formando una pasta o cera sólida que cae con los aceites y en el separador de aceites se deposita en la zona de decantación. No tiene aplicación práctica pues la pasta tiene una gran cantidad de PAHs y en pequeñas concentraciones, luego se tratará como un “lodo peligroso”.

Ambos tipos de lodos llevan aún gran cantidad de agua, por lo que parte de ellos se pueden emplear para mezclarse con las cenizas del proceso de pirólisis y formar la pasta antes de introducirse en los “big bags”.

El resto de lodos generados deben entregarse a un gestor autorizado, pero para facilitar su almacenamiento y posterior transporte antes se les realiza una deshidratación a través de procedimientos mecánicos (centrifugación), o naturales aprovechando el espacio en la parcela para crear balsas de evaporación del agua. Debido a las dificultades de autorización que conllevan un tratamiento natural y su bajo volumen de gestión, es preferible emplear el procedimiento mecánico.

Una vez que los lodos salen del centrifugador, ya tienen la consistencia suficiente para almacenarlos en bidones y serán identificados con etiquetas para su posterior traslado, realizado por el gestor autorizado.

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

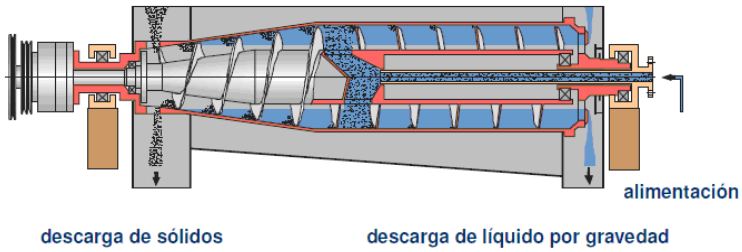


Figura 76 - Centrifugadora de lodos. Fuente: BEFESA.

- Envases de residuos peligrosos: son aquellos empleados para contener sustancias peligrosas. Los envases que sean de plástico de polietileno o polipropileno se limpian en la propia planta y se pueden añadir como materia prima.

- Otros residuos peligrosos: son aquellos generados por actividades genéricas en el funcionamiento de las instalaciones:

  - Derrames de aceites de mantenimiento y/o de los vehículos. Se proponen como medidas correctoras:

    1. Manual de buenas prácticas para los operarios.
    2. En el caso de que se produzcan derrames se recogen con trapos y con agua. Los trapos impregnados los gestiona un gestor autorizado de residuos peligrosos, en el caso de las aguas contaminadas se tratan en la depuradora de la planta.

  - Trapos manchados de aceites y disolventes. Se propone:

    1. Utilizar disolventes reutilizables y no contaminantes.
    2. Implantar un programa de sensibilización ambiental para los operarios de la empresa.
    3. Gestión de los trapos por gestor autorizado.

E.1.5. Mejoras propuestas para los aspectos ambientales:

Aparte de las medidas correctoras de los aspectos ambientales significativos negativos se hace una serie de propuestas para minimizar otros aspectos ambientales negativos, aunque sean de menor relevancia (es decir, que han dado un valor menor que 10 en la significancia ambiental):

- Gases de combustión: procedente de los tubos de escape de los camiones de transporte de residuos plásticos y de las carretillas que llevan los palés, los posibles escapes de los diferentes procesos, etc. Pero si hay dos remarcables son las chimeneas del horno y la cogeneración. En ambos equipos hay una combustión, y los gases generados producen un caudal muy grande de gases de efecto invernadero y partículas que implican un impacto ambiental. Las medidas a tomar son:

  1. Estos equipos se adquirirán con filtros en sus chimeneas que captarán la mayor parte de partículas sólidas, y se les acoplará una medición en continuo a la salida que permite determinar cuándo la curva de rendimiento fluctúa por fugas o averías.

  2. Puntos de medida y control las chimeneas: de los sistemas de combustión del gas de pirólisis, tanto si se utiliza dentro de la propia instalación para satisfacer las necesidades energéticas propias del proceso como para realizar una valorización energética mediante su combustión. En las autorizaciones podrían contemplarse peculiaridades específicas sobre la localización de los puntos de medición y muestreo de este tipo de instalaciones, de acuerdo con el artículo 14.4 del Real Decreto 653/2003.

     Las reglas sobre mediciones y periodicidad son las generales previstas en los artículos 15 y 16 del Real Decreto 653/2003, en los que se contemplan algunas posibilidades de excepciones.

3. Plantación de árboles en los bordes de la parcela en los terrenos libres, para compensar las emisiones de CO_2 que se generan.

- Olores: aunque la planta se sitúa en un polígono industrial alejado de núcleos de población y reservas naturales, en ciertas actividades se pueden producir emanaciones desagradables para los trabajadores, por ejemplo los olores del aceite de pirólisis, el almacenamiento de palés de residuos plásticos o la depuradora. Se proponen como medidas:

  1. Cubrir los residuos plásticos almacenados por un techado; así se evitan incendios por calentamiento y la propagación de olores a los alrededores de la planta.
  2. Utilización de mascarillas para los trabajadores dedicados a las tareas en la producción de aceites pirolíticos y en la depuradora.

- Ruidos: proceden sobre todo de los procesos de triturado, secado, horno y cogeneración. Para disminuir la contaminación acústica las acciones que se toman son el aislamiento de las oficinas y las zonas comunes con la instalación de cabinas modulares de protección acústica y el empleo de protectores auditivos para los trabajadores de planta.

E.2. Sistemas de emergencia:

En el desarrollo de una actividad industrial pueden darse situaciones peligrosas para el medio ambiente y los trabajadores de la planta. En este apartado se contemplan todas estas posibles situaciones y las medidas a adoptar en estas circunstancias. A continuación se definen:

- **Avería mecánica:** mal funcionamiento de la maquinaria o material eléctrico utilizado en las instalaciones. Puede derivar en problemas eléctricos, parada de la actividad, fuga de gases, vertidos, accidentes laborales, etc. Para ello,

la empresa cuenta con un equipo de mantenimiento que minimiza la posibilidad de que estos riesgos se conviertan en accidentes y se cumplen protocolos de revisión de la maquinaria por parte de operarios especializados. Además, existen varios puntos "pulmón" en la planta: el almacenamiento de palés de residuos plásticos, el uso de varias cogeneradoras y el almacén de aceites de pirólisis. Esto permite seguir recibiendo materias primas y produciendo a pesar de que el proceso pare cortos periodos de tiempo.

En caso de que las cogeneradoras dejasen de funcionar o existiera cualquier problema en el tratamiento-postratamiento que produjera por accidente o necesidad la liberación de gases de pirólisis, debe existir en la planta una antorcha en el proceso. También se emplea para purgar el gas que puedan haber en el sistema, y debe tener una alimentación auxiliar de otro combustible (i.e. gas natural) para asegurar la completa combustión de los gases de salida.

- **Vertido accidental:** se contempla la posibilidad de verter accidentalmente en la red de saneamiento productos químicos derivados de la actividad y utilizados en el mantenimiento de la maquinaria. Con la instalación de una depuradora de aguas residuales se puede hacer frente a un fallo accidental de vertido. Aún así, en el supuesto de que esto sucediera:

  - La persona responsable del vertido accidental deberá informar en la mayor brevedad posible al responsable de calidad.
  - Informar al organismo competente de la red de saneamiento.

- **Incendio:** tanto las materias primas como los productos generados tienen gran poder calorífico y por tanto son inflamables: residuos plásticos, aceites pirolíticos, gases, etc. Por tanto existe el riesgo de incendio, siendo los lugares con aparatos eléctricos y la maquinaria los más vulnerables. Existen dos tipos de planes de emergencia y evacuación de edificios:

- Plan de emergencia interior: tiene por objetivo la actuación en caso de emergencia en el interior del recinto de la empresa.
- Plan de emergencia exterior: tiene por objetivo la coordinación de las actuaciones a llevar a cabo en el caso de que la situación de emergencia pueda comprender áreas mayores que el recinto de la empresa. Su elaboración corresponde a las autoridades competentes según la legislación vigente; bomberos, protección civil y policía municipal.

Para la elaboración del plan de emergencia interior existe el Real Decreto 393/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de Autoprotección de los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia, por la que se aprueba el Manual de autoprotección. Por ello, en caso de incendio cada individuo deberá:

- Al oír la señal de evacuación por megafonía o a través del responsable de evacuación de la oficina, prepararse para abandonar el centro.
- Desconectar los aparatos electrónicos si se pudiera.
- Si se encuentra con alguna visita, acompañarla hasta el exterior.
- Evacuar las instalaciones rápidamente.
- No volver al centro de trabajo a recoger los objetos personales.
- Dirigirse al punto de encuentro establecido por la empresa y nunca pararse junto a las salidas de emergencia.

Según el Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio (DB-SI), las instalaciones de la empresa deben contar con las medidas adecuadas de construcción y señalización. Entre las medidas pasivas cuenta con la propia estructura del edificio y la señalización de las salidas de emergencias. En cuanto a las medidas activas, cuenta en sus instalaciones con dispositivos de extinción de incendios tales como extintores y bocas de incendios debidamente señalizadas, así como detectores de humo y alarma. Además,

el DB-SI establece una serie de pautas a la hora de actuar ante un incendio. Éstas deben esquematizarse y ubicarlas en cada uno de los departamentos a disposición de los trabajadores.

Otro aspecto a destacar es que se realizará al menos un simulacro de incendio al año para todo el personal de la planta.

- **Fuga de gases inflamables:** el horno utiliza un gas inflamable como combustible, y los gases de hidrocarburos ligeros producidos en planta también son inflamables. Para saber cómo reaccionar en caso de fuga el personal de planta debe recibir cursos de seguridad, por ejemplo:

  - Mantenerse del lado desde donde sopla el viento.
  - Cerrar la llave de corte del depósito y la general situada normalmente a la entrada de la instalación.
  - Suprimir toda fuente de ignición.
  - No accionar ningún interruptor o aparato eléctrico cercano a la fuga o posible fuga.
  - Abrir puertas y ventanas para ventilar bien la instalación.
  - En caso de fuga importante evacuar la instalación y avisar a protección civil, para que advierta a las poblaciones cercanas con el objeto de que sus habitantes permanezcan dentro de sus casas con puertas y ventanas cerradas.

E.3. Fichas de seguridad de algunos productos generados en la actividad:

1º. Aceite ligero de pirólisis.
2º. Ácido clorhídrico (gas).

Light Pyrolysis Oil

Version 1.4 Revision Date 2011-09-01

1. IDENTIFICATION OF THE SUBSTANCE/MIXTURE AND OF THE COMPANY/UNDERTAKING

Product information

Trade name : Light Pyrolysis Oil
Material : 1037438, 1037439

Company : Chevron Phillips Chemical Company LP
10001 Six Pines Drive
The Woodlands, TX 77380

Local : Chevron Phillips Chemical Int'l Inc.
3 Lockhart Road
Wanchai, Honk Kong

Product Information:
MSDS Requests: 852-29784899
Technical Information: 852-29784804
Responsible Party: Product Safety Group
Email:msds@cpchem.com

Emergency telephone:

Health:
866.442.9628 (North America)
1.832.813.4984 (International)
Transport:
North America: CHEMTREC 800.424.9300 or 703.527.3887
Asia: +800 CHEMCALL (+800 2436 2255) China: 0532.8388.9090
EUROPE: BIG +32.14.584545 (phone) or +32.14583516 (telefax)
Chemcare Asia: Tel: +65 6848 9048 - Mob: +65 8382 9188 - Fax: +65 6848
South America SOS-Cotec Inside Brazil: 0800.111.767 Outside Brazil: +55.19.3467.1600

Responsible Department : Product Safety and Toxicology Group
E-mail address : MSDS@CPChem.com
Website : www.CPChem.com

2. HAZARDS IDENTIFICATION

GHS-Classification

: Acute toxicity, Category 5, Oral
Acute toxicity, Category 5, Dermal
Acute toxicity, Category 3, Inhalation
Skin irritation, Category 2
Acute aquatic toxicity, Category 2

GHS-Labeling

Symbol(s) :

Signal Word : Danger

Hazard Statements : H303: May be harmful if swallowed.
H313: May be harmful in contact with skin.
H315: Causes skin irritation.
H331: Toxic if inhaled.
H401: Toxic to aquatic life.

Precautionary Statements : **Prevention:**
P261: Avoid breathing dust/fume/gas/mist/vapors/spray.
P264: Wash skin thoroughly after handling.
P271: Use only outdoors or in a well-ventilated area.
P273: Avoid release to the environment.
P280: Wear protective gloves.
Response:
P302 + P352: IF ON SKIN: Wash with plenty of soap and water.
P304 + P340: IF INHALED: Remove victim to fresh air and keep at rest in a position comfortable for breathing.
P311: Call a POISON CENTER or doctor/ physician.
P321: Specific treatment (see supplemental first aid instructions on this label).
P332 + P313: If skin irritation occurs: Get medical advice/ attention.
P362: Take off contaminated clothing and wash before reuse.
Storage:
P403 + P233: Store in a well-ventilated place. Keep container tightly closed.
P405: Store locked up.
Disposal:
P501: Dispose of contents/ container to an approved waste disposal plant.

3. COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

Synonyms : Light Fuel Oil
Light Pyrolysis Gasoline
LPO
LFO

Molecular formula : UVCB

Chemical Name	CAS-No. / EINECS-No.	Concentration [wt%]
Steam Cracked Petroleum Distillate C10-C12	68477-40-7	100
Naphthalene	91-20-3	0,1 - 80
Indene	95-13-6	1 - 5
Ethylbenzene	100-41-4	1 - 5
Benzene, dimethyl-	1330-20-7	1 - 5
Cumene	98-82-8	0 - 1

4. FIRST AID MEASURES

General advice	:	Move out of dangerous area. Consult a physician. Show this material safety data sheet to the doctor in attendance. Symptoms of poisoning may only appear several hours later. Do not leave the victim unattended.
If inhaled	:	Call a physician or poison control center immediately. Move to fresh air. If unconscious place in recovery position and seek medical advice.
In case of skin contact	:	If skin irritation persists, call a physician. If on skin, rinse well with water. If on clothes, remove clothes.
In case of eye contact	:	Flush eyes with water as a precaution. Remove contact lenses. Protect unharmed eye. Keep eye wide open while rinsing. If eye irritation persists, consult a specialist.
If swallowed	:	Keep respiratory tract clear. Do NOT induce vomiting. Do not give milk or alcoholic beverages. Never give anything by mouth to an unconscious person. Take victim immediately to hospital.

5. FIRE-FIGHTING MEASURES

Flash point	:	60 - 93,3 °C (140 - 199,9 °F)
Autoignition temperature	:	340 °C (644 °F)
Suitable extinguishing media	:	Dry chemical. Carbon dioxide (CO2). Alcohol-resistant foam.
Unsuitable extinguishing media	:	High volume water jet.
Specific hazards during fire fighting	:	Do not allow run-off from fire fighting to enter drains or water courses.
Special protective equipment for fire-fighters	:	Wear self contained breathing apparatus for fire fighting if necessary.
Further information	:	Collect contaminated fire extinguishing water separately. This must not be discharged into drains. Fire residues and contaminated fire extinguishing water must be disposed of in accordance with local regulations. For safety reasons in case of fire, cans should be stored separately in closed containments. Use a water spray to cool fully closed containers.
Fire and explosion protection	:	Do not spray on an open flame or any other incandescent material. Take necessary action to avoid static electricity discharge (which might cause ignition of organic vapors). Keep away from open flames, hot surfaces and sources of ignition.
Hazardous decomposition	:	No data available.

products

6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

Personal precautions	:	Use personal protective equipment. Ensure adequate ventilation. Remove all sources of ignition. Evacuate personnel to safe areas. Beware of vapors accumulating to form explosive concentrations. Vapors can accumulate in low areas.
Environmental precautions	:	Prevent product from entering drains. Prevent further leakage or spillage if safe to do so. If the product contaminates rivers and lakes or drains inform respective authorities.
Methods for cleaning up	:	Contain spillage, and then collect with non-combustible absorbent material, (e.g. sand, earth, diatomaceous earth, vermiculite) and place in container for disposal according to local / national regulations (see section 13).

7. HANDLING AND STORAGE

Handling

Advice on safe handling	:	Avoid formation of aerosol. Do not breathe vapors/dust. Avoid exposure - obtain special instructions before use. Avoid contact with skin and eyes. For personal protection see section 8. Smoking, eating and drinking should be prohibited in the application area. Take precautionary measures against static discharges. Provide sufficient air exchange and/or exhaust in work rooms. Open drum carefully as content may be under pressure. Dispose of rinse water in accordance with local and national regulations.
Advice on protection against fire and explosion	:	Do not spray on an open flame or any other incandescent material. Take necessary action to avoid static electricity discharge (which might cause ignition of organic vapors). Keep away from open flames, hot surfaces and sources of ignition.

Storage

Requirements for storage areas and containers	:	Prevent unauthorized access. No smoking. Keep container tightly closed in a dry and well-ventilated place. Containers which are opened must be carefully resealed and kept upright to prevent leakage. Observe label precautions. Electrical installations / working materials must comply with the technological safety standards.

8. EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION

Ingredients with workplace control parameters

CN

Ingredients	Basis	Value	Control parameters	Note
Naphthalene	CN OEL	PC-TWA	50 mg/m3	G2B, Skin,
	CN OEL	PC-STEL	75 mg/m3	G2B, Skin,
Ethylbenzene	CN OEL	PC-TWA	100 mg/m3	G2B,

	CN OEL	PC-STEL	150 mg/m3	G2B,
o-Xylene	CN OEL	PC-TWA	50 mg/m3	
	CN OEL	PC-STEL	100 mg/m3	
m-xylene	CN OEL	PC-TWA	50 mg/m3	
	CN OEL	PC-STEL	100 mg/m3	
p-Xylene	CN OEL	PC-TWA	50 mg/m3	
	CN OEL	PC-STEL	100 mg/m3	
Benzene, dimethyl-	CN OEL	PC-TWA	50 mg/m3	
	CN OEL	PC-STEL	100 mg/m3	
Dicyclopentadiene	CN OEL	PC-TWA	25 mg/m3	

G2B Possibly carcinogenic to humans
Skin Skin

Engineering measures

Adequate ventilation to control airborned concentrations below the exposure guidelines/limits. Consider the potential hazards of this material (see Section 2), applicable exposure limits, job activities, and other substances in the work place when designing engineering controls and selecting personal protective equipment. If engineering controls or work practices are not adequate to prevent exposure to harmful levels of this material, the personal protective equipment listed below is recommended. The user should read and understand all instructions and limitations supplied with the equipment since protection is usually provided for a limited time or under certain circumstances.

Personal protective equipment

Respiratory protection : In the case of vapor formation use a respirator with an approved filter. Wear a supplied-air NIOSH approved respirator unless ventilation or other engineering controls are adequate to maintain minimal oxygen content of 19.5% by volume under normal atmospheric pressure. Wear a NIOSH approved respirator that provides protection when working with this material if exposure to harmful levels of airborne material may occur, such as:. Full-Face Supplied-Air Respirator. Use a positive pressure, air-supplying respirator if there is potential for uncontrolled release, exposure levels are not known, or other circumstances where air-purifying respirators may not provide adequate protection.

Hand protection : The suitability for a specific workplace should be discussed with the producers of the protective gloves. Please observe the instructions regarding permeability and breakthrough time which are provided by the supplier of the gloves. Also take into consideration the specific local conditions under which the product is used, such as the danger of cuts, abrasion, and the contact time. Gloves should be discarded and replaced if there is any indication of degradation or chemical breakthrough.

Eye protection : Eye wash bottle with pure water. Tightly fitting safety goggles.

Skin and body protection : Choose body protection in relation to its type, to the concentration and amount of dangerous substances, and to the specific work-place. Wear as appropriate:. Flame retardant antistatic protective clothing. Workers should wear antistatic footwear. Footwear protecting against chemicals. Personal protection through wearing a tightly closed chemical protection suit and a self-contained breathing apparatus.

Hygiene measures : Avoid contact with skin, eyes and clothing. When using do not eat or drink. When using do not smoke. Wash hands before breaks and immediately after handling the product.

9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

Information on basic physical and chemical properties

Appearance

Physical state	:	Liquid
Color	:	Blue green

Safety data

Flash point	:	60 - 93,3 °C (140 - 199,9 °F)
Lower explosion limit	:	No data available
Upper explosion limit	:	No data available
Oxidizing properties	:	No
Autoignition temperature	:	340 °C (644 °F)
Molecular formula	:	UVCB
Molecular Weight	:	Not applicable
pH	:	Not applicable
Freezing point	:	7 °C (45 °F)
Pour point		No data available
Boiling point/boiling range	:	170 °C (338 °F)
Vapor pressure	:	No data available
Relative density	:	0,95, 15,6 °C(60,1 °F)
Water solubility	:	Insoluble
Partition coefficient: n-octanol/water	:	No data available
Viscosity, kinematic	:	No data available
Relative vapor density	:	No data available
Evaporation rate	:	< 0,1
Percent volatile	:	5,4 %

10. STABILITY AND REACTIVITY

Possibility of hazardous reactions

Conditions to avoid	:	Heat, flames and sparks.
Materials to avoid	:	May react with oxygen and strong oxidizing agents, such as chlorates, nitrates, peroxides, etc.

Other data : This material is considered stable under normal ambient and anticipated storage and handling conditions of temperature and pressure.
No decomposition if stored and applied as directed.

11. TOXICOLOGICAL INFORMATION

Light Pyrolysis Oil
Acute oral toxicity : LD50: 2.890 mg/kg
Species: rat

Light Pyrolysis Oil
Acute inhalation toxicity : LC50: > 5 mg/l
Exposure time: 4 HR
Species: rat

Light Pyrolysis Oil
Acute dermal toxicity : LC50: > 2.000 mg/kg
Species: rabbit
Information given is based on data obtained from similar substances.

Light Pyrolysis Oil
Skin irritation : Irritating to skin.

Light Pyrolysis Oil
Eye irritation : No eye irritation

Light Pyrolysis Oil
Sensitization : Did not cause sensitization on laboratory animals. Information refers to the main ingredient.

Repeated dose toxicity

Benzene, dimethyl- : Species: rat
Application Route: oral gavage
Dose: 0, 62.5, 125, 250, 500, 100...
Exposure time: 13 wk
Number of exposures: daily, 5 d/wk
NOEL: 1.000 mg/kg

Species: rat
Application Route: Inhalation
Dose: 0, 180, 460, 810 ppm
Exposure time: 13 wk
Number of exposures: 6 h/d, 5 d/wk
NOEL: > 810 ppm

Species: rat
Application Route: Inhalation
Dose: 0, 450, 900, 1800 ppm
Exposure time: 13 wk
Number of exposures: 6 h/d, 6 d/wk
Lowest observable effect level: 900 ppm

Cumene

Species: rat
Application Route: Inhalation
Dose: 0, 50, 100, 500, 1200 ppm
Exposure time: 13 wk
Number of exposures: 6 h/d, 5 d/wk
NOEL: 100 ppm
Lowest observable effect level: 500 ppm
Target Organs: Kidney

Species: rat
Application Route: oral gavage
Dose: 0, 154, 462, 769 mg/kg
Exposure time: 6 mo
Number of exposures: once/day, 5 times/wk
NOEL: 154 mg/kg
Lowest observable effect level: 462 mg/kg

Carcinogenicity

Naphthalene : Species: mouse
Sex: male
Dose: 10, 30 ppm
Exposure time: 2 yrs

Species: mouse
Sex: female
Dose: 10, 30 ppm
Exposure time: 2 yrs
Remarks: increased incidence of alveolar/bronchiolar adenomas

Species: rat
Sex: male
Dose: 10, 30, 60 ppm
Exposure time: 2 yrs

Species: rat
Sex: female
Dose: 10, 30, 60 ppm
Exposure time: 2 yrs

Benzene, dimethyl-

Species: rat
Dose: 0, 250, 500 mg/kg
Exposure time: 103 wks
Number of exposures: 5 d/wk

Remarks: No evidence of carcinogenicity

Species: mouse
Dose: 0, 500, 1000 mg/kg
Exposure time: 103 wks
Number of exposures: 5 d/wk
Remarks: No evidence of carcinogenicity

Cumene

Species: rat
Sex: male
Dose: 0, 250, 500, 1000 ppm
Exposure time: 2 yrs
Number of exposures: 6 h/d, 5d/wk
Remarks: nose respiratory epithelial adenoma

Species: rat
Sex: female
Dose: 0, 250, 500, 1000 ppm
Exposure time: 2 yrs
Number of exposures: 6 h/d, 5d/wk
Remarks: nose respiratory epithelial adenoma

Species: rat
Sex: male
Dose: 0, 250, 500, 1000 ppm
Exposure time: 2 yrs
Number of exposures: 6 h/d, 5d/wk
Remarks: renal tubule adenoma or carcinoma

Species: mouse
Sex: male
Dose: 0, 250, 500, 1000 ppm
Exposure time: 2 yrs
Number of exposures: 6 h/d, 5d/wk
Remarks: non-neoplastic lesions in lung, nose, liver and forestomach

Species: mouse
Sex: female
Dose: 0, 125, 250, 500 ppm
Exposure time: 2 yrs
Number of exposures: 6 h/d, 5d/wk
Remarks: non-neoplastic lesions in lung and nose

Teratogenicity

Naphthalene : Species: rabbit
Application Route: oral gavage
Dose: 40, 200, 400 mg/kg
Test period: 29 d, GD 6-18
NOAEL Teratogenicity: 400 mg/kg

Benzene, dimethyl-

Species: rat
Application Route: Inhalation
Dose: 0, 805, 1610 ppm
Number of exposures: 6 h/d
Test period: GD 7-16
NOAEL Maternal: 1610 ppm

	Species: mouse Application Route: oral gavage Dose: 0, 780, 1960, 2619 mg/kg Number of exposures: 3 times/d Test period: GD 6-15 NOAEL Teratogenicity: 780 mg/kg NOAEL Maternal: 780 mg/kg
Cumene	Species: rat Application Route: Inhalation Dose: 0, 100, 500, 1200 ppm Number of exposures: 6 h/d Test period: GD 6-15 NOAEL Teratogenicity: > 1200 ppm NOAEL Maternal: 100 ppm Species: rabbit Application Route: Inhalation Dose: 0, 500, 1200, 2300 ppm Number of exposures: 6 h/d Test period: GD 6-18 NOAEL Teratogenicity: > 2300 ppm

Light Pyrolysis Oil
Aspiration toxicity : No aspiration toxicity classification.

CMR effects

Ethylbenzene	: Carcinogenicity: Carcinogenicity classification not possible from current data. Mutagenicity: In vivo tests did not show mutagenic effects Teratogenicity: Did not show teratogenic effects in animal experiments. Reproductive toxicity: No toxicity to reproduction
Benzene, dimethyl-	Carcinogenicity: Limited evidence of carcinogenicity in animal studies Mutagenicity: Did not show mutagenic effects in animal experiments. Teratogenicity: Damage to fetus not classifiable

Light Pyrolysis Oil
Further information : Solvents may degrease the skin.

12. ECOLOGICAL INFORMATION

Toxicity to fish

Naphthalene	: LC50: 3,2 mg/l Exposure time: 96 HR Species: Pimephales promelas (fathead minnow)
Ethylbenzene	LC50: 4,3 mg/l Exposure time: 96 HR Species: Marone saxatilis (striped bass)
Benzene, dimethyl-	LC50: 8,2 mg/l

Exposure time: 96 HR
Species: Salmo gairdneri (Rainbow trout)

Cumene: LC50: 4,8 mg/l
Exposure time: 96 HR
Species: Oncorhynchus mykiss (rainbow trout)
flow-through test Test substance: yes

Toxicity to daphnia and other aquatic invertebrates.

Naphthalene : LC50: 2,16 mg/l
Exposure time: 48 HR
Species: Daphnia magna (Water flea)

Ethylbenzene: LC50: 2,6 mg/l
Exposure time: 96 HR
Species: Mysidopsis bahia (mysid shrimp)

EC50: 2,2 mg/l
Exposure time: 48 HR
Species: Daphnia magna (Water flea)
Method: OECD Test Guideline 202

Cumene: EC50: 2,14 mg/l
Exposure time: 48 HR
Species: Daphnia magna (Water flea)
static test Analytical monitoring: yes
Test substance: yes
Method: OECD Test Guideline 202

Toxicity to algae

Naphthalene : EC50: 2,96 mg/l
Exposure time: 48 HR
Species: Selenastrum capricornutum (algae)

Ethylbenzene: ErC50: 5,0 mg/l
Exposure time: 96 HR
Species: Selenastrum capricornutum (algae)

ErC50: 7,7 mg/l
Exposure time: 72 HR
Species: Skeletonema costatum (Marine Algae)

Cumene: ErC50: 2,01 mg/l
Exposure time: 72 HR
Species: Desmodesmus subspicatus (green algae)
static test Analytical monitoring: yes
Test substance: yes
Method: OECD Test Guideline 201

Elimination information (persistence and degradability)

Biodegradability : Expected to be ultimately biodegradable

Further information on ecology

Results of PBT assessment

Ethylbenzene	:	This substance is not considered to be persistent, bioaccumulating nor toxic (PBT)., This substance is not considered to be very persistent nor very bioaccumulating (vPvB).
Additional ecological information	:	An environmental hazard cannot be excluded in the event of unprofessional handling or disposal. Toxic to aquatic life with long lasting effects.

13. DISPOSAL CONSIDERATIONS

The information in this MSDS pertains only to the product as shipped.

Use material for its intended purpose or recycle if possible. This material, if it must be discarded, may meet the criteria of a hazardous waste as defined by US EPA under RCRA (40 CFR 261) or other State and local regulations. Measurement of certain physical properties and analysis for regulated components may be necessary to make a correct determination. If this material is classified as a hazardous waste, federal law requires disposal at a licensed hazardous waste disposal facility.

Product	:	The product should not be allowed to enter drains, water courses or the soil. Do not contaminate ponds, waterways or ditches with chemical or used container. Send to a licensed waste management company.
Contaminated packaging	:	Empty remaining contents. Dispose of as unused product. Do not re-use empty containers. Do not burn, or use a cutting torch on, the empty drum.

14. TRANSPORT INFORMATION

The shipping descriptions shown here are for bulk shipments only, and may not apply to shipments in non-bulk packages (see regulatory definition).

Consult the appropriate domestic or international mode-specific and quantity-specific Dangerous Goods Regulations for additional shipping description requirements (e.g., technical name or names, etc.) Therefore, the information shown here, may not always agree with the bill of lading shipping description for the material. Flashpoints for the material may vary slightly between the MSDS and the bill of lading.

US DOT (United States Department of Transportation)
UN1202, HOT GAS OIL, 3, III

IMO / IMDG (International Maritime Dangerous Goods)
UN1202, HOT GAS OIL, 3, III, MARINE POLLUTANT, (Naphthalene), (60 - 93,3 °C)

IATA (International Air Transport Association)
UN1202, 3: NOT PERMITTED FOR TRANSPORT

ADR (Agreement on Dangerous Goods by Road (Europe))

UN1202, HOT GAS OIL, 3, III, (D/E)

RID (Regulations concerning the International Transport of Dangerous Goods (Europe))
UN1202, HOT GAS OIL, 3, III

ADN (European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways)
UN1202, , 3, III

Transport in bulk according to Annex II of MARPOL 73/78 and the IBC Code

15. REGULATORY INFORMATION

Classification and Labeling of Commonly Used Dangerous Chemical Substances : Primary label: Combustible Liquid.

Notification status

Europe REACH	:	Not in compliance with the inventory
United States of America US.TSCA	:	On the inventory, or in compliance with the inventory
Canada NDSL	:	On the inventory, or in compliance with the inventory
Australia AICS	:	On the inventory, or in compliance with the inventory
New Zealand NZIoC	:	Not in compliance with the inventory
Japan ENCS	:	Not in compliance with the inventory
Korea KECI	:	Not in compliance with the inventory
Philippines PICCS	:	Not in compliance with the inventory
China IECSC	:	Not in compliance with the inventory

16. OTHER INFORMATION

Further information

Legacy MSDS Number : PE0054

Significant changes since the last version are highlighted in the margin. This version replaces all previous versions.

The information in this MSDS pertains only to the product as shipped.

The information provided in this Material Safety Data Sheet is correct to the best of our knowledge, information and belief at the date of its publication. The information given is designed only as a guidance for safe handling, use, processing, storage, transportation, disposal and release and is not to be considered a warranty or quality specification. The information relates only to the specific material designated and may not be valid for such material used in combination with any other materials or in any process, unless specified in the text.

Key or legend to abbreviations and acronyms used in the safety data sheet			
ACGIH	American Conference of Government Industrial Hygienists	LD50	Lethal Dose 50%
AICS	Australia, Inventory of Chemical	LOAEL	Lowest Observed Adverse Effect

	Substances		Level
DSL	Canada, Domestic Substances List	NFPA	National Fire Protection Agency
NDSL	Canada, Non-Domestic Substances List	NIOSH	National Institute for Occupational Safety & Health
CNS	Central Nervous System	NTP	National Toxicology Program
CAS	Chemical Abstract Service	NZIoC	New Zealand Inventory of Chemicals
EC50	Effective Concentration	NOAEL	No Observable Adverse Effect Level
EC50	Effective Concentration 50%	NOEC	No Observed Effect Concentration
EGEST	EOSCA Generic Exposure Scenario Tool	OSHA	Occupational Safety & Health Administration
EOSCA	European Oilfield Specialty Chemicals Association	PEL	Permissible Exposure Limit
EINECS	European Inventory of Existing Chemical Substances	PICCS	Philipines Inventory of Commercial Chemical Substances
MAK	Germany Maximum Concentration Values	PRNT	Presumed Not Toxic
GHS	Globally Harmonized System	RCRA	Resource Conservation Recovery Act
>=	Greater Than or Equal To	STEL	Short-term Exposure Limit
IC50	Inhibition Concentration 50%	SARA	Superfund Amendments and Reauthorization Act.
IARC	International Agency for Research on Cancer	TLV	Threshold Limit Value
IECSC	Inventory of Existing Chemical Substances in China	TWA	Time Weighted Average
ENCS	Japan, Inventory of Existing and New Chemical Substances	TSCA	Toxic Substance Control Act
KECI	Korea, Existing Chemical Inventory	UVCB	Unknown or Variable Compositon, Complex Reaction Products, and Biological Materials
<=	Less Than or Equal To	WHMIS	Workplace Hazardous Materials Information System
LC50	Lethal Concentration 50%		

ACIDO CLORHIDRICO

Ficha de datos de seguridad (FDS)

Fecha revisión 10.11.2006

1.- IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA Y DEL RESPONSABLE DE SU COMERCIALIZACIÓN.

Nombre: ÁCIDO CLORHÍDRICO
Sinónimos: Cloruro de hidrógeno solución, Espiritu de sal, Ácido muriático, Salfumant.
Identificación de la empresa.
RAMS-MARTINEZ, S.L. (T3 QUÍMICA)
Pol.Inds. Can Clapers Torrent d'en Baiell, 36-A
08181-SENTMENAT (Barna)
Telef.: 93 715 20 01
Fax: 93 715 23 79
email: t3quimica@t3quimica.com
Servicio Nacional de Información Toxicológica: 91 562 04 20
Usos: Acidificación (activación) de pozos de petroleo, producto intermedio químico, reducción de minerales, procesado de alimentos (jarabe de maiz, glutamato de sodio), decapado y limpiado de metales, acidificante industrial, limpieza en general, p.ej. membrana de plantas de desalinización, desnaturalizante de alcohol.

2.- COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES.

Fórmula molecular: HCl **Peso molecular:** 36,47
CAS Nº: 7647-01-0 **Número CEE:** 017-002-01-x **EINECS Nº:** 231-595-7

3.-IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS.

Peligros para las personas: Por inhalación produce irritación de las mucosas, dolores retroesternales y epigástricos, edema pulmonar y de laringe. Estas lesiones pueden presentarse o agravarse con efecto retardado y dejar secuelas.
Produce irritación y quemaduras de piel que pueden ser importantes si no se produce un rápido lavado.
En los ojos produce irritación y quemaduras que pueden producir opacidad de córnea, en algunos casos de carácter irreversible.
Su ingestión produce dolores bucales, retroesternales y epigástricos. Quemaduras graves en la cavidad bucal. Lesiones cáusticas en el tracto digestivo superior.
Transcurridos unos días se pueden presentar hemorragias digestivas, shock y otras serias complicaciones.
Peligros para el medio ambiente: Puede afectar la vida animal y vegetal por su carácter ácido, en función de la concentración y tiempo de exposición.

4.- PRIMEROS AUXILIOS.

Recomendaciones generales: Equipo de protección individual para los socorristas (ver sección 8). En caso de proyección en los ojos y la cara, tratar los ojos con prioridad. Sumergir las ropas contaminadas en un recipiente con agua. En cualquiera de los casos avisar al médico y trasladar urgentemente al afectado a un centro hospitalario, pues se pueden presentar graves complicaciones con efecto retardado.
Inhalación: Apartar al sujeto lo antes posible de la zona contaminada, transportarlo estirado, con el tronco elevado, a un lugar tranquilo, fresco y bien aireado. Reanimación respiratoria u oxígeno si fuera necesario. Evitar el enfriamiento (taparlo con una manta).

Contacto con la piel: Sin perder tiempo, llevar al sujeto completamente vestido bajo la ducha. Retirar los zapatos, los calcetines, la ropa manchada, lavar la piel alcanzada con agua corriente. Médico de urgencia en todos los casos. Evitar enfriamiento (taparlo con una manta), procurar ropas limpias. Puede efectuarse un lavado posterior con solución de bicarbonato sódico.
Contacto con los ojos: Oftalmólogo de urgencia en todos los casos. Prever un transporte urgente hacia un centro hospitalario. Sin perder tiempo, enjuagar los ojos con agua corriente durante 15 minutos, manteniendo los párpados ampliamente abiertos. Administrar un colirio analgésico (oxibuprocaína) en caso de dificultad en abrir los párpados.
Ingestión: Médico de urgencia en todos los casos. Prever un transporte urgente hacia un centro hospitalario.
Si el sujeto está consciente, hacer enjuagar la boca, dar de beber agua fresca y no provocar el vómito.
Si el sujeto está inconsciente, aflojar su cuello y las ropas ajustadas, recostarlo sobre su lado izquierdo en posición lateral de seguridad, reanimación respiratoria y oxígeno en caso necesario. Evitar el enfriamiento (taparlo con una manta).
Consignas médicas: En caso de inhalación efectuar reanimación respiratoria (oxigenoterapia). Prevención o tratamiento del edema pulmonar y de la sobreinfección bacteriana. Reposo completo y vigilancia médica de 48 horas. Comprobación de la función respiratoria al 2º. 3er. día después de la exposición.
En caso de contacto con la piel tratamiento clásico de las quemaduras. Vigilancia médica como para "inhalación".
En casos de ingestión efectuar oxigenoterapia por intubación intra-traqueal, y si es necesario traqueotomía. Evitar el lavado gástrico (riesgo de perforación). No administrar curas digestivas antes de examen endoscópico. Efectuar prevención o tratamiento del estado de shock. Efectuar endoscopia digestiva urgente con evacuación del producto por aspiración. Efectuar tratamiento de las quemaduras digestivas y de sus secuelas. Efectuar prevención o tratamiento de las estenosis esofágicas.

5.- MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS.

Medios de extinción adecuados: En caso de incendio en el vecindariio, todos los medios de extinción están permitidos (bajo reserva de la sección indicada a continuación).
Medios de extinción que no deben utilizarse: Ninguna reserva.
Riesgos particulares derivados de la exposición a la sustancia o a sus productos de combustión: Su acción corrosiva en presencia de humedad o la de soluciones, reacciona con numerosos metales produciendo desprendimiento de hidrógeno, sumamente inflamable y explosivo en presencia de oxigeno. Incombustible. Formación de gases / vapores peligrosos en caso de descomposición (ver sección 10).
Medidas de protección especial para lucha contra incendios: Los recipientes expuestos al fuego o calor serán refrigerados con abundante agua, preferentemente pulverizada, evitándose que llegue a desagües, canalizaciones o cauces de agua hasta asegurarse de que no está contaminada. Evacuar toda persona no indispensable. No dejar intervenir más que a personas aptas y entrenadas, que estén informadas sobre los peligros de los productos. Levar mono antiácido en intervención cercana. Llevar un aparato respiratorio autónomo durante intervenciones cercanas o en lugares confinados.
Otras precauciones: Si es posible, evacuar los recipientes expuestos al fuego.

6.- MEDIDAS QUE DEBEN TOMARSE EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL.

Precauciones individuales: Señalizar, cortar la vía de circulación y desviar el tráfico. Advertir de los riesgos de quemaduras químicas. En caso de fuga, aislar la zona. Si es posible, sin exponer al personal, intentar parar la fuga. Respetar las medidas de protección mencionadas en la sección 8.

Respetar las medidas de protección mencionadas en la sección 5. Dispersar los gases / vapores con la ayuda de agua pulverizada.
Métodos de limpieza: Si es posible, contener las grandes cantidades de líquido con arena o tierra. Recoger el producto con la ayuda de medios mecánicos. Ponerlo todo en un recipiente cerrado (no metálico), etiquetado y compatible eon el producto. Para la eliminación referirse a la sección 13. Limpiar con agua en abundancia, el lugar. Los vertidos pequeños pueden diluirse con agua y tratarse con lechada de cal (hidróxido cálcico) o con bicarbonato sódico.
Precauciones para la protección del medio ambiente: Evitar su llegada a canalizaciones, desagües o cauces de agua mediante la formación de barreras con material absorbente. Prevenir inmediatamente a las autoridades competentes en caso de vertido importante.

7.- MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO.

Manipulación: Si son previsibles pequeñas concentraciones utilizar careta con filtro para gases ácidos. Para mayores concentraciones utilizar equipos de respiración autónoma o de aire asistido. Efectuar toda operación en recipiente cerrado. Manipular lejos de sustancias reactivas (ver sección 10). Utilizar equipos de materiales compatibles con el producto. Trasvasar preferentemente por bomba o por gravedad. No mezclar con hipocloritos, peligro de desprendimiento de cloro tóxico.
Utilizar guantes de material plástico adecuado (latex natural, policloropreno, acrilonitrilo...) y si fuera necesario traje completo del mismo material.
Utilizar gafas herméticas. La máscara completa utilizada normalmente para prevenir la inhalación ofrece buena protección. Se aconseja no utilizar microlentillas.
Tras su utilización proceder a una buena higiene personal.
Almacenamiento: Conservar en recipientes de origen, cerrados. Lejos de sustancias reactivas (ver sección 10). Cubeto de retención bajo los recipientes e instalaciones de transporte. Las soluciones se pueden almacenar en tanques de acero ebonitado, revestidos de materiales plásticos adecuados o de losetas antiácidas.
El vidrio se admite para puqueñas cantidades siempre que esté debidamente protegido.
Otras precauciones: Advertir al personal de los peligros del producto. Prever instalaciones eléctricas estancas y anticorrosivas. Proteger del hielo. Respetar las medidas de protección mencionadas en la sección 8.
Materiales de embalaje / transporte: Acero revestido (incluido esmaltado). PVC, PP. PE. Poliésteres estratificados, Vidrio.

8.- CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN INDIVIDUAL.

Medidas de orden técnico: La instalación debe estar diseñada de forma que no se produzcan emisiones al exterior. Aireación de los locales. Prever una aspiración local adaptada en caso de riesgos de emisión. Instalar dispositivos para respetar los valores límite.
Valores límite de exposición: TLV-TWA (ACGIH-USA) 1996 TLVC = 7,5 mg/m^3 (5 ppm) ; I.P.V.S. = 100 ppm. concentraciones de 50-100 ppm son tolerables durante 1 h. Concentraciones de 1000-2000 ppm son peligrosas incluso para cortas exposiciones.
Protección respiratoria: Máscara facial con cartucho combinado tipo E-P2 en caso de niebla o de humo. Aparato respiratorio de aire autónomo en lugar confinado en caso de oxígeno insuficiente o de emanaciones importantes o no controlados. Para las concentraciones mayores, utilizar equipos de respiración autónoma o de aire asistido.
Protección de las manos: Guantes de protección de resistencia química, estancos. Materiales aconsejados PVC, neopreno, caucho, látex natural, policloropreno, acrilonitrilo...
Protección de los ojos: Gafas químicas estancas, pantalla facial, si hay riesgo de proyecciones. Llevar gafas de protección en todos los casos de operaciones industriales.

Protección de lapiel: Vestimenta estanca, que cubra bien. Monos / botas de PVC, neopreno si hay riesgo de proyecciones.
Medidas de higiene particulares: Duchas y fuentes oculares. Lavar el equipo manchado. Consultar su higienista industrial o ingeniero de seguridad para una selección del equipo de protección individual adaptado a sus condiciones de trabajo.

9.- PROPIEDADES FÍSICO–QUÍMICAS.

Estado físico: Líquido humeante en el aire a concentraciones superiores al 20%.
Color: Incoloro o amarillo.
Olor: Picante.
pH: < 1
Pto.de ebullición: 50,5ºC (38%); 110ºC (20%)
Pto.de fusión: -25,4ºC (38%)
Pto.de destello: No aplicable.
Inflamabilidad: No inflamable
Propiedades oxidantes: Importantes.
Peligro de explosión: No explosivo. Ver sección 10.
Presión de vapor: 30 – 200 mbar(20º - 50ºC)
Viscosidad: 1,9 mPa.s (15ºC)
Densidad de vapor: 1,27
Densidad relativa: 1,11 (23%); 1,15 (30%); 1,17 – 1,18 (25%)
Coeficiente de reparto: No aplicable.
Solubilidad: Soluble en agua en todas las proporciones. Soluble en alcohol, éter, benceno, acetona, ácido acético y cloroformo.

10.- ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD.

Estabilidad: El cloruro de hidrógeno es muy estable térmicamente. Dada su fuerte reactividad puede dar reacciones químicas peligrosas. Ver a continuación. Formación de gases peligrosos en caso de descomposición. Las soluciones acuosas son estables a pesar de lo cual `pueden desprender cloro por la acción de la luz y de ciertos catalizadores.
Condiciones a evitar: Calor, fuentes de calor (temperatura > 40ºC), luz solar directa. Reacciona violentamente con oxidantes desprendiento cloro y con las bases desprendiendo calor.
El ClH húmedo o las soluciones acuosas reaccionan con casi todos los metales desprendiendo hidrógeno que es muy inflamable y explosivo. Descompone las zeolitas, escorias y muchos otros materiales silíceos dando ácido de silício. Reacciona con carbonato básico liberando CO_2 y K_2O.
Materias a evitar: Metales, Agentes oxidantes, Flúor, Bases fuertes, Carburos, Carbonatos, Sulfuros, Acetato de vinilo y Aldehido fórmico, Hipolorito sódico.
Productos de descomposición peligrosos: Hidrógeno, Cloro.
Otras informaciones: El contacto con bases fuertes puede provocar reacciones violentas o explosiones. Acción corrosiva sobre muchos metales. Es oxidado en presencia de O_2 y un catalizador o por electrólisis para producir Cl_2.

11.- INFORMACIONES TOXICOLÓGICAS.

Toxicidad aguda: LD50 / oral / conejo : 900 mg/Kg. LD50 / inhalación / rata / 60 minutos: 1,68 mg/l; LC50 / inhalación / rata / 30 min. = 2142 ppm; CL50 / 30 min. = 3700 – 7000 mg/m_3.
Irritación: Especies varias / piel: corrosivo. Especies varias: reacciona con las mucosas. Irritación pulmonar RD50 / ratón : 309 ppm. Irritación y quemaduras de piel graves si no se procede a un rápido lavado. Irritación y quemaduras de ojos que pueden llegar a producir opacidad de córnea, en algunos casos de caracter irreversible.
Sensibilización: No hay datos.

Toxicidad crónica: In vitro. No hay efecto mutágeno. Inhalación / administración repetida (<6 meses) / rata – ratón /vías respiratorias: >10 ppm. Inhalación / administración repetida (<6 meses/ rata: No hay efecto cancerígeno.
Apreciación toxicológica: Efecto corrosivo para los ojos y vías respiratorias. La gravedad de las lesiones, el pronóstico de la intoxicación dependen directamente de la concentración y de la durada de exposición. Por inhalación se presenta irritación intensa de nariz y garganta, tos, respiración difícil. En concentraciones altas existe riesgo de bronconeumonía química y edema pulmonar. En caso de exposiciones repetidas o prolongadas existe riesgo de dolores de garganta, de sangrado de la nariz, de bronquitis crónica y de erosión del esmalte dental. Grado de riesgo 4: Consecuencias graves en todas las circunstancias – asistencia médica indispensable – precauciones especiales en todos los casos. Por contacto con los ojos se produce irritación intensa, lagrimeo, enrojecimiento de los ojos e hinchazón de los párpados, quemaduras. Existe riesgo de lesiones graves o permanentes en el ojo. Existe riesgo de péridida de visión. Peligro de intoxicación por inhalación simultánea del producto. Grado de riesgo 5: Consecuencias extremadamente graves (lesiones irreversibles) – asistencia médica inmediata indispensable – precauciones especiales en todos los casos. Por contacto con la piel se produce irritación dolorosa, enrojecimiento e hinchazón de la piel. Existe riesgo de quemaduras profundas, lentas de curar. Existe riesgo de estado de shock.- Peligro de intoxicación por inhalación simultánea del producto. Grado de riesgo 4: Consecuencias graves en todas las circunstancias – asistencia médica indispensable – precauciones especiales en todos los casos. Por ingestión se produce irritación intensa, quemaduras, riesgo de perforación digestiva con estado de shock. Se produce salivación abundante. Existe riesgo de edema de garganta con ahogo. Se producen náuseas y cómitos sangrantes, rampas abdominales y diarreas sangrantes. Existe riesgo de síntomas generales. Grado de riesgo 5: Consecuencias extremadamente graves (lesiones irreversibles)- asistencia médica inmediata indispensable – precauciones especiales en todos los casos.

12.- INFORMACIONES ECOLÓGICAS.

Degradabilidad abiótica: Aire: neutralización (CO_2 atmosférico). Agua: ionización instantánea, neutralización: productos de degradación sales. Suelo: ionización / neutralización.
Acumulación: No bioacumulable.
Ecotoxicidad aguda: Peces: Lepomis macrochirus, LC50, 96h: 20 mg/l. Peces: Lepomis macrochirus, LC100, 24 h: 36,5 mg/l. Crustáceos, Daphnia magna, EC lo: 56 mg/l. Bacterias del suelo: EC50: <10 mg/l. Resultado: mineralización.
Movilidad: Aire: volatilidad importante. Agua: Solubilidad y movilidad importantes. Suelo/sedimentos: Solubilidad y movilidad importantes.
Apreciación ecotoxicológica: Nocivo para losorganismos acuáticos a causa del pH alcalino. El producto diluido es rapidamente neutralizado al pH medioambiental.
Otras informaciones: La EPA recomienda a efectos del pH los siguientes criterios: Para proteger la vida acuática en el agua dulce un pH entre 6,5 y 9,0. Para proteger la vida acuática en el agua del mar, un pH entre 6,5 y 8,5. Para proteger la salud humana en el agua para beber un pH entre 5,0 y 9,0.

13.- INFORMACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACIÓN.

Medios de eliminación del producto: Someterse a las reglamentaciones locales y nacionales. Consultar las bolsas de residuos o los centros de recogida para un reciclaje. Diluir abundantemente con agua. Neutralizar el producto con una base (carbonato de sosa, cal, sosa caústica diluida,...). Tras este tratamiento, el producto puede verterse al desagüe.
Medios de eliminación de los envases usados: Enjuagar con agua abundante el envase y tratar el efluente igual que los residuos. Los envases vacios y limpios pueden ser reutilizados, reciclados o eliminados conforme con las reglemantaciones locales.

14.- INFORMACIONES RELATIVAS AL TRANSPORTE.

Nº.ONU: 1789

Clase IATA: 8	**Grupo de embalaje:** II	**Etiqueta:** Corrosivo		
Clase IMO-IMDG: 8	**Grupo de embalaje:** II		**EmS:** 8-03	
Clase ADR-RID: 8	**Grupo de embalaje:** II	**Etiqueta:** 8	**Nº.panel:** 80/1789	

15.- INFORMACIONES REGLAMENTARIAS.

Pictogramas:

Frases R:
R34: Provoca quemaduras.
R37: Irrita las vás respiratorias.
Frases S:
S 1 / 2: Consérvese bajo llave y manténgase fuera del alcance de los niños.
S 26: En caso de contacto con los ojos, lávense inmediatamente y abundantemente con agua y acúdase a un médico.
S 45: En caso de accidente o malestar, acúdase inmediatamente al médico (si es posible, muestrele la etiqueta).
Límites de concentración: C >/ - 25%: C, R34, R37; 10% </- C <25%: Xi, R36/37/38

16.- OTRAS INFORMACIONES.

La información suministrada en el presente documento está basada en nuestro conocimiento y experiencia, no constituyendo garantía alguna de las especificaciones del producto. El cumplimiento de las indicaciones contenidas en el texto no exime al utilizador del cumplimiento de cuantas normativas legales sean aplicables.
El uso y aplicaciçon de nuestros productos está fuera de nuestro control y por consiguiente, bajo la responsabilidad del comprador.

ANEXO F:

FIGURAS DEL PROCESO

Indice:

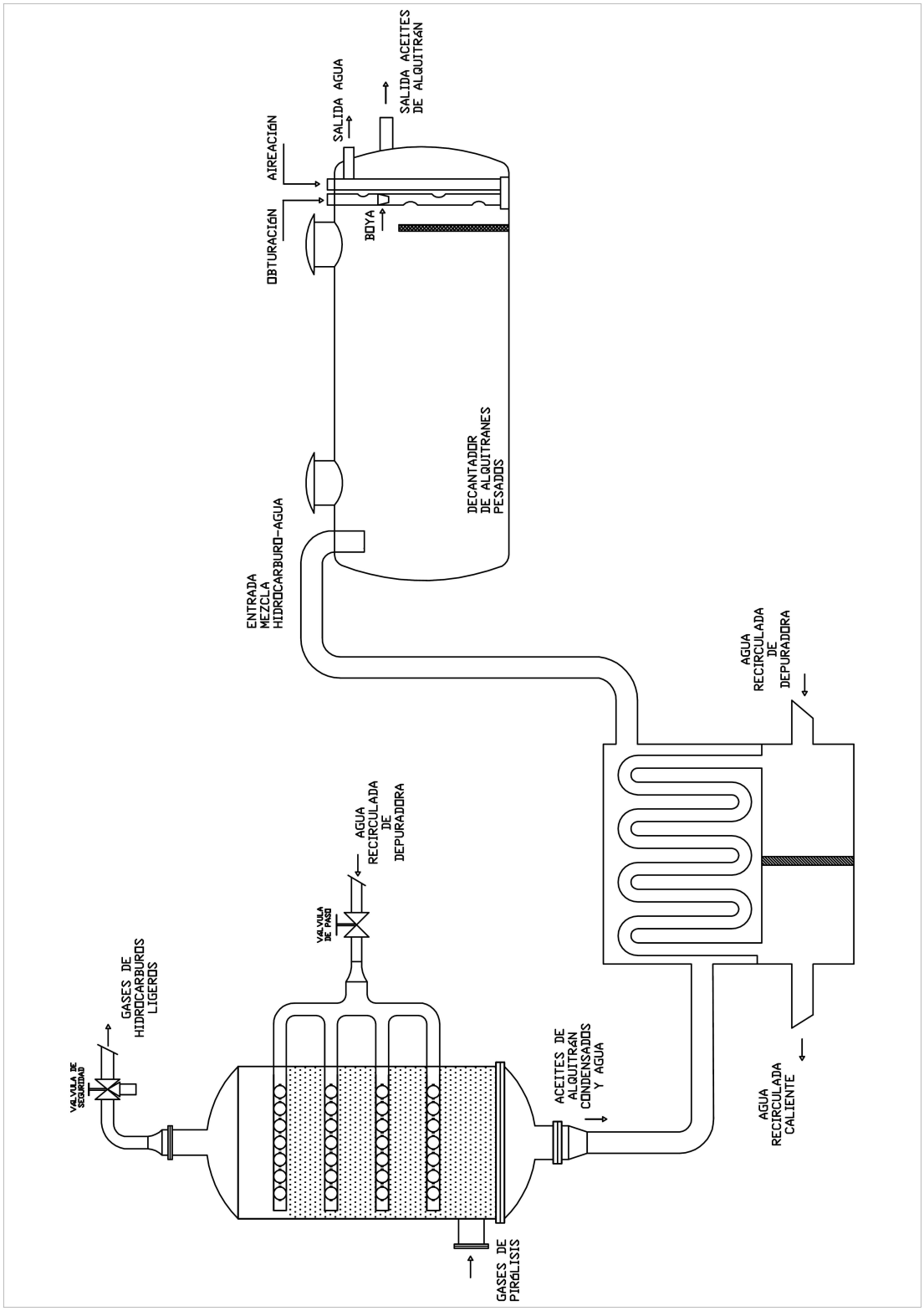
F.1. Postratamiento……..pág. 1

F.2. Torre de condensación (quencher) - perfiles……pág. 2

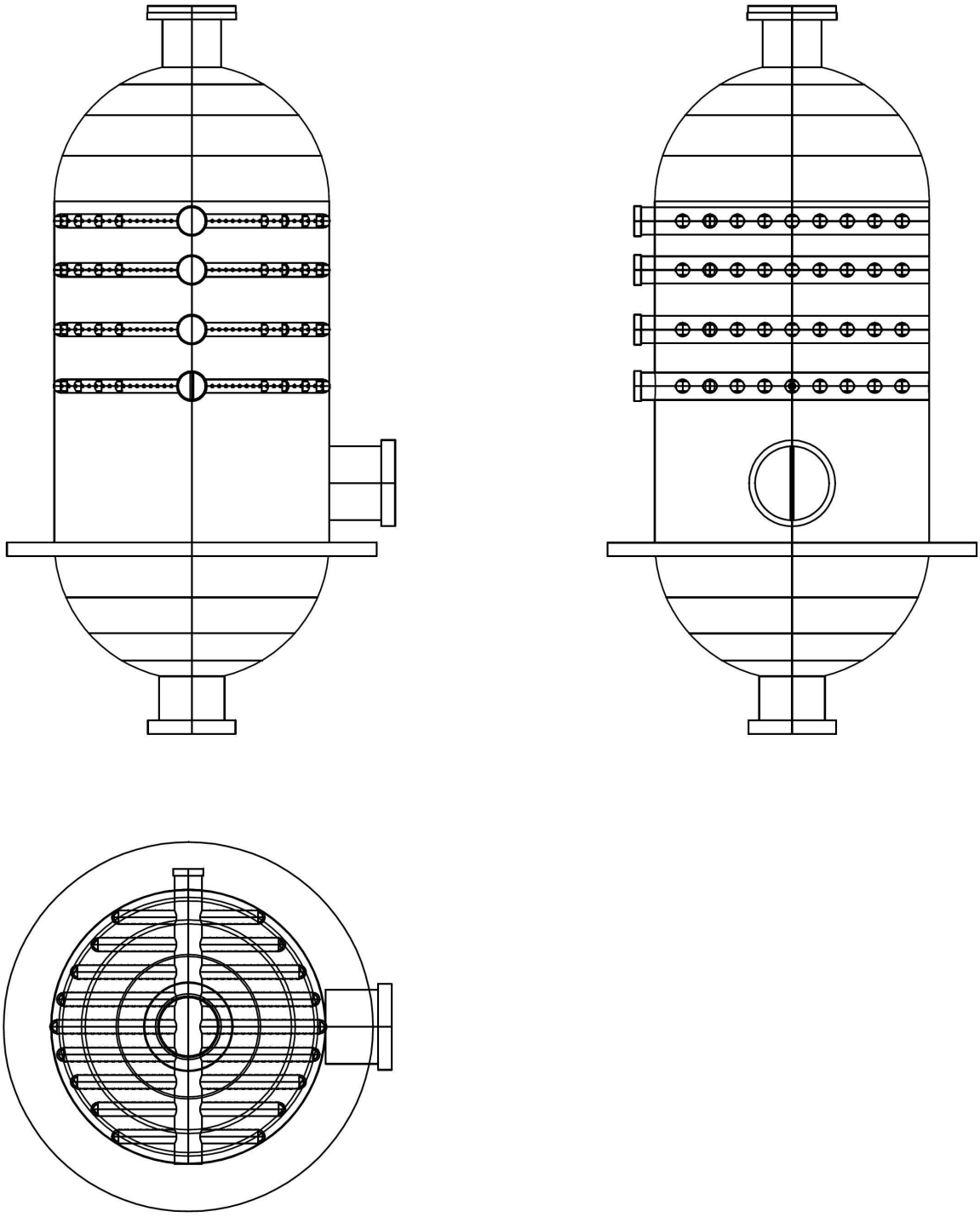
F.3. Torre de condensación (quencher) – 3D……..pág. 3

F.4. Depuración de aguas residuales……pág. 4

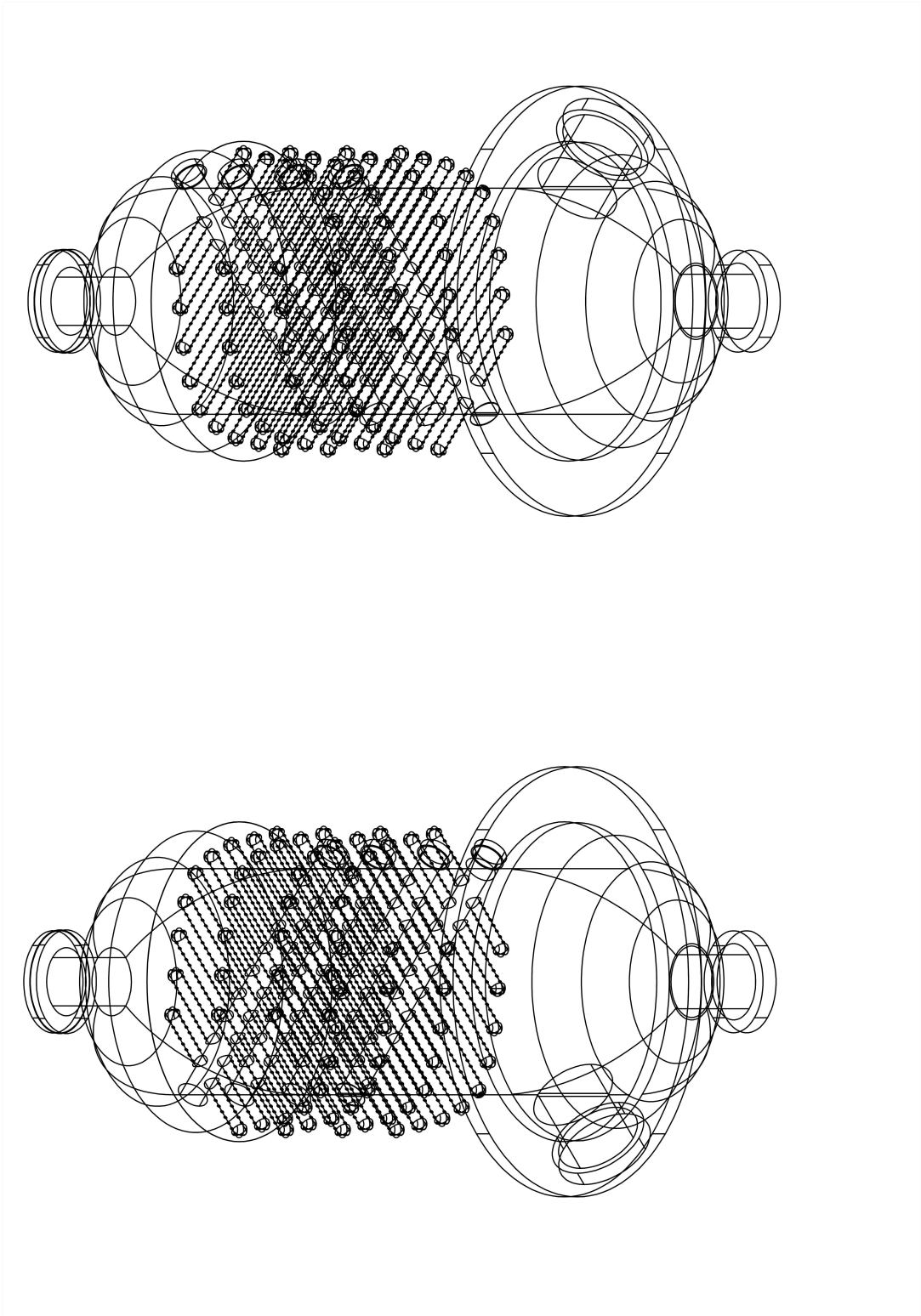
F.1. Postratamiento:



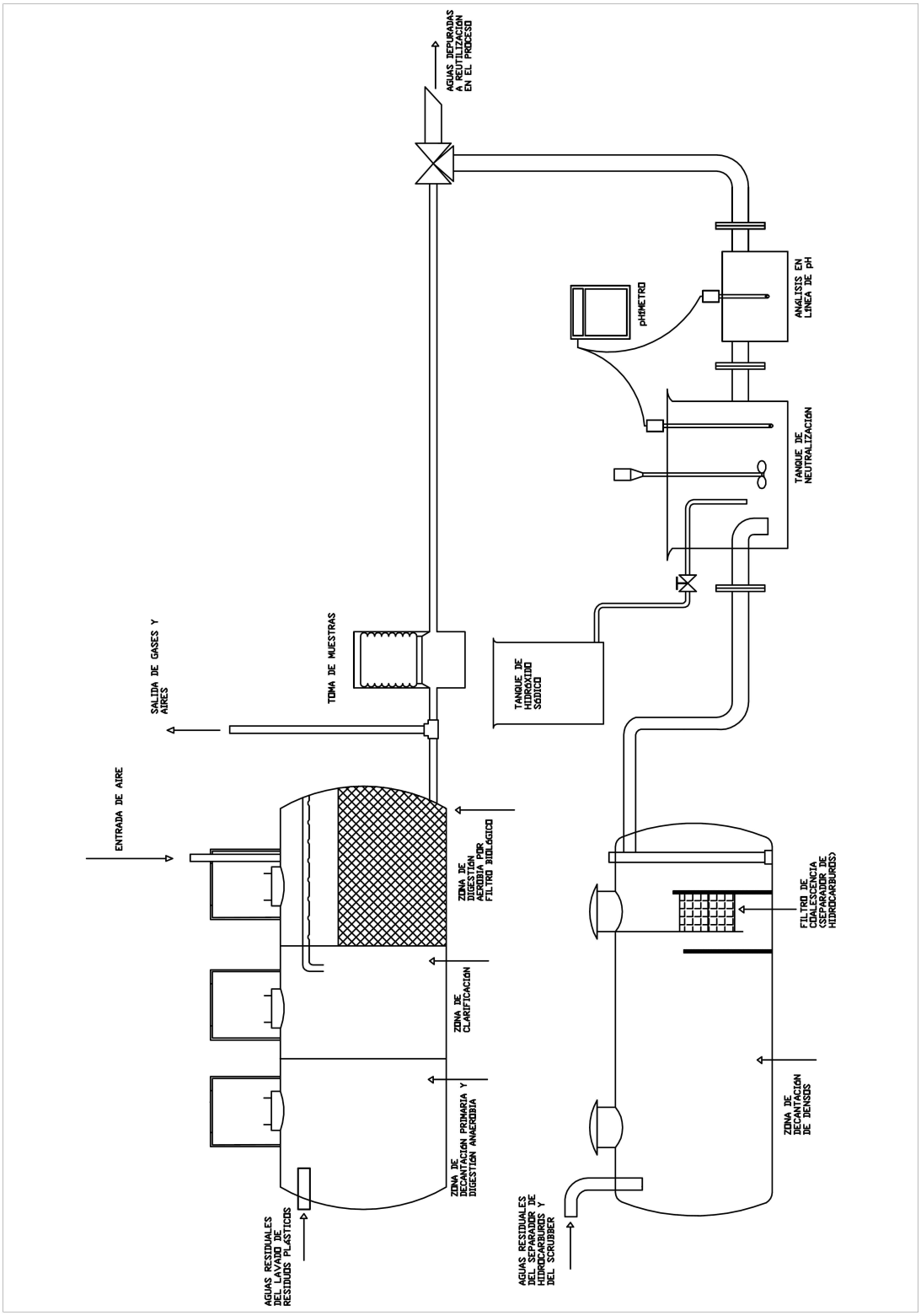
F.2. Torre de condensación (quencher) – perfiles.



F.3. Torre de condensación (quencher) – 3D.



F.4. Depuración de aguas residuales.



ANEXO G:

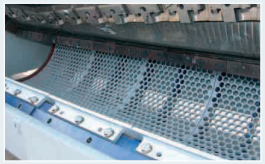
CATÁLOGOS

Indice:

G.1. Catálogo trituradora de residuos plásticos (Lindner)

G.2. Catálogo intercambiador de calor de carcasa y tubos (Basco-Whitlock).

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.



Sistema de criba operado hidráulicamente

Tapa de materiales extraños para remover gran cantidad de materiales extraños

Sistema de control multifuncional

Accionamiento directo / Engranaje

Sistema de lubricación central

we reduce it.
LINDNER
Recyclingtech

Tecnología de trituración con éxito garantizado

En el año 1948 la fábrica Lindner fue fundada para la producción de máquinas y plantas para la industria de madera. Hoy en día la compañía Lindner-Recyclingtech se sitúa entre las más competentes empresas en tecnología de trituración. La compañía desarrolla y produce maquinarias para la trituración y sistemas de procesamiento de residuos industriales y domésticos a través del tratamiento térmico y reciclaje. Nuestras exportaciones a todo el mundo confirman los estándares de alta calidad de nuestros productos.

Calidad comprobada

Nuestras maquinarias y sistemas de procesamiento están equipados con tecnología altamente innovadorora, provee excelente resultados, altos estándares y gran longevidad. Nuestros sistemas aseguran ahorro de tiempo y alta disponibilidad. Lindner-Recyclingtech ofrece calidad comprobada – una inversión competente.

Soluciones creativas para un futuro limpio

Pensamiento orientado hacia el futuro, ideas innovadoras y una producción hecha en casa – todo bajo un mismo techo. Esto es lo que Lindner-Recyclingtech representa. Comenzando con las trituradoras hasta los sistemas de cintas transportadoras y separación de fracción pesada, Lindner-Recyclingtech ofrece un sistema de enfoque completo – nosotros usamos nuestro know-how y la experiencia de muchos años para proveer soluciones altamente mejoradas.

Lindner-Recyclingtech para cada situación

La empresa además de proveer un producto de gran calidad, también brinda con una atención al cliente individual y consultas competentes. Nuestro equipo con experiencia y técnicos cualificados están siempre dispuestos responder a dudas o problemas de nuestros clientes de manera flexible y rápida. La satisfacción de nuestros clientes y servicio se sitúan entre los más importantes valores de nuestra filosofía epresarial.

Gama de productos

Máquina	Tipo = Longitud de rotor en mm	Categorías	Aplicación	Dimensiones Largo x Ancho x Alto	Peso en kg	Potencia	Area de trituración en mm	Capacidad de producción*
JUPITER	1800	V	Desechos domésticos, comerciales e industriales, desechos voluminosos, desechos de maderas, desechos de construcción mezclados no pre-tratados	4830 x 3260 x 4900	aprox. 26000	1 x 200 kW	1790 x 1750	hasta 15 t/h
	2200			5200 x 3260 x 4900	aprox. 30000	2 x 110 kW	2135 x 1750	hasta 30 t/h
	3200			6250 x 3260 x 4900	aprox. 39000	2 x 160 kW	3190 x 1750	hasta 50 t/h
METEOR	1800	V	Plásticos mixtos, paper, cartón, contenedores, ficheros, caucho, cuero, textiles, pavimento, cables, desechos de ordenadores, desechos voluminosos, desechos domésticos, desechos comerciales e industriales	4830 x 3260 x 4900	aprox. 26000	1 x 200 kW	1790 x 1750	hasta 8 t/h
	2200			5200 x 3260 x 4900	aprox. 30000	2 x 132 kW	2135 x 1750	hasta 10 t/h
	3200			6250 x 3260 x 4900	aprox. 39000	2 x 160 kW	3190 x 1750	hasta 15 t/h
SATURN	2200	V	Plásticos mixtos, material de embalaje, papel, bandas de plástico, cuero, caucho, paletas	6200 x 2900 x 3950	aprox. 21000	2 x 110 kW	2135 x 1525	hasta 7 t/h
KOMET	1100	N	Plásticos mixtos, papel, cartón, archivadores, plásticos, contenedores, caucho, cuero, textiles, pavimento, madera	4290 x 2900 x 4500	aprox. 14000	132 kW	1080 x 1315	hasta 4 t/h
	1800			5100 x 2900 x 4500	aprox. 18000	200 kW	1770 x 1315	hasta 6 t/h
	2200			5820 x 2900 x 4500	aprox. 22000	2 x 132 kW	2135 x 1315	hasta 8 t/h
	2800			6500 x 2900 x 4500	aprox. 28000	2 x 160 kW	2825 x 1315	hasta 15 t/h
MICROMAT	1500	U	Plásticos mixtos, papel, cartón, documentos, plásticos, plásticos espumados, contenedores, caucho, cuero, textiles, pavimento, cables, desechos de ordenadores, madera	3770 x 2460 x 2450	aprox. 9300	75 kW	1530 x 1600	hasta 1,5 t/h
	2000			4590 x 2800 x 3000	aprox. 11000	90 kW, 110 kW	1600 x 1650	hasta 2,5 t/h
VEGA	1500	U	Vea MICROMAT	2650 x 2170 x 2700	aprox. 7400	55 kW	1540 x 1450	hasta 1 t/h
MERAK	1500	V	Neumáticos de coches, camiones, tractores y toneles de plástico y acero	3920 x 3770 x 4590	aprox. 13000	55 kW, 75 kW	1750 x 1510	hasta 8 t/h

Sistemas de procesamiento RDF

Nosotros trabajamos de acuerdo con las necesidades de los clientes, las demandas del mercado y proveemos todo a través de una sola empresa: pre-trituración, separación de fracción pesada, trituradora secundaria, cintas transportadoras. Pregunte por nuestros folletos sobre Sistemas de Procesamiento de Combustibles Alternativos!

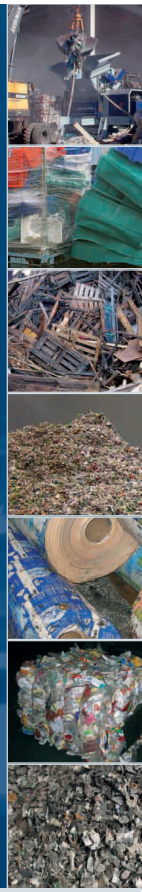
Estado: 1 Febrero de 2007 · Reservado de cambios técnicos o errores de impresión.

Lindner-Recyclingtech GmbH
Villacher Straße 48 · A-9800 Spittal/Drau
Phone: +43 (0)4762 27 42-0 · Fax: 27 42-32
E-mail: office@l-rt.com · www.l-rt.com

we reduce it.
LINDNER
Recyclingtech

El experto en trituración.

we reduce it. waste. costs. problems.



we reduce it.
LINDNER
Recyclingtech

ESTÁNDARES TÉCNICOS

Sistema Monofix
Fijación de cuchilla con un solo tornillo / rápido cambio de cuchillas

Sistema Ecofix (cizallas rotatorias de doble eje)
Sistema especial de montaje de cuchilla para cuchillas de doble eje sin el desmantelamiento de rotores – cuchillas atornilladas con discos de soporte

Rotor fresador de un eje
Alta calidad de granulación y eficiencia con vibración baja, debido a la distribución de cuchillas en forma de hélice

Embrague de seguridad
Seguridad de embrague directamente acoplado al eje del rotor, protege así contra daños masivos en la máquina

Sistema hidráulico de empuje
Introducción de material de forma continua y sin atascos, sistema de empuje con forma de media luna

Unidad de cribado
Fácil cambio de cribas por medio de un sistema operado hidráulicamente

Puerta de mantenimiento / Tapa de materiales extraños
Acceso directo al rotor por puerta de mantenimiento / fácil extracción de partículas extrañas de la cámara de corte

Enfriamiento de rotor
Provee casi siempre de temperatura constante en la superficie del rotor por medio de un sistema cerrado de enfriamiento

Sistema de lubricación central
Lubricación de los cojinetes, para garantizar la longevidad de la trituradora

Sistema de Control
Programación de ajustes de máquinas para material específico. Muestra señales de servicio, inspección y fallos

Convertidor de frecuencia
Optimización del desempeño, reducción de requerimiento de energía y control selectivo de velocidad del rotor

Accionamiento directo / Engranaje
Sistema de accionamiento simple, robusto y de bajo mantenimiento con peso oscilatorio activo

Dispositivo de nivelación
Herramienta para nivelación y amortiguación de vibraciones

CATEGORIAS / AREA DE APLICACIÓN

Trituradoras Primarias
Trituración de los materiales de desechos sin pre-tratamiento

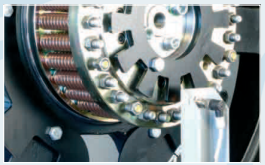
Trituradoras Secundarias
Granulación de los materiales de desechos primarios tratados

Trituradoras Universales
Trituración de materiales de desechos preferentemente pre-tratados

Sistema Monofix en una trituradora de un solo eje

Sistema Ecofix en una trituradora de dos ejes

Rotor fresador de un eje con ensamblaje de cuchilla espiral


Embrague de seguridad

El sistema de empuje evita atascos de material

JUPITER

- Trituradora de construcción sólida, de un solo eje y funcionamiento lento
- Sistema de cortado = tamaño de producción definido

Aplicación:
Desechos domésticos / desechos voluminosos / desechos industriales

Capacidad:
Producción: hasta 50 toneladas por hora (desechos domésticos / criba en forma de media luna)
Tamaño de granulado: aproximadamente 100 – 300 mm

Información técnica:
Longitud del rotor: 1800 mm / 2200 mm / 3200 mm
Potencia: 1 x 200 kW / 2 x 110 kW / 2 x 160 kW
Tamaño cuchilla: 145 x 145 mm
Peso: aproximadamente 26000 kg – 39000 kg

METEOR

- Trituradora innovadora de un solo eje
- Sistema de cortado = tamaño de producción definido

Aplicación:
Material difícil con muchos materiales extraños

Capacidad:
Producción: hasta 12 toneladas por hora (ej. desechos domésticos, desechos comerciales)
Tamaño de granulado: aproximadamente 50 – 120 mm

Información técnica:
longitud del rotor: 1800 mm / 2200 mm / 3200 mm
Potencia: 1 x 200 kW / 2 x 132 kW / 2 x 160 kW
Tamaño cuchilla: 116 x 116 mm, 87 x 87 mm
Peso: aproximadamente 30000 kg – 39000 kg

SATURN

- Trituradora de un solo eje y baja velocidad
- Sistema de cortado = tamaño de producción definido

Aplicación:
Material difícil

Capacidad:
Producción: hasta 7 toneladas por hora (ej. plásticos mixtos / criba 80 mm)
Tamaño de granulado: 60 – 130 mm

Información técnica:
Longitud del rotor: 2200 mm
Potencia: 2 x 110 kW
Tamaño de cuchillas: 116 x 116 mm
Peso: aproximadamente 21000 kg

KOMET

- Trituradora de un solo eje y funcionamiento rápido
- Sistema de cortado = tamaño de producción definido

Aplicación:
Pre-trituración de plásticos / papel / caucho, etc.

Capacidad:
Producción: hasta 15 toneladas por hora (ej. plásticos mixtos / criba 30 mm)
Tamaño de granulado: 10 – 100 mm

Datos técnicos:
Longitud del rotor: 1100 mm / 1800 mm / 2200 mm / 2800 mm
Potencia: 1 x 132 kW / 1 x 200 kW / 2 x 132 kW / 2 x 160 kW
Sistema de cuchillas: sistema rotativo de cuchillas
Peso: aproximadamente 14000 kg – 28000 kg

MICROMAT

- Trituradora de un solo eje y funcionamiento lento
- Sistema de cortado = tamaño de producción definido

Aplicación:
Plásticos mixtos / cartón / contenedores / partes de ordenadores

Capacidad:
Producción: hasta 2 toneladas por hora (ej. PE- balas/fardos de plástico / criba 20 mm)
Tamaño granulación: 15 – 80 mm

Datos técnicos:
Longitud del rotor: 1500 mm / 2000 mm
Potencia: 1 x 75 kW / 1 x 90 kW / 1 x 110 kW
Tamaño de cuchillas: 43 x 43 mm
Peso: aproximadamente 9300 kg – 11000 kg

VEGA

- Trituradora de un solo eje económica
- Sistema de cortado = tamaño de producción definido

Aplicación:
Plásticos mixtos / papel / caucho, etc.

Capacidad:
Producción: hasta 1 tonelada por hora (ej. plásticos sueltos / criba 50 mm)
Tamaño granulación: 10 – 80 mm

Información técnica:
Longitud del rotor: 1500 mm
Potencia: 1 x 55 kW
Tamaño de cuchillas: 43 x 43 mm
Peso: aproximadamente 7400 kg

MERAK

- Trituradora de dos ejes y funcionamiento lento
- Sistema de cortado = tamaño de producción definido

Aplicación:
Neumáticos de coches, camiones, tractores / toneles de plásticos y acero

Capacidad:
Producción: hasta 8 toneladas por hora (ej. neumáticos de coches)
Tamaño granulación: indefinido

Información técnica:
Longitud del rotor: 1500 mm
Potencia: 1 x 55 kW / 1 x 75 kW
Tamaño de cuchillas: 100 / 96 / 92 / 88
Peso: aproximadamente 13000 kg

SEPARADOR DE FRACCIÓN PESADA

TRANSPORTADORES

BASCO
WHITLOCK

BASCO® WHITLOCK® HUB-DESIGN HEAT EXCHANGERS

API Heat Transfer

...world leaders in heat transfer technology

Basco WHITLOCK

Hub Design Heat Exchangers Yield Cost-Effective Performance

Highly reliable, low cost, quick shipment

Applications Include:

- *Lube Oil*
- *Engine Jacket Water*
- *Gas Cooling*
- *Hydraulic Oil*
- *Demineralized Water*
- *Distillates*
- *Vegetable Oils*
- *Paints and Coatings*
- *Vapor Recovery*
- *Molding Machines*
- *Marine Applications*
- *Many Other Uses*

Experience, Versatility and Reliability

World Leader in Heat Transfer

API Heat Transfer has grown to become one of the largest providers of industrial heat transfer equipment with four plants serving a wide variety of industries. Our product portfolio includes a variety of shell and tube, plate and frame, brazed and welded plate and brazed aluminum designs. With a worldwide network of qualified representatives and rapid delivery of finished products, you can be assured of exceptional value.

Demand Flow Technology

API Heat Transfer is committed to state-of-the-art manufacturing technologies. Demand Flow Technology, or DFT, is the driving factor in our production of standard heat exchangers. Partnering with our suppliers and customers, these proven methods result in reduced cycle times, increased flexibility, higher efficiencies, consistently high quality and reduced cost.

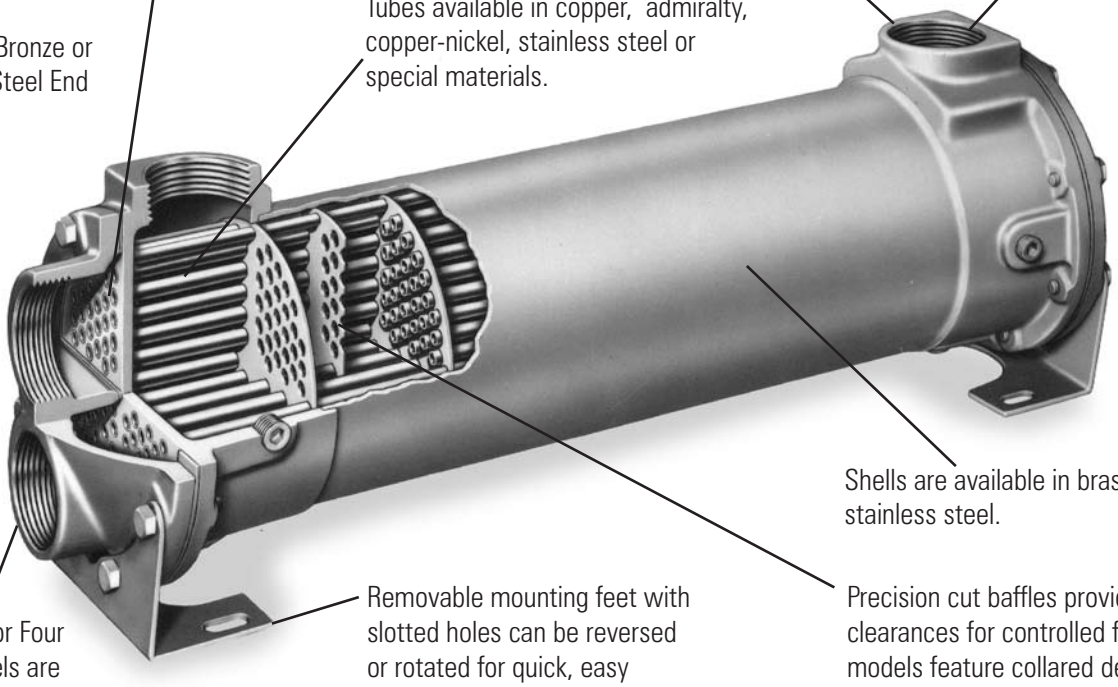
Models available from stock or with short lead times

Pre-engineered designs from stocked components

Our line of Basco/Whitlock HT and AHT heat exchangers is extensive. We can provide models with a non-ferrous shell circuit or all 316 stainless steel construction, both with a variety of options. Models with shell diameters from 2" through 12", straight or U-tube designs, with 1/4", 3/8", 5/8" and 3/4" tube diameters are readily available. A variety of connections, hub orientations and materials of construction are available to meet virtually any OEM or industrial requirement.

These standard heat exchangers reflect the latest in heat transfer design technology. Assembled in state-of-the-art manufacturing facilities, they are available to meet most new installation, replacement or OEM requirements. Even "custom" Hub-design heat exchangers are assembled from standardized components allowing for quick deliveries. Whatever your need, we will work with you to design and manufacture the right equipment quickly and cost effectively.

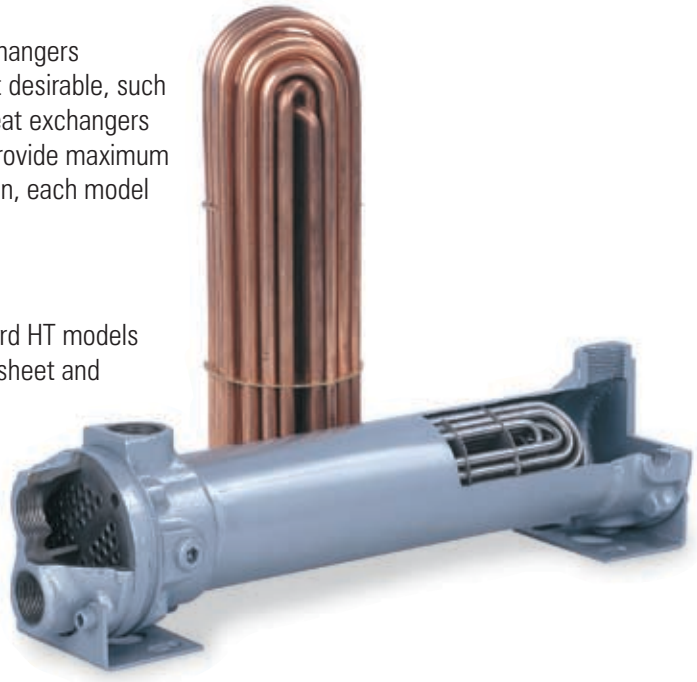
Models available in straight and fixed or removable U-tube designs



A Variety of Shell and Tube Models to meet your Specific Needs

Hub-Design Offers Flexibility

There is an extensive variety of small diameter shell and tube heat exchangers available from API Heat Transfer. For service where ferrous metal is not desirable, such as in most water to water applications, Basco/Whitlock Hub-Design heat exchangers offer a wide range of sizes, designs, and materials of construction to provide maximum performance and minimal cost. While very similar in overall construction, each model offers unique and important benefits.



Interchangability and Application Flexibility

Type HT heat exchangers have been in production since 1965. Standard HT models feature low-cost, non-ferrous construction with brass shell, brass tubesheet and straight copper tubes. End bonnets are cast iron. Numerous options including special materials and nozzle orientation are available.

Type AHT heat exchangers feature all 316 Stainless Steel construction in a wide variety of configurations. Modified units are suitable for critical service where ultra-clean conditions are paramount.

Type HTR and AHTR feature a removable tube bundle design allowing shellside cleaning and bundle replacement, rare in a low cost small diameter design where tuebsheets are typically fixed. Available in nonferrous or stainless designs.

Port Location and Other Options

To meet certain specialized applications, the products are available with shell side connections in NPT or Flg'd designs. Special models with ANSI flanges are available for either shell or tube side connections. Nozzles can be rotated 90º in any direction on either side.

Basco/Whitlock type HT heat exchangers are available with modifications for use as refrigerant evaporators or condensers.

Tube side pass arrangements can be easily converted from one, two and four pass designs by merely changing end bonnets and gaskets. Provided the overall required heat transfer rate is maintained, this feature allows the flexibility to modify flow rates and pressure drops as process conditions change.

Steam Service

Type HT models are excellent choices for highly reliable heat exchangers in steam service where steam is in the shell at steam pressures of 144 psig or less and temperatures are less than 350º F. Both units can be counted horizontally or vertically.

When it is desirable to have steam in the tubes, we recommend our type HTR or AHTR models with U-tubes which provides a number of operational advantages over straight tubes. U-tube models can be manufactured with or without removable bundles. U-tubes are free to expand and contract independently so that they tolerate higher differential temperatures than what is practical in fixed tube designs.

ASME Code Stamp

To meet certain applications, AHT models can be provided to meet ASME Section VII, Division 1 requirements and stamped accordingly. This applies to 4" diameter models and larger. ASME Code inspection, documentation and U-1 Forms are included in such cases. Code heat exchangers are assembled from stocked components to assure prompt delivery. Design modifications and material substitutions can be made as required.

Hub-design heat exchangers provide solid advantages:

- Non-ferrous design for increased corrosion resistance. Suitable for water in the shell service.
- Allows the maximum number of tubes to be placed within a given shell diameter for better efficiency.
- Shell connections are closer to the tubesheet for better tube surface utilization and effective heat transfer.
- Domed shell nozzle design reduces entrance velocity and pressure drop for increased shell flow capability.

ASME CODE RATINGS					
TYPE	**DESIGN PRESSURE PSIG (kPa)**		**TEST PRESSURE PSIG (kPa)**		**DESIGN TEMPERATURE °F (°C)**
	Shell Side	Tube Side	Shell Side	Tube Side	Both Sides
AHT 2"-8"	240 (1654)	200* (1378)	360 (2482)	300 (2068)	375 (191)
AHT 10"-12"	150 (1034)	150 (1034)	225 (1551)	225 (1551)	375 (191)

Larger diameter heat exchangers come with formed mounting feet or can be manufactured with other mounting methods as required.

* Except for cast iron heads – 160 psig max and all 8" single-pass 125 psig max with ASME Code Stamp. 2" and 3" models cannot be Code Stamped.

Basco/Whitlock Type HT

Non-Ferrous, Straight Tube, Fixed Tube Sheet Design

Basco/Whitlock Type HT Heat Exchangers are available from 2" thru 8" in diameter and up to 96" long.

High Efficiency – Low Cost

Type HT heat exchangers are especially suitable for relatively non-fouling shell side fluids. Made from non-ferrous shell side components, it is suitable for water and other liquids that could cause corrosion in steel shell designs.

Product Nomenclature

Size...

5	-	Y	-	14
Shell Diameter		Tube OD		Tube Length

Type...

HT	-	1	-	A	-	CI
Core Assembly		Tube Pass		Baffle Space		Bonnett Material

Materials of Construction

Shell	2-3" - Copper 4-8" - Red Brass
Tubes	Copper or Admirality
Tube Sheet	Brass
Bonnets	Cast Iron, Cast Bronze Stainless Steel
Baffles	Brass
Bolting	Alloy Steel
Gaskets	Compressed Fiber
Brackets	Steel

Standard Ratings

Design Pressure
Shell Side.....210 psi, 1447 kPa
Tube Side.....200 psi, 1378 kPa

Test Pressure
All units are tested pneumatically

Design Temp....300 F, 149 C

Common Specifications...

Type HT Heat Exchanger

Model	Shell Dia.	Tube Length	Surface 1/4"	Surface 3/8"	Surface 5/8"	Shell	Connection Size 1-Pass	Connection Size 2-Pass	Connection Size 4-Pass
2-8	2-1/8"	8	1.3			3/4	3/4	N/A	N/A
2-12		12	2.0						
2-18		18	3.0						
2-24		24	4.0						
3-8	3-1/8"	8	2.8	1.8		1	1-1/2	1	3/4
3-12		12	4.1	2.8					
3-14		14	4.9	3.2					
3-18		18	6.2	1.4					
3-24		24	8.4	5.5					
3-30		30	10.4	6.9					
4-12	4-1/8"	12	7.6	5.1		1-1/2	2	1-1/4	1
4-14		14	8.8	5.9					
4-18		18	11.4	7.6					
4-24		24	15.2	10.2					
4-30		30	19.0	12.7					
4-36		36	22.8	15.3					
5-12	5-1/8"	12	12.0	8.2		1-1/2	2-1/2	1-1/2	1
5-14		14	14.1	9.6					
5-18		18	18.1	12.4					
5-24		24	24.1	16.5					
5-36		36	36.2	24.7					
6-18	6-1/8"	18	27.9	18.3		2	3	2	1-1/2
6-24		24	37.2	24.4	11.8				
6-36		36	55.8	36.5	17.7				
6-48		48	74.4	48.7	23.6				
6-60		60	93.0	60.8	29.4				
8-24	8-1/8"	24	62.4	42.4	24.8	3	4	2-1/2	2
8-36		36	93.5	63.6	37.3				
8-48		48	124.7	84.8	49.7				
8-60		60	155.4	106.0	62.3				
8-72		72	187.1	127.2	74.6				
8-96		96	249.4	169.6	99.5				

Basco/Whitlock Type AHT

All 316 Stainless Steel, Straight Tube, Fixed Tube Sheet

Basco/Whitlock Type AHT Stainless Steel Heat Exchangers are available from 2" thru 12" in diameter and up to 96" long.

High Efficiency – Low Cost

Type AHT heat exchangers feature all 316 Stainless Steel construction. They are especially suited for applications involving corrosive vapors and liquids and offers high strength and thermal efficiency. Available in fixed or removable U-tube designs. Models that are 4" diameter and larger are available with ASME Code Stamp.

Product Nomenclature

Size...

5	-	**Y**	-	**14**
Shell Diameter		Tube OD		Tube Length

Type...

AHT	-	**1**	-	**A**	-	**SS**
Core Assembly		Tube Pass		Baffle Space		Bonnett Material

Materials of Construction

Shell.....316 Stainless Steel
Tubes.....316 Stainless Steel
Tube Sheet.....316 Stainless Steel
Bonnets.....Cast 316 Stainless Steel
Baffles.....316 Stainless Steel
Bolting.....Alloy Steel
Gaskets.....Compressed Fiber
Brackets.....Steel

Standard Ratings

Design Pressure
Shell Side.....240 psi, 1654 kPa
Tube Side.....200 psi, 1378 kPa

Test Pressure
Shell Side.....360 psi, 2482 kPa
Tube Side.....300 psi, 2068 kPa

Design Temp.....375 F

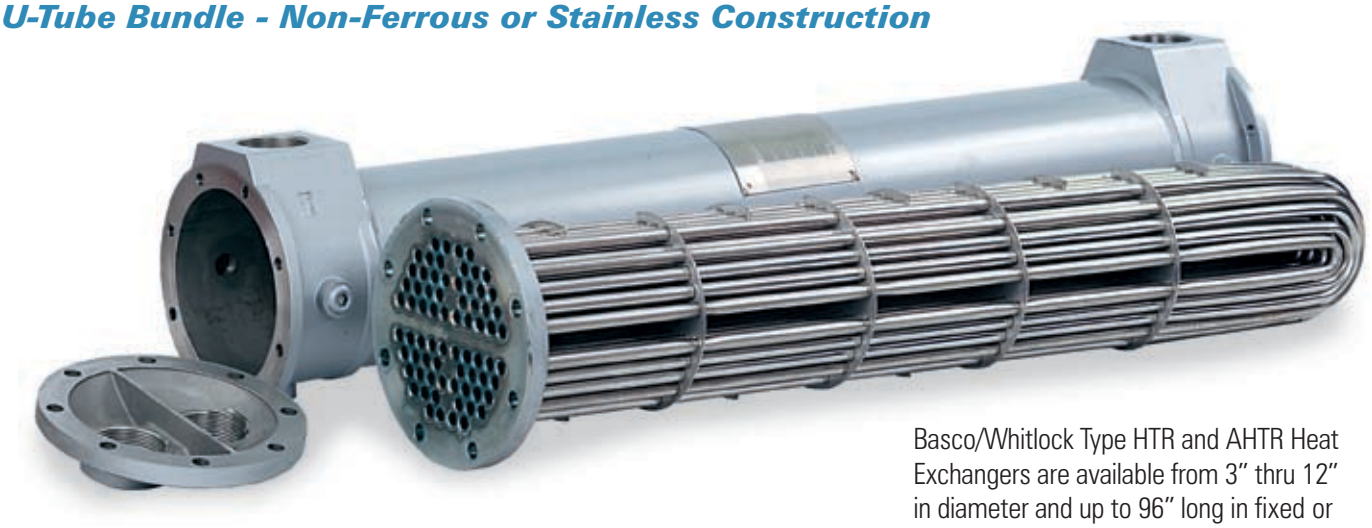
Common Specifications...

Type AHT Heat Exchanger

Model	Shell Dia.	Tube Length	Surface 1/4"	Surface 3/8"	Surface 5/8"	Shell	Connection Size 1-Pass	Connection Size 2-Pass	Connection Size 4-Pass
2-8	2-1/8"	8	1.3			3/4	3/4	N/A	N/A
2-12		12	2.0						
2-18		18	3.0						
2-24		24	4.0						
3-8	3-1/8"	8	2.8	1.8		1	1-1/2	1	3/4
3-12		12	4.1	3.2					
3-14		14	4.9	3.7					
3-18		18	6.2	4.8					
3-24		24	8.4	5.5					
3-30		30	10.4	8.0					
4-12	4-1/8"	12	7.6	5.1		1-1/2	2	1-1/4	1
4-14		14	8.8	5.9					
4-18		18	11.4	7.6					
4-24		24	15.2	10.2					
4-30		30	19.0	12.7					
4-36		36	22.8	15.3					
5-12	5-1/8"	12	12.0	8.2		1-1/2	2-1/2	1-1/2	1
5-14		14	14.1	9.6					
5-18		18	18.1	12.4					
5-24		24	24.1	16.5					
5-36		36	36.2	24.7					
6-18	6-1/8"	18	27.9	18.3		2	3	2	1-1/2
6-24		24	37.2	24.4	11.8				
6-36		36	55.8	36.5	17.7				
6-48		48	74.4	48.7	23.6				
6-60		60	93.0	61.0	29.4				
8-24	8-1/8"	24	65.0	44.0	33.0	3	4	2-1/2	2
8-36		36	97.5	65.9	33.3				
8-48		48	130.0	87.9	44.4				
8-72		72	194.9	131.9	66.7				
8-96		96	260.1	175.6	89.0				
10-36	10-3/4	36		103.7	54.9	4	5	3	2-1/2
10-48		48		138.3	73.3				
10-60		60		172.8	91.6				
10-72		72		207.4	109.9				
12-36	12-3/4	36		155.5	90.3	4	6	3	2-1/2
12-48		48		207.4	120.4				
12-60		60		259.2	150.5				
12-72		72		311.1	180.6				

Basco/Whitlock Type HTR

U-Tube Bundle - Non-Ferrous or Stainless Construction



Basco/Whitlock Type HTR and AHTR Heat Exchangers are available from 3" thru 12" in diameter and up to 96" long in fixed or removable bundles.

High Efficiency – Low Cost

Type HTR and AHTR heat exchangers feature fixed or removable U-tube bundles. HTR features non-ferrous construction while AHTR has all 316 stainless steel materials. Models that are 4" diameter and larger are available with ASME Code Stamp. AHTR models in 10" and 12" shell diameters have fabricated heads.

Product Nomenclature

Size...

5	-	Y	-	14
Shell Diameter		Tube OD		Tube Length

Type...

HTR	-	1	-	A	-	SS
Core Assembly		Tube Pass		Baffle Space		Bonnett Material

Materials of Construction

Shell	2-3" Copper or SS 4-8" – Red Brass or SS
Tubes	Copper,Admirality or SS
Tube Sheet	Forged Brass or SS
Bonnets	Cast Iron, Bronze or SS
Baffles	Brass or SS
Bolting	Alloy Steel
Gaskets	Compressed Fiber
Brackets	Steel

Standard Ratings

Design Pressure - HTR
Shell Side.....210 psi, 1447 kPa
Tube Side.....200 psi, 1378 kPa

Design Pressure - AHTR
Shell Side.....240 psi, 1654 kPa
Tube Side.....200 psi, 1378 kPa

Design Temp HTR.....375 F

Common Specifications...

Type HTR & AHTR Heat Exchanger

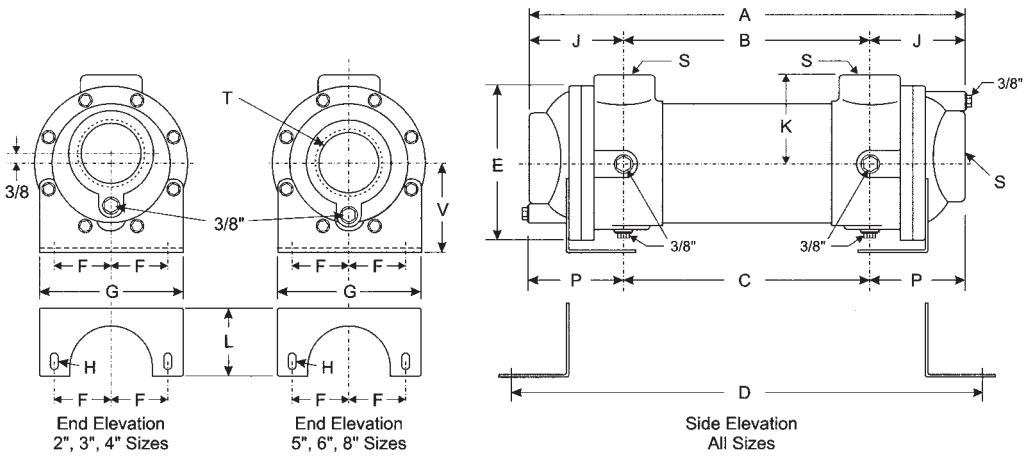
Model	Shell Dia.	Tube Length	Surface 1/4"	Surface 3/8"	Surface 5/8"	Shell	Connection Size 1-Pass	Connection Size 2-Pass	Connection Size 4-Pass
3-12	3-1/8"	12	3.4	2.4		1	N/A	1	3/4
3-14		14	4.0	2.7					
3-18		18	5.1	3.5					
3-24		24	6.8	4.7					
3-30		30	8.5	5.9					
4-12	4-1/8"	12	6.6	4.7		1-1/2	N/A	1-1/4	1
4-14		14	7.7	5.5					
4-18		18	9.9	7.1					
4-24		24	13.1	9.4					
4-30		30	16.4	11.8					
4-36		36	19.7	14.1					
5-12	5-1/8"	12	11.0	7.0		1-1/2	N/A	1-1/2	1
5-14		14	12.8	8.3					
5-18		18	16.5	10.7					
5-24		24	22.0	14.2					
5-36		36	33.0	21.3					
6-18	6-1/8"	18	24.7	16.5	7.8	2	N/A	2	1-1/2
6-24		24	32.9	21.9	10.4				
6-36		36	49.4	32.9	15.7				
6-48		48	65.9	43.9	20.9				
6-60		60	82.4	54.9	26.1				
8-24	8-1/8"	24	62.4	42.4	23.5	3	N/A	2-1/2	2
8-36		36	93.5	63.6	35.3				
8-48		48	124.7	84.8	47.1				
8-60		60	155.8	106.0	58.9				
8-72		72	187.1	127.2	70.7				
8-96		96	249.4	169.9	94.2				
10-36	10-3/4	36				4	N/A	3	2-1/2
10-48		48							
10-60		60							
10-72		72							
12-48	12-3/4	48				4	N/A	3	2-1/2
12-60		60							
12-72		72							
12-84		84							
12-96		96							

Basco/Whitlock Type HT Dimensions

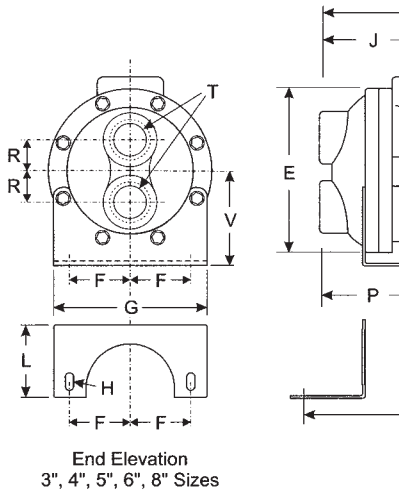
	COMMON DIMENSIONS									ONE PASS					
Size	B	C	D	E	F	G	H	L	V	A	J	K	P	S	T
2-8 **2-12** **2-18** **2-24**	6-1/4 10-1/4 16-1/4 22-1/4	5 9 15 21	12-3/4 16-3/4 22-3/4 28-3/4	2-3/8	1-1/4	3-1/2	3/8 X 7/8	2-3/4	1-3/4	**11-1/4** **15-1/4** **21-1/4** **27-1/4**	2-1/2	1-11/16	3-1/8	3/4	3/4
3-8 **3-12** **3-14** **3-18** **3-24** **3-30**	6 10 12 16 22 28	5-1/4 9-1/4 11-1/4 15-1/4 21-1/4 27-1/4	13 17 19 23 29 35	4-3/16	1-1/4	3-1/2	3/8 X 7/8	2-3/4	2-7/16	**11-1/2** **15-1/2** **17-1/2** **21-1/** **27-1/2** **33-1/2**	2-3/4	2-7/16	3-1/8	1	1-1/2
4-12 **4-14** **4-18** **4-24** **4-30** **4-36**	9 11 15 21 27 33	9-3/4 11-3/4 15-3/4 21-3/4 27-3/4 33-3/4	17 19 23 29 35 41	5-5/8	2	5-1/4	1/2 X 1	2-3/4	3-3/16	**16-1/2** **18-1/2** **22-1/2** **28-1/2** **34-1/2** **40-1/2**	3-3/4	3-1/8	3-3/8	1-1/2	2
5-12 **5-14** **5-18** **5-24** **5-36**	9 11 15 21 33	9-7/8 11-7/8 15-7/8 21-7/8 33-7/8	16-7/8 18-7/8 22-7/8 28-7/8 40-7/8	6-1/2	2	5	1/2 X 1-5/8	3	3-9/16	**16-3/4** **18-3/4** **22-3/4** **28-3/4** **40-3/4**	3-7/8	3-11/16	3-7/16	1-1/2	2-1/2
6-18 **6-24** **6-36** **5-48** **6-60**	14-3/8 20-3/8 32-3/8 44-3/8 56-3/8	15-1/8 21-1/8 33-1/8 45-1/8 57-1/8	23-5/8 29-5/8 41-5/8 53-5/8 65-5/8	7-1/2	2-1/2	6	1/2 X 1	3-1/16	4-3/16	**23-1/4** **29-1/4** **41-1/4** **53-1/4** **65-1/4**	4-7/16	4-1/4	4-1/16	2	3
8-24 **8-36** **8-48** **8-72** **8-96**	19-1/8 31-1/8 43-1/8 67-1/8 91-1/8	20-1/2 32-1/2 44-1/2 68-1/2 92-1/2	30-3/4 42-3/4 54-3/4 78-3/4 102-3/4	9-11/16	3-1/2	8-1/4	5/8 X 1-1/8	3-11/16	5-3/8	**30-7/8** **42-7/8** **54-7/8** **78-7/8** **102-7/8**	5-7/8	5-5/8	5-3/16	3	4

Maximum tube length: 2" and 3" shell – 12 feet; 4" thru 8" – 20 feet. Tube sizes: 3" thru 8" 1/4" or 3/8"
Note: 2" shell size available in ¼" tubing only.

ONE-PASS MODELS



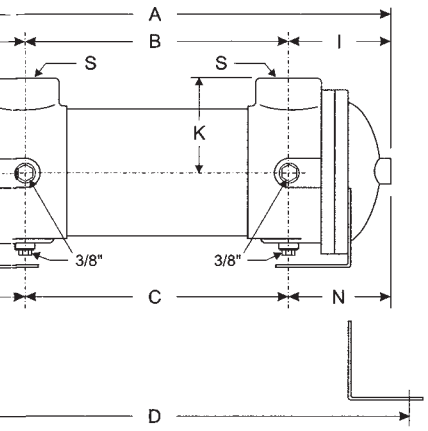
TWO- PAS



TWO PASS								
A	I	J	K	N	P	R	S	T
10-7/8 14-7/8 16-7/8 20-7/8 26-7/8 32-7/8	2-7/16	2-7/16	2-7/16	2-13/16	2-13/16	1	1	1
15 17 21 27 33 39	3	3	3-1/8	2-5/8	2-5/8	1-1/16	1-1/2	1-1/4
15-1/8 17-1/8 21-1/8 27-1/8 39-1/8	3-1/16	3-1/16	3-11/16	2-9/16	2-9/16	1-3/16	1-1/2	1-1/2
22-1/16 28-1/16 40-1/16 52-1/16 64-1/16	3-7/8	3-7/8	4-1/4	3-1/2	3-1/2	1-1/2	2	2
30-1/4 42-1/4 54-1/4 78-1/4 102-1/4	5-9/16	5-9/16	5-5/8	4-7/8	4-7/8	1-7/8	3	2-1/2

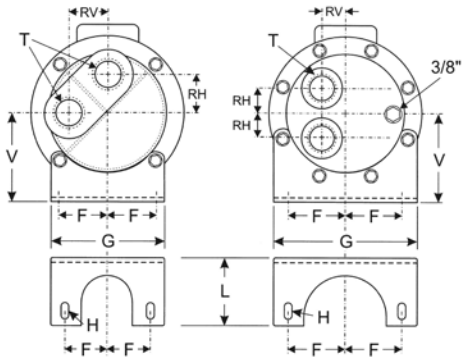
FOUR PASS									
A	I	J	K	N	P	R	S	T	Lbs.
10-5/8 14-5/8 16-5/8 20-5/8 26-5/8 32-5/8	2-7/16	2-3/16	2-7/16	2-13/16	2-9/16	RV 1 RH 1	1	3/4	12 13 15 17 20 23
15 17 21 27 33 39	3	3	3-1/8	2-5/8	2-5/8	RV 15/16 RH 15/16	1-1/2	1	34 36 39 44 49 54
15-1/8 17-1/8 21-1/8 27-1/8 39-1/8	3-1/16	3-1/16	3-11/16	2-9/16	2-9/16	RV 3/4 RH 1-11/32	1-1/2	1	46 48 52 58 70
22-1/16 28-1/16 40-1/16 52-1/16 64-1/16	3-7/8	3-7/8	4-1/4	3-1/2	3-1/2	RV 15/16 RH 1-7/16	2	1-1/2	70 81 103 125 147
30-1/4 42-1/4 54-1/2 78-1/4 102-1/4	5-9/16	5-9/16	5-5/8	4-7/8	4-7/8	RV 1-3/8 RH 1-7/8	3	2	150 190 230 310 390

S MODELS



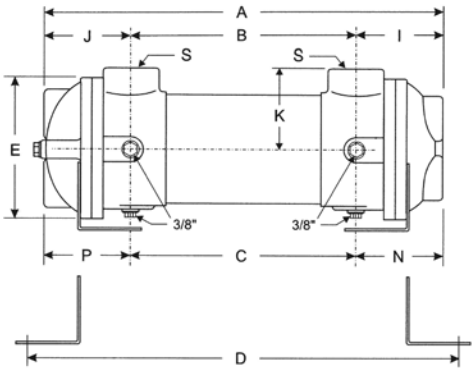
Side Elevation
3", 4", 5", 6", 8" Sizes

FOUR-PASS MODELS



End Elevation
3" Size

End Elevation
4", 5", 6", 8" Sizes



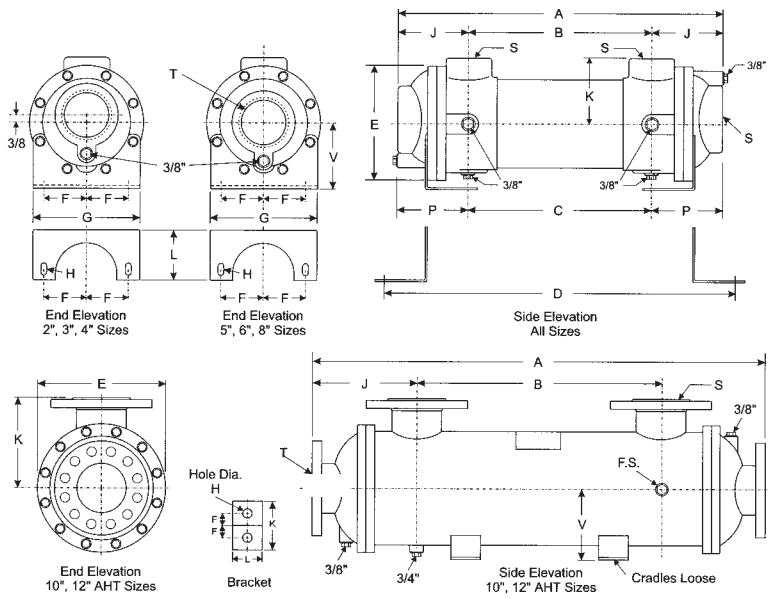
Side Elevation
3", 4", 5", 6", 8" Sizes

Basco/Whitlock Type AHT Dimensions

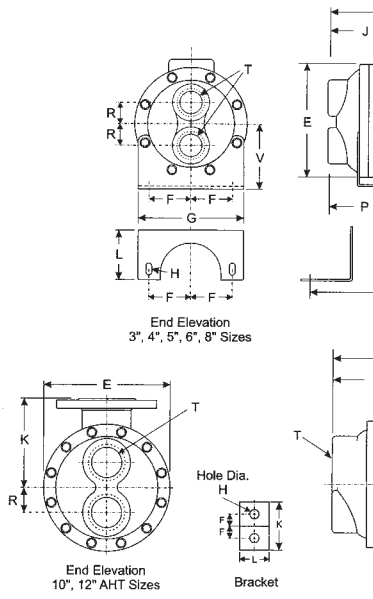
	COMMON DIMENSIONS									ONE PASS					
Size	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**L**	**V**	**A**	**J**	**K**	**P**	**S**	**T**
2-8 **2-12** **2-18** **2-24**	6-1/4 10-1/4 16-1/4 22-1/4	5 9 15 21	12-3/4 16-3/4 22-3/4 28-3/4	2-3/8	1-1/4	3-1/2	3/8 x 7/8	2-3/4	1-3/4	**11-1/4** **15-1/4** **21-1/4** **27-1/4**	2-1/2	1-11/16	3-1/8	3/4	3/4
3-8 **3-14** **3-24** **3-30**	6 12 22 28	5-1/4 11-1/4 21-1/4 27-1/4	13 19 29 35	4-3/16	1-1/4	3-1/2	3/8 x 7/8	2-3/4	2-7/16	**11-1/2** **17-1/2** **27-1/2** **33-1/2**	2-3/4	2-7/16	3-1/8	1	1-1/2
4-14 **4-18** **4-24** **4-36**	11 15 21 33	11-3/4 15-3/4 21-3/4 33-3/4	19 23 29 41	5-5/8	2	5-1/4	1/2 x 1	2-3/4	3-3/16	**18-1/2** **22-1/2** **28-1/2** **40-1/2**	3-3/4	3-1/8	3-5/8	1-1/2	2
5-14 **5-18** **5-24** **5-36**	11 15 21 33	11-7/8 15-7/8 21-7/8 33-7/8	18-7/8 22-7/8 28-7/8 40-7/8	6-1/2	2	5	1/2 x 1-5/8	3	3-9/16	**18-3/4** **22-3/4** **28-3/4** **40-3/4**	3-7/8	3-11/16	3-7/16	1-1/2	2-1/2
6-24 **6-36** **6-48** **6-60**	20-3/8 32-3/8 44-3/8 56-3/8	21-1/8 33-1/8 45-1/8 57-1/8	29-5/8 41-5/8 53-5/8 65-5/8	7-1/2	2-1/2	6	1/2 x 1	3-1/16	4-1/8	**29-1/4** **41-1/4** **53-1/4** **65-1/4**	4-7/16	4-1/4	4-1/16	2	3
8-36 **8-48** **8-72** **8-96**	31-1/8 43-1/8 67-1/8 91-1/8	32-1/2 44-1/2 68-1/2 92-1/2	42-3/4 54-3/4 78-3/4 102-3/4	9-11/16	3-1/2	8-1/4	5/8 x 1-1/8	3-11/16	5-3/8	**42-7/8** **54-7/8** **78-7/8** **102-7/8**	5-7/8	5-5/8	5-3/16	3	4
10-36 **10-48** **10-60** **10-72**	27 39 51 63			13-3/4	3-3/8	8	5/8	1-1/2	7-1/4	**48-1/4** **60-1/4** **72-1/4** **84-1/4**	10-5/8	9		4	5
12-36 **12-48** **12-60** **12-72**	25 37 49 61			15-3/4	4-1/4	10	5/8	1-3/4	8-1/4	**48-1/4** **60-1/4** **72-1/4** **84-1/4**	11-5/8	11		4	6

Maximum tube length: 2" and 3" shell – 12 feet; 4" thru 8" – 20 feet. Tube sizes: 3" thru 8" 1/4" or 3/8"
Note: 2" shell size available in ¼" tubing only.

ONE-PASS MODELS



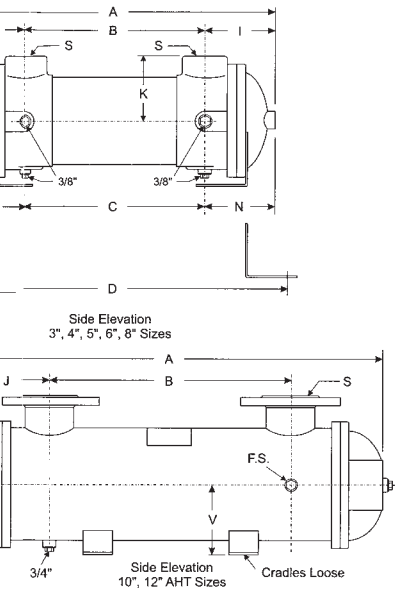
TWO-PAS



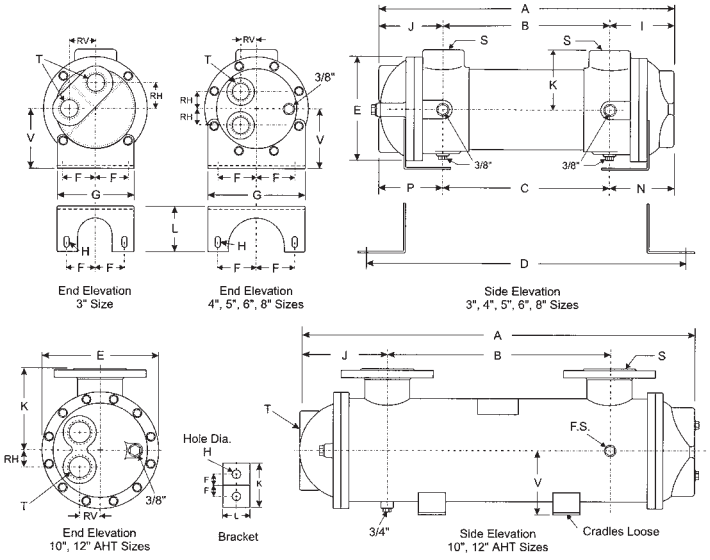
TWO PASS								
A	I	J	K	N	P	R	S	T
10-7/8 16-7/8 26-7/8 32-7/8	2-7/16	2-7/16	2-7/16	2-13/16	2-13/16	1	1	1
17 21 27 39	3	3	3-1/8	2-5/8	2-5/8	1-1/16	1-1/2	1-1/4
17-1/8 21-1/8 27-1/8 39-1/8	3-1/16	3-1/16	3-11/16	2-9/16	2-9/16	1-3/16	1-1/2	1-1/2
28-1/16 40-1/16 52-1/16 64-1/16	3-7/8	3-7/8	4-1/4	3-1/2	3-1/2	1-1/2	2	2
42-1/4 54-1/4 78-1/4 102-1/4	5-9/16	5-9/16	5-5/8	4-7/8	4-7/8	1-7/8	3	2-1/2
45-3/8 57-3/8 69-3/8 81-3/8		9-3/16	9			2-1/4	4	3
45-1/2 57-1/2 69-1/2 81-1/2		10-1/4	1			2-5/8	4	3

FOUR PASS									
A	I	J	K	N	P	R	S	T	Lbs.
10-5/8 16-5/8 26-5/8 32-58	2-7/16	2-3/16	2-7/16	2-13/16	2-9/16	1	1	3/4	12 15 20 23
17 21 27 39	3	3	3-1/8	2-5/8	2-5/8	RV 15/16 RH 15/16	1-1/2	1	36 39 44 54
17-1/8 21-1/8 27-1/8 39-1/8	3-1/16	3-1/16	3-11/16	2-9/16	2-9/16	RV 3/4 RH 1-11/32	1-1/2	1	48 52 58 70
28-1/16 40-1/16 52-1/16 64-1/16	3-7/8	3-7/8	4-1/4	3-1/2	3-1/2	RV 15/16 RH 1-7/16	2	1-1/2	81 103 125 147
42-1/4 54-1/2 78-1/4 102-1/4	5-9/16	5-9/16	5-5/8	4-7/8	4-7/8	RV 1-3/8 RH 1-7/8	3	2	190 230 310 390
45-3/8 57-3/8 69-3/8 81-3/8		9-3/16	9			RV 2 RH 2	4	2-1/2	467 562 656 751
45-1/2 57-1/2 69-1/2 81-1/2		10-1/4	11			RV 2-1/4 RH 2-1/4	4	2-1/2	624 758 892 1027

S MODELS



FOUR-PASS MODELS

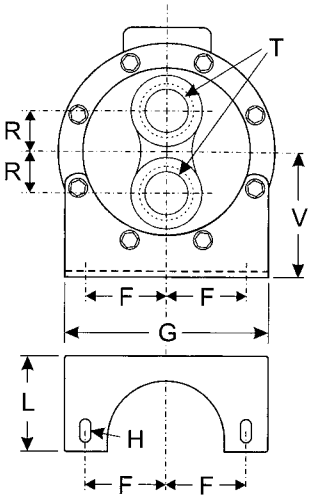


Basco/Whitlock Type HTR Dimensions

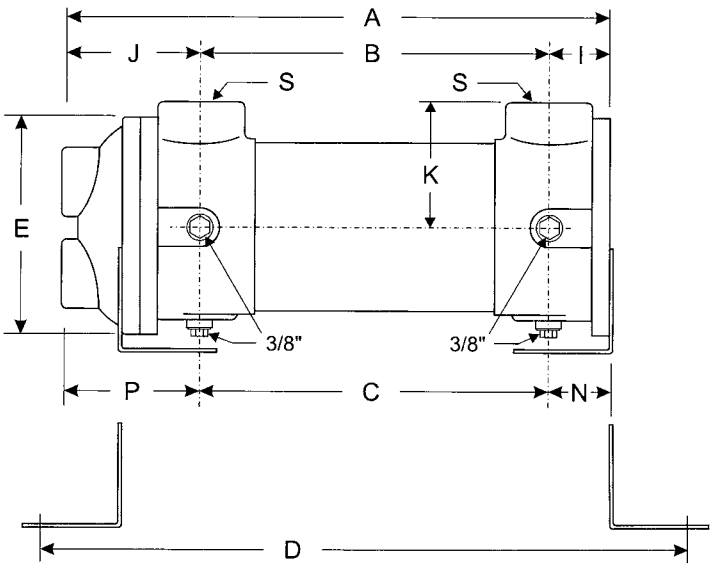
	COMMON DIMENSIONS								
Size	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**L**	**V**
3-12	12-1/4	11-1/2	19-1/4	4-3/16	1-1/4	3-1/2	3/8 X 7/8	2-3/4	2-7/16
3-14	14-1/4	13-1/2	21-1/4						
3-18	18-1/4	17-1/2	25-1/4						
3-24	24-1/4	23-1/2	31-1/4						
3-30	30-1/4	29-1/2	37-1/4						
4-12	13	13-3/4	21	5-5/8	2	5-1/4	1/2 X 1	2-3/4	3-3/16
4-14	15	15-3/4	23						
4-18	19	19-3/4	37						
4-24	25	25-3/4	33						
4-30	31	31-3/4	39						
4-36	37	37-3/4	45						
5-12	12-1/2	13-3/8	20-3/8	6-1/2	2	5	1/2 X 1-5/8	3	3-9/16
5-14	14-1/2	15-3/8	22-3/8						
5-18	18-1/2	19-3/8	26-3/8						
5-24	24-1/2	25-3/8	32-3/8						
5-36	36-1/2	37-3/8	44-3/8						
6-18	18-3/8	19-1/8	27-5/8	7-1/2	2-1/2	6	1/2 X 1	3-1/16	4-3/16
6-24	24-3/8	25-1/8	33-5/8						
6-36	36-3/8	37-1/8	45-5/8						
6-48	48-3/8	49-1/8	57-5/8						
6-60	56-3/8	61-1/8	69-5/8						
8-24	24-7/8	26-5/16	36-9/16	9-11/16	3-1/2	8-1/4	5/8 X 1-1/8	3-11/16	5-3/8
8-36	36-7/8	38-5/16	48-9/16						
8-48	48-7/8	50-5/16	60-9/16						
8-72	72-7/8	74-5/16	84-9/16						
8-96	96-7/8	98-5/16	108-9/16						

Maximum tube length: 3" shell - 12 feet; 4" thru 8" - 20 feet.
Tube sizes: 3" thru 8" 1/4" or 3/8"

TWO-PASS MODELS



End Elevation
3", 4", 5", 6", 8" Sizes

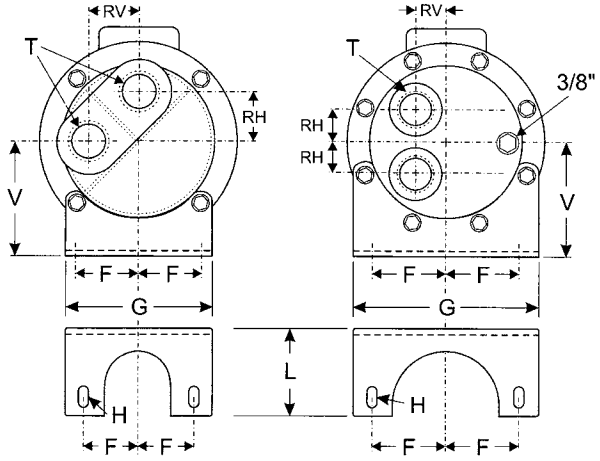


Side Elevation
3", 4", 5", 6", 8" Sizes

TWO PASS								
A	I	J	K	N	P	R	S	T
16-3/16 18-3/16 22-3/16 28-3/16 34-3/16	1	2-15/16	2-7/16	1-7/8	2-13/16	1	1	1
18-1/8 20-1/8 24-1/8 30-1/8 36-1/8 42-1/8	1-1/4	3-7/8	3-1/8	1-3/4	2-5/8	1-1/16	1-1/2	1-1/4
17-5/8 19-5/8 23-5/8 29-5/8 41-5/8	1-1/2	3-5/8	3-11/16	1-11/16	2-9/16	1-3/16	1-1/2	1-1/2
24-11/16 30-11/16 42-11/16 54-1/1/16 66-11/16	1-13/16	4-1/2	4-1/4	2-1/16	3-1/2	1-1/2	2	2
33-11/16 45-11/16 57-11/16 81-11/16 105-11/16	2-7/16	6-3/8	5-5/8	2-1/2	4-7/8	1-7/8	3	2-1/2

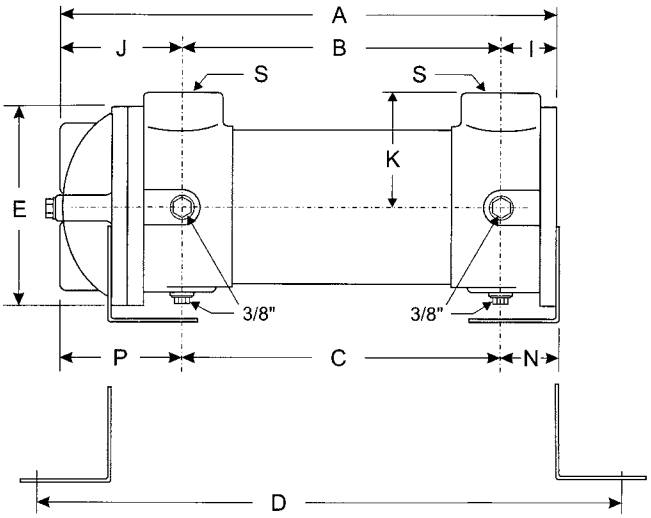
FOUR PASS									
A	I	J	K	N	P	R	S	T	Lbs.
15-15/16 17-15/16 21-15/16 27-15/16 33-15/16	1	2-11/16	2-7/16	1-7/8	2-9/16	RV 1 RH 1	1	3/4	13 15 17 20 23
18-1/8 20-1/8 24-1/8 30-1/8 36-1/8 42-1/8	1-1/4	3-7/8	3-1/8	1-3/4	2-5/8	RV 15/16 RH 15/16	1-1/2	1	34 36 39 44 49 54
17-5/8 19-5/8 23-5/8 29-5/8 41-5/8	1-1/2	3-5/8	3-11/16	1-11/16	2-9/16	RV 3/4 RH 1-11/32	1-1/2	2	46 48 52 58 70
24-11/16 30-11/16 42-11/16 54-11/16 66-11/16	1-13/16	4-1/2	4-1/4	2-1/16	3-1/2	RV 15/16 RH 1-7/16	2	1-1/2	70 81 103 125 147
33-11/16 45-11/16 57-11/16 79-11/16 101-11/16	2-7/16	6-3/8	5-5/8	2-1/2	4-7/8	RV 1-3/8 RH 1-7/8	3	2	150 190 230 310 390

FOUR-PASS MODELS



End Elevation
3" Size

End Elevation
4", 5", 6", 8" Sizes



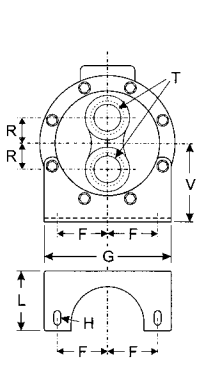
Side Elevation
3", 4", 5", 6", 8" Sizes

Basco/Whitlock Type AHTR Dimensions

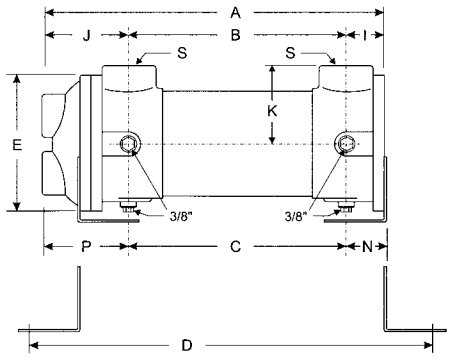
	COMMON DIMENSIONS								
Size	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**L**	**V**
3-12 **3-14** **3-24** **3-30**	12-1/4 14-1/4 24-1/4 30-1/4	11-1/2 13-1/2 23-1/2 29-1/2	19-1/4 21-1/4 31-1/4 37-1/4	4-3/16	1-1/4	3-1/2	3/8 x 7/8	2-3/4	2-7/16
4-14 **4-18** **4-24** **4-36**	15 19 25 37	15-3/4 19-3/4 25-3/4 37-3/4	21 27 33 45	5-5/8	2	5-1/4	1/2 x 1	2-3/4	3-3/16
5-14 **5-18** **5-24** **5-36**	14-1/2 18-1/2 24-1/2 36-1/2	15-3/8 19-3/8 25-3/8 37-3/8	22-3/8 26-3/8 32-3/8 44-3/8	6-1/2	2	5	1/2 x 1-5/8	3	3-1/2
6-24 **6-36** **6-48** **6-60**	24-3/8 36-3/8 48-3/8 56-3/8	25-1/8 37-1/8 49-1/8 61-1/8	33-5/8 45-5/8 57-5/8 69-5/8	7-1/2	2-1/2	6	1/2 x 1	3-1/16	4-1/8
8-36 **8-48** **8-72** **8-96**	36-7/8 48-7/8 72-7/8 96-7/8	38-5/16 50-5/16 74-5/16 98-5/16	48-9/16 60-9/16 84-9/16 108-9/16	9-11/16	3-1/2	8-1/4	5/8 x 1-1/8	3-11/16	5-3/8
10-36 **10-48** **10-60** **10-72**	38-1/2 50-1/2 62-1/2 74-1/2			13-3/4	3-3/8	8	5/8	1-1/2	7-1/4
12-36 **12-48** **12-60** **12-72**	40 52 64 76			15-3/4	4-1/4	10	5/8	1-3/4	8-1/4

Maximum tube length: 3" shell - 12 feet; 4" thru 8" - 20 feet.
Tube sizes: 3" thru 8" 1/2" or 3/8"

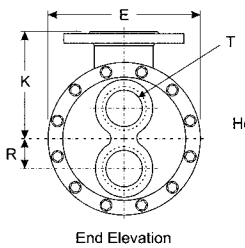
TWO-PASS MODELS



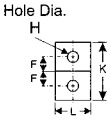
End Elevation
3", 4", 5", 6", 8" Sizes



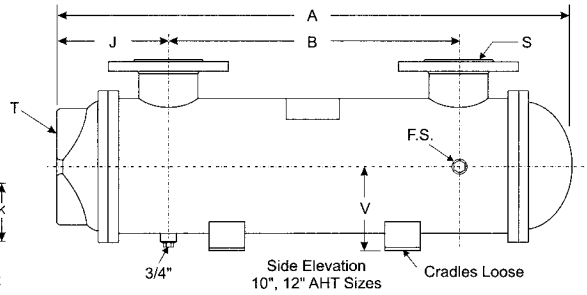
Side Elevation
3", 4", 5", 6", 8" Sizes



End Elevation
10", 12" AHT Sizes



Bracket



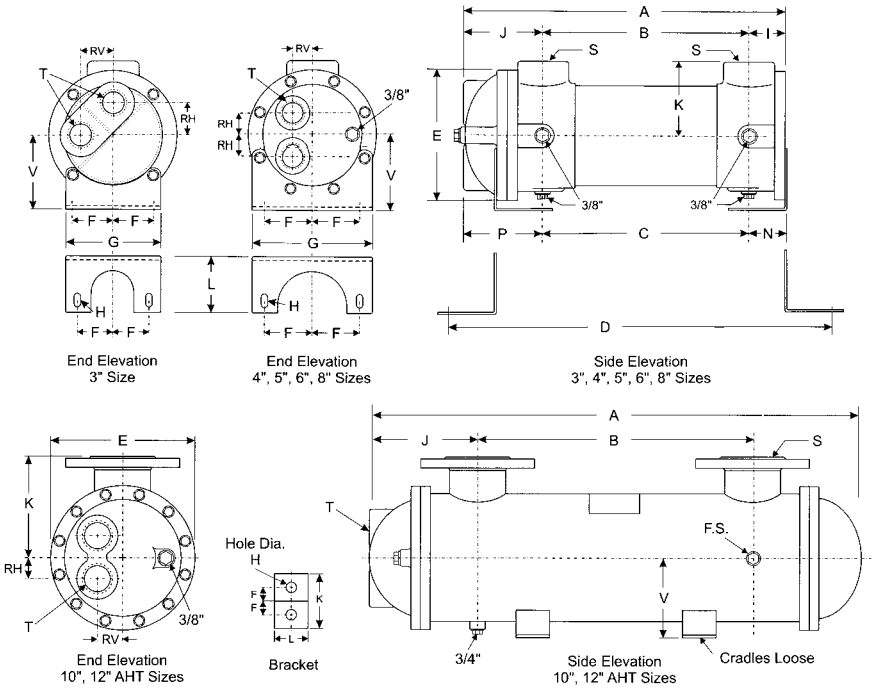
Side Elevation
10", 12" AHT Sizes

Cradles Loose

TWO PASS								
A	I	J	K	N	P	R	S	T
16-3/16 18-3/16 28-3/16 34-3/16	1	2-15/16	2-7/16	1-7/8	2-13/16	1	1	1
20-1/8 24-1/8 30-1/8 42-1/8	1-1/4	3-7/8	3-1/8	1-3/4	2-5/8	1-1/16	2-1/2	1-1/4
19-5/8 23-5/8 29-5/8 41-5/8	1-1/2	3-5/8	3-11/16	1-11/16	2-9/16	1-3/16	1-1/2	1-1/2
30-11/16 42-11/16 54-11/16 66-11/16	1-13/16	4-1/2	4-1/4	2-1/16	3-1/2	1-1/2	2	2
45-11/16 57-11/16 81-11/16 105-11/16	2-7/16	6-3/8	5-5/8	2-1/2	4-7/8	1-7/8	3	2-1/2
58-1/8 70-1/8 82-1/8 94-1/8		11-1/4	9			2-1/4	4	3
60-11/16 72-11/16 84-11/16 96-11/16		11-5/16	1			2-5/8	4	3

FOUR PASS									
A	I	J	K	N	P	R	D	T	Lbs.
15-15/16 17-15/16 27-15/16 33-15/16	1	2-11/16	2-7/16	1-7/8	2-9/16	RV 1 RH 1	1	3/4	13 15 20 23
20-1/8 24-1/8 30-1/8 42-1/8	1-1/4	3-7/8	3-1/8	1-3/4	2-5/8	RV 15/16 RH 15/16	1-1/2	1	36 39 44 54
19-5/8 23-5/8 29-5/8 41-5/8	1-1/2	3-5/8	3-11/16	1-11/16	2-9/16	RV 3/4 RH 1-11/32	1-1/2	1	48 52 58 70
30-5/8 42-5/8 54-5/8 66-5/8	1-13/16	4-1/2	4-1/4	2-1/16	3-1/2	RV 15/16 RH 1-7/16	2	1-1/2	81 103 125 147
45-11/16 57-11/16 79-11/16 105-11/16	2-7/16	6-3/8	5-5/8	2-1/2	4-7/8	RV 1-3/8 RH 1-7/8	3	2	190 230 310 390
58-1/8 70-1/8 82-1/8 94-1/8		11-1/4	9			RV 2 RH 2	4	2-1/2	467 562 656 751
60-11/16 72-11/16 84-11/16 96-11/16		11-5/16	11			RV 2-1/4 RH 2-1/4	4	2-1/2	624 758 892 1027

FOUR-PASS MODELS



API Heat Transfer

API Heat Transfer Inc.
2777 Walden Avenue
Buffalo, New York 14225
(716) 684-6700
www.apiheattransfer.com

Divisions:

API Airtech *ISO-9001 Certified*
Air Cooled Aluminum Heat Exchangers
91 North Street • P.O. Box 68
Arcade, New York 14009-0068
(585) 496-5755 • Fax: (585) 496-5776

API Basco *ISO-9001 Certified*
Basco®/Whitlock® Shell & Tube Heat Exchangers
2777 Walden Avenue
Buffalo, New York 14225
(716) 684-6700 • Fax: (716) 684-2129

API Schmidt-Bretten Americas
Plate Heat Exchangers and Thermal Systems
2777 Walden Avenue
Buffalo, New York 14225
(716) 684-6700 • Fax: (716) 684-2129

API Schmidt-Bretten GmbH & Co. KG
ISO-9001 Certified
Plate Heat Exchangers and Thermal Systems
Langenmorgen 4
D-75015 Bretten, Germany
(49)725253-0 • Fax: (49)725253-200

API Heat Transfer (Suzhou) Co., Ltd.
Air Cooled Aluminum Heat Exchangers
Shell & Tube Heat Exchangers
Plate Heat Exchangers
156 Qingqiu Street, 3rd District
Suzhou Industrial Park
Suzhou, Jiangsu 215126 China
(86)512-88168000 • Fax: (86)512-88168003

Contact your local API Sales Representative or API Heat Transfer directly toll-free: 1-877-API-HEAT e-mail: sales@apiheattransfer.com

Other Products Available from API Heat Transfer

OptiDesign®

Straight-tube, removable bundle exchangers made from standard components. Floating tube sheet for seal leak detection and easy maintenance. Diameters from 3" (7.62 cm) to 42" (106.68 cm). ASME, API, TEMA, ABS and other codes available.

Pipeline Aftercoolers

Straight tube, counterflow aftercoolers designed to yeild cool, dry compressed air. Available with or without accompanying moisture separators and constructed to a wide variety of design codes. Diameters from 6" (15.24 cm) to 42" (106.68 cm).

TEMA Shell and Tube

A wide variety of TEMA types are available using pre-engineered or custom designs in various sizes and materials. Shell diameters from 6" (15.24 cm) to 60" (152.4 cm), ASME, TEMA, API, ABS, TUV, PED and other code constructions available.

Brazed Plate Heat Exchangers

Off-the-shelf, standard units reflect the latest in plate heat exchanger technology for maximum performance and low cost. Ideal for OEM or aftermarket applications. Many models stocked and ready to ship. Models for process or refrigeration applications.

SigmaWig Welded Plate Heat Exchangers

Fully welded and require no gaskets. Available in all 316SS construction, titanium and other higher alloy materials. These units have a design temperature of 750ºF and can handle operating pressures as high as 360 psi with an ASME Code stamp.

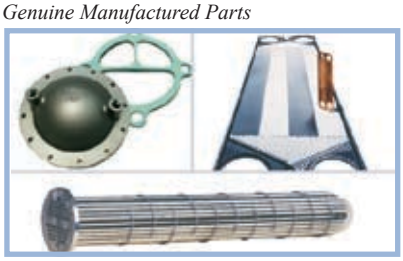
Air-Cooled Heat Exchangers

High efficiency, brazed aluminum coolers for cooling a wide variety of liquids and gases with ambient air. Lightweight, yet rugged. Capable of cooling multiple fluids in single unit. Models can be supplied with cooling fan and a variety of drives.

Plate Heat Exchangers

Compact units provide excellent heat transfer and small size. Plates are pressed from stainless steel, titanium and other alloys. Gaskets of nitrile, EPDM, Viton®, compressed fiber and Teflon® are used. Gasket-free welded and brazed designs available.

Genuine Manufactured Parts



Contact API Heat Transfer to order all of your replacement parts. Only genuine parts manufactured to the original specifications of your heat exchanger will ensure proper performance. Many items such as gaskets, bonnets, and PHE thermal plates are available from stock.

Form HB-100 2/08

© 2007 API Heat Transfer

Printed in USA

DOCUMENTO II:

PLANOS

INDICE

Plano P.1.- DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA……..……..…pág. 1

Plano P.2.- ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO ……....pág. 3

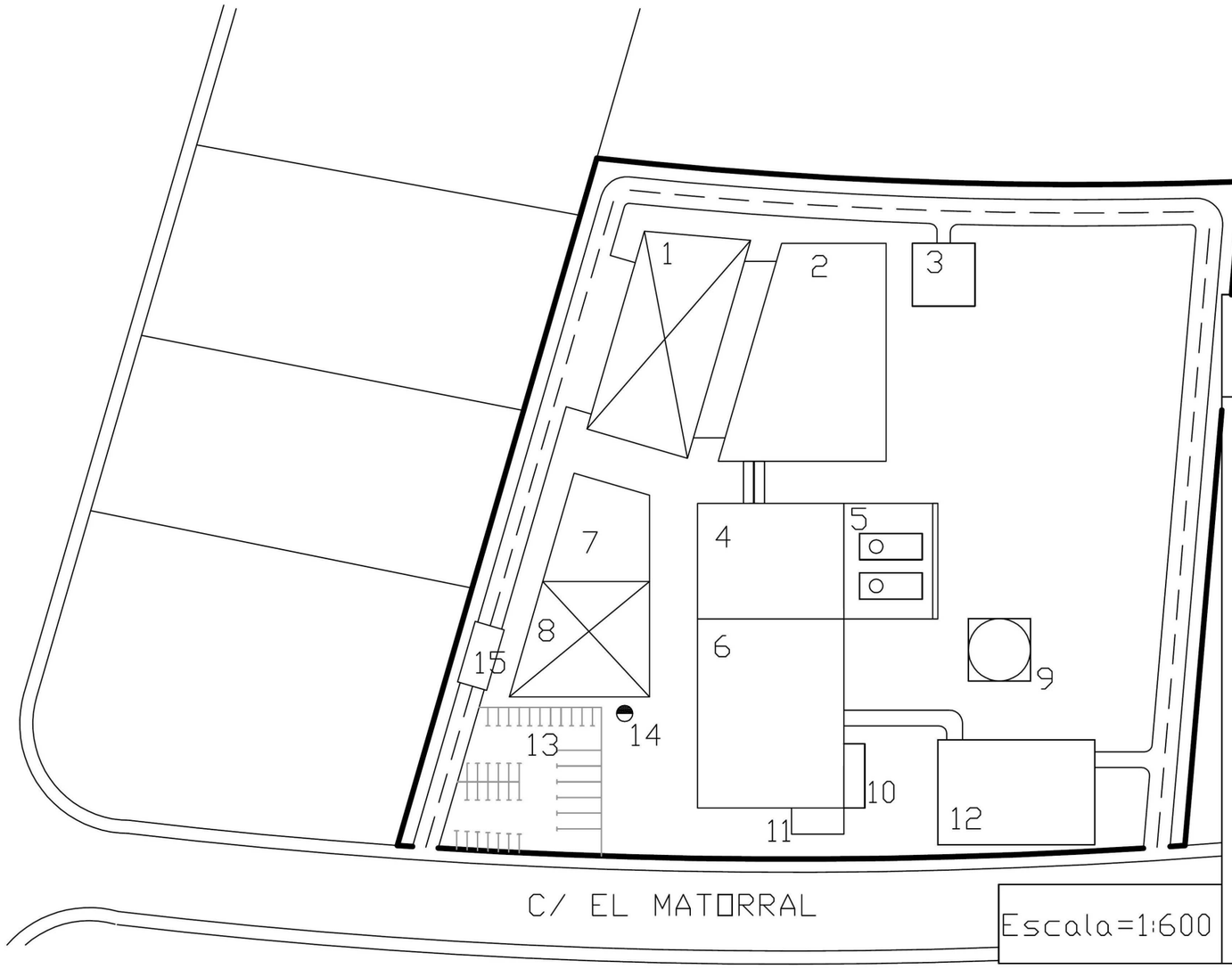
Plano P.3.- CONJUNTO REACTOR-CICLÓN……pág. 8

Plano P.4.- DETALLE DE LA PLACA DISTRIBUIDORA..…….pág. 10

Plano P.5.- DETALLE DEL CICLÓN.……pág. 12

Plano P.1.- DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA

Nº Rev	Nota de revisión	Fecha	Firma	Revisado



PLANO DE DISTRIBUCIÓN

LEYENDA

1 - PLAYA DE DESCARGA
2 - ALMACÉN RESIDUOS PLÁSTICOS
3 - ALMACÉN DE MAQUINARIA
4 - NAVE DE PRETRATAMIENTO
5 - SALA DE TURBINAS
6 - NAVE DE UNIDAD PIROLíTICA
7 - SALA DE EXPOSICIONES
8 - OFICINAS
9 - DEPURADORA
10 - SCRUBBERS
11 - TANQUE SEPARADOR
12 - ALMACÉN DE PRODUCTOS
13 - PARKING
14 - PUNTO DE ENCUENTRO
15 - BÁSCULA

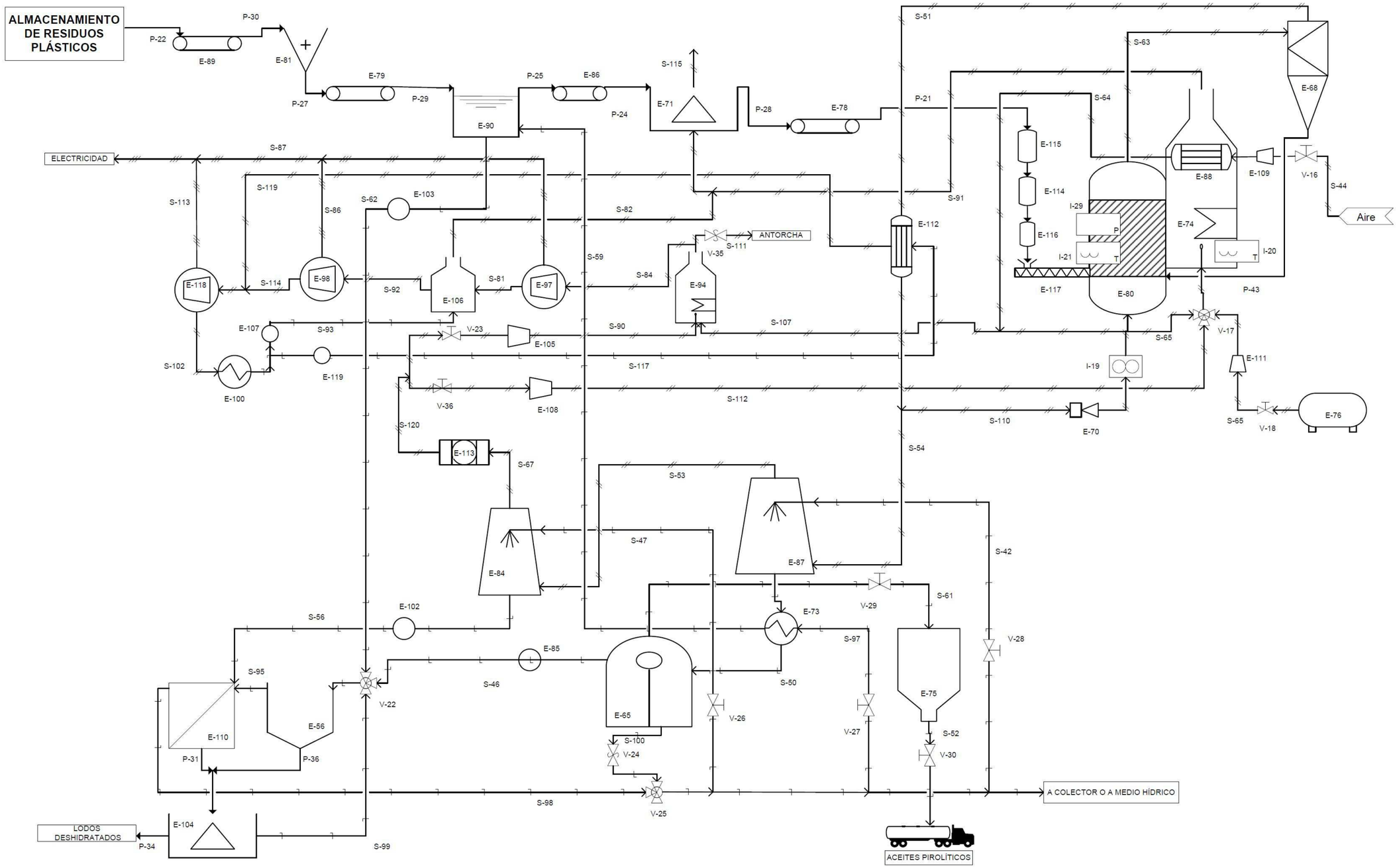
Escala=1:600

Ref.	Cantidad	Título/Nombre, designación, material, dimensión, etc.	Nº de artículo/Referencia

Diseñado por	Revisado por	Aprobado por - fecha	Nombre archivo	Fecha	Escala
Álvaro A. Gil García		17/03/2011	P.1	17/03/2011	1:600

Universidad de Cádiz	Distribución de Planta		
		Edición	Lámina
		0	1/1

Plano P.2.- ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO



Nota: los equipos que no pertenecen a la unidad pirolítica incluidos en el plano y la leyenda, así como la instrumentación, líneas de gases, líquidos, sólidos y la línea eléctrica han sido situados de forma meramente orientativa.

UNIVERSIDAD DE CÁDIZ

Proyecto: "Dimensionado de la unidad pirolítica de una planta de valorización energética de residuos plásticos en Andalucía."
Plano: P.2. "Esquema del proceso."
Autor: Álvaro A. Gil García.
Fecha: Mayo 2011

Leyenda plano P.2. “Esquema general del proceso”:

Equipos	**Descripción**
E-56 -	Clarificadora de la unidad de depuración de ARI
E-65 -	Separador de agua-aceites pirolíticos
E-68 -	Ciclón neumático separador de arena
E-70 -	Compresor-inyector del gas al lecho fluidizado
E-71 -	Secadora-centrifugadora de residuos plásticos
E-73 -	Intercambiador líquido-líquido
E-74 -	Horno para el reactor de lecho fluidizado
E-75 -	Almacenamiento de aceites pirolíticos
E-76 -	Depósito auxiliar de Gas Natural
E-78 -	Transportadora de residuos plásticos pretratados al reactor
E-79 -	Transportadora de residuos plásticos triturados al lavado
E-80 -	Reactor Lecho Fluidizado
E-81 -	Trituradora de plásticos
E-84 -	Scrubber
E-86 -	Transportadora de residuos plásticos lavados al secado
E-87 -	Torre de refrigeración
E-88 -	Recuperador de calor residual para precalentar el aire
E-89 -	Transportadora de residuos del almacén a la trituradora
E-90 -	Lavado de plásticos
E-94 -	Cámara de combustión del GHL previo a turbina de gas
E-97 -	Turbina de gas
E-98 -	Turbina de vapor a alta presión
E-100 -	Aerorefrigerador del sistema cerrado vapor-agua
E-104 -	Secadora-centrifugadora de lodos de la depuradora
E-106 -	Caldera de vapor
E-110 -	Depuradora
E-112 -	Intercambiador gas-líquido de carcasa y tubos
E-113 -	Filtro de mangas
E-114 -	Tolva de seguridad
E-115 -	Silo de alimentación
E-116 -	Silo de carga
E-117 -	Tornillo de alimentación
E-118 -	Turbina de vapor a baja presión

Línea de sólidos	**Descripción**
P-21 -	Residuos Plásticos triturados, lavados y secos a tornillo sinfín
P-22 -	Residuos Plásticos Mezclados
P-24 -	Residuos Plásticos triturados y lavados a centrifugadora
P-25 -	Residuos Plásticos triturados y lavados
P-27 -	Residuos Plásticos Triturados
P-28 -	Residuos Plásticos triturados, lavados y secos
P-29 -	Residuos Plásticos triturados a lavado
P-30 -	Residuos Plásticos a Trituradora
P-31 -	Lodos de depuradora
P-34 -	Lodos deshidratados
P-36 -	Lodos de clarificado
P-43 -	Recirculación arena arrastrada al reactor

Línea de líquidos	Descripción
S-42 -	Agua recirculada a Torre de Condensación
S-46 -	Agua separada de aceites pirolíticos a la depuradora
S-47 -	Agua recirculada a Scrubber
S-50 -	Aceites de pirólisis condensados y agua
S-52 -	Tubería de salida de aceites pirolíticos a camiones-cisterna
S-56 -	Agua Residual del Scrubber a la depuradora
S-61 -	Aceites pirolíticos separados a almacenamiento
S-62 -	Agua residual del lavado a la depuradora
S-93 -	Agua del circuito cerrado del aerorefrigerador a la caldera
S-95 -	Aguas Residuales clarificadas
S-97 -	Agua recirculada a etapa lavado
S-98 -	Agua depurada a la salida de la depuradora
S-99 -	Agua eliminada de los lodos, a depuradora.
S-100 -	Tubería de desagüe de seguridad del separador agua-aceites pirolíticos
S-117 -	Agua condensada del aerorefrigerador al intercambiador de carcasa y tubos

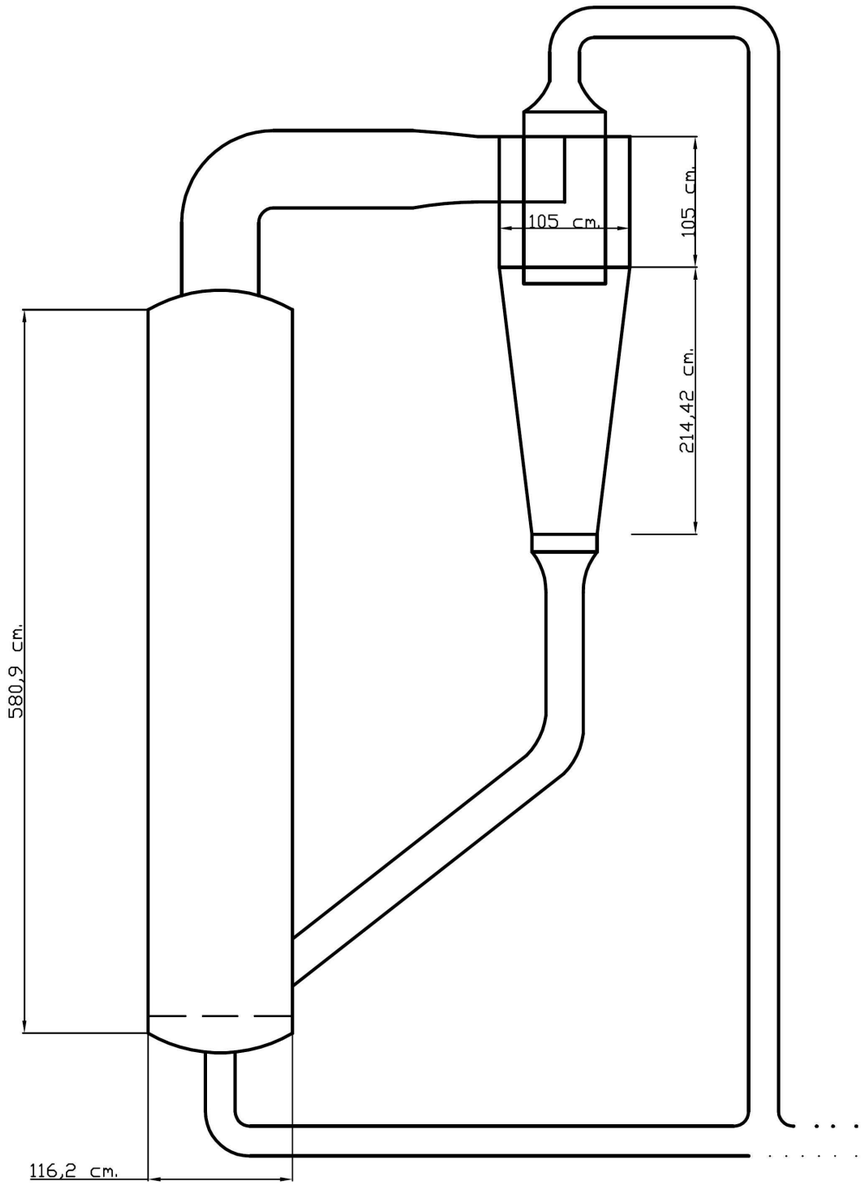
Línea de gases	Descripción
S-44 -	Entrada de aire a recuperador del horno para precalentamiento
S-45 -	Entrada auxiliar de Gas Natural al horno
S-51 -	Gases de pirólisis tras ciclón hacia el intercambiador de calor
S-53 -	GHL de la torre de refrigeración al scrubber
S-54 -	Gases de pirólisis enfriados a la Torre de Condensación
S-63 -	Gases de pirólisis calientes del reactor al ciclón
S-64 -	Aire precalentado a la salida del recuperador
S-65 -	Aire precalentado a horno
S-67 -	GHL del scrubber al friltro de mangas
S-69 -	GHL licuado a tanque almacenamiento
S-81 -	Humos de combustión de salida de la turbina de gas a la caldera
S-82 -	Humos de combustión de salida de caldera a la secadora de plásticos
S-84 -	Humos de combustión calientes de la cámara de combustión a la turbina
S-88 -	GHL licuado hacia la cogeneradora
S-90 -	GHL del filtro de mangas a la cámara de combustión
S-91 -	Humos de combustión del horno a secadora
S-92 -	Vapor a alta presión de la caldera a la turbina
S-102 -	Vapor residual de la turbina al aerorefrigerador
S-107 -	Aire precalentado a la cámara de combustión
S-110 -	Entrada gas de pirólisis recirculado al reactor
S-111 -	Salida gases pirólisis a antorcha (emergencia)
S-112 -	GHL del filtro de mangas al horno del reactor
S-114 -	Vapor a baja presión de la turbina de alta a la de baja presión
S-115 -	Salida de humos totales de combustión fríos tras paso por secadora
S-119 -	Vapor a baja presión del intercambiador hacia turbina vapor a baja presión
S-120 -	Salida del GHL limpio del filtro de mangas

Línea eléctrica	Descripción
S-86 -	Línea electricidad de la turbina de vapor a alta presión.
S-87 -	Línea electricidad de la turbina de gases de combustión.
S-113 -	Línea eléctrica de la turbina de vapor a baja presión.

Instrumentación	Descripción
I-19 -	Flujómetro del GHL inyectado al reactor
I-20 -	Termómetro horno
I-21 -	Termómetro reactor lecho fluidizado
I-29 -	Manómetro reactor lecho fluidizado
E-85 -	Bomba salida agua residual del separador a depuradora
E-102 -	Bomba agua residual de scrubber a depuradora
E-103 -	Bomba agua residual lavado a depuradora
E-105 -	Compresor GHL a cámara de combustión
E-108 -	Compresor GHL a horno del reactor
E-111 -	Compresor Gas Natural a horno del reactor
E-107 -	Bomba agua condensada circuito interno a caldera
E-109 -	Compresor aire a recuperador de calor del horno
E-119 -	Bomba agua condensada circuito interno a intercambiador carcasa y tubos
V-16 -	Válvula de paso del aire al recuperador
V-17 -	Válvula mezcladora aire/GHL/gas natural al quemador del horno
V-18 -	Válvula de paso del tanque de almacenamiento de gas natural
V-22 -	Válvula mezcladora aguas residuales
V-23 -	Válvula de paso del GHL licuado a la cámara de combustión
V-24 -	Válvula seguridad tanque separador de aceites a desagüe
V-25 -	Válvula mezcladora tanque separador de aceites a tubería desagüe
V-26 -	Válvula de paso agua recirculada a Scrubber
V-27 -	Válvula de paso agua recirculada a Lavado
V-28 -	Válvula de paso agua recirculada a Torre Condensación
V-29 -	Válvula de paso aceites de alquitrán a depósito almacenamiento
V-30 -	Válvula de paso aceites pirolíticos a camión-cisterna
V-35 -	Válvula seguridad de GHL a antorcha
V-36 -	Válvula de paso de GHL al horno

Plano P.3.- CONJUNTO REACTOR-CICLÓN

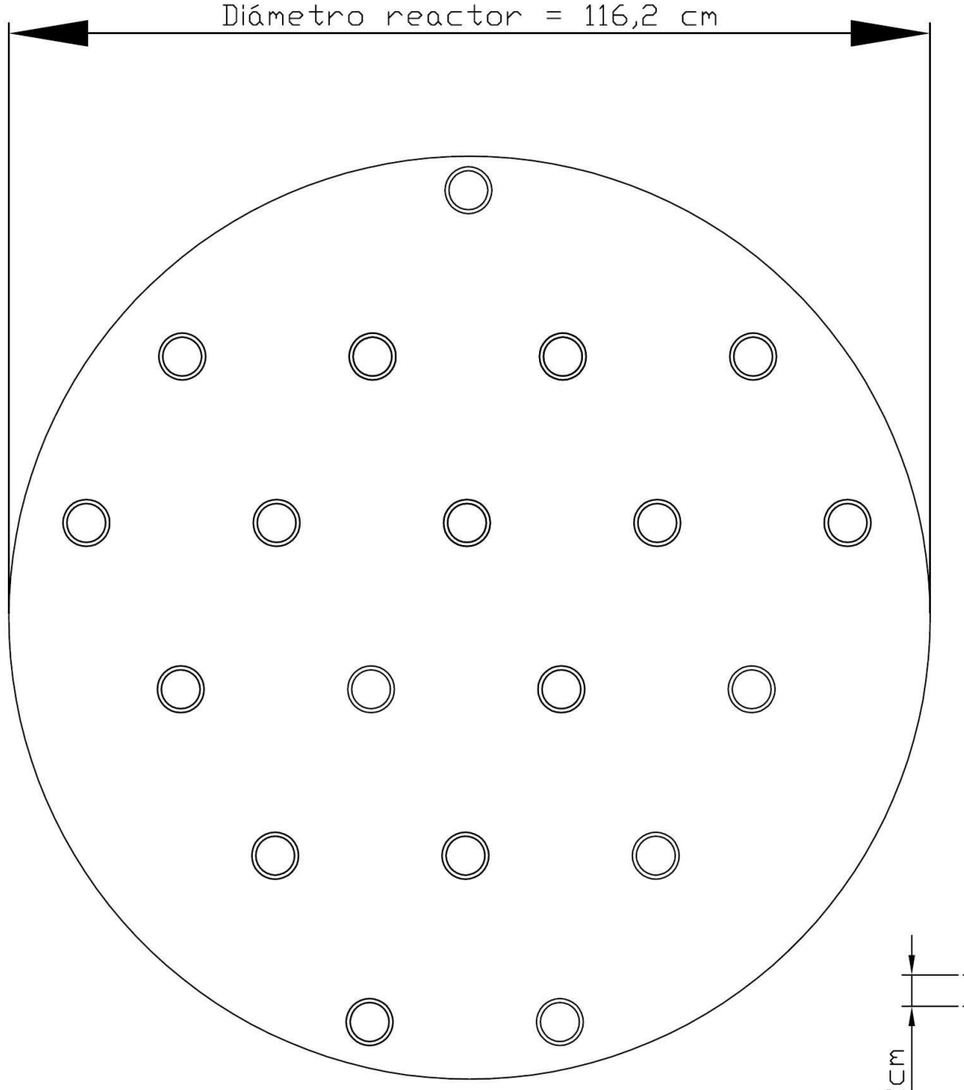
Nº Rev	Nota de revisión	Fecha	Firma	Revisado

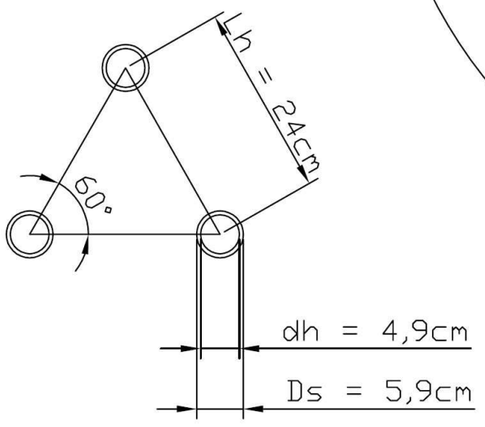


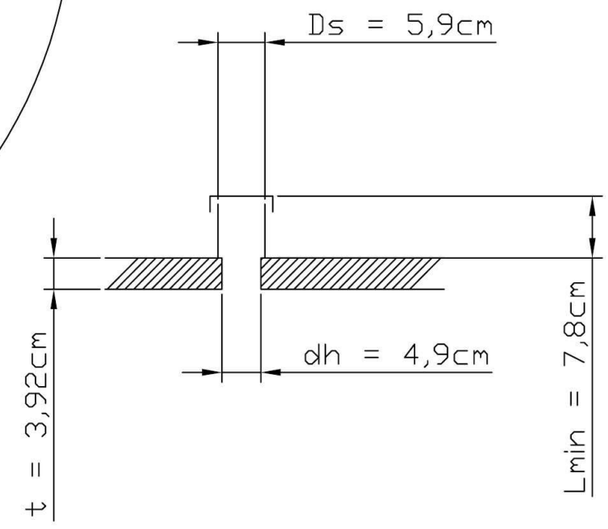
Ref.	Cantidad	Título/Nombre, designación, material, dimensión, etc.			Nº de artículo/Referencia	
Diseñado por Álvaro A. Gil García		Revisado por	Aprobado por - fecha 17/09/2011	Nombre archivo P.3	Fecha 17/09/2011	Escala
Universidad de Cádiz					Conjunto Reactor-Ciclón	
					Edición 0	Lámina 1/1

Plano P.4.- DETALLE DE LA PLACA DISTRIBUIDORA

Nº Rev	Nota de revisión	Fecha	Firma	Revisado



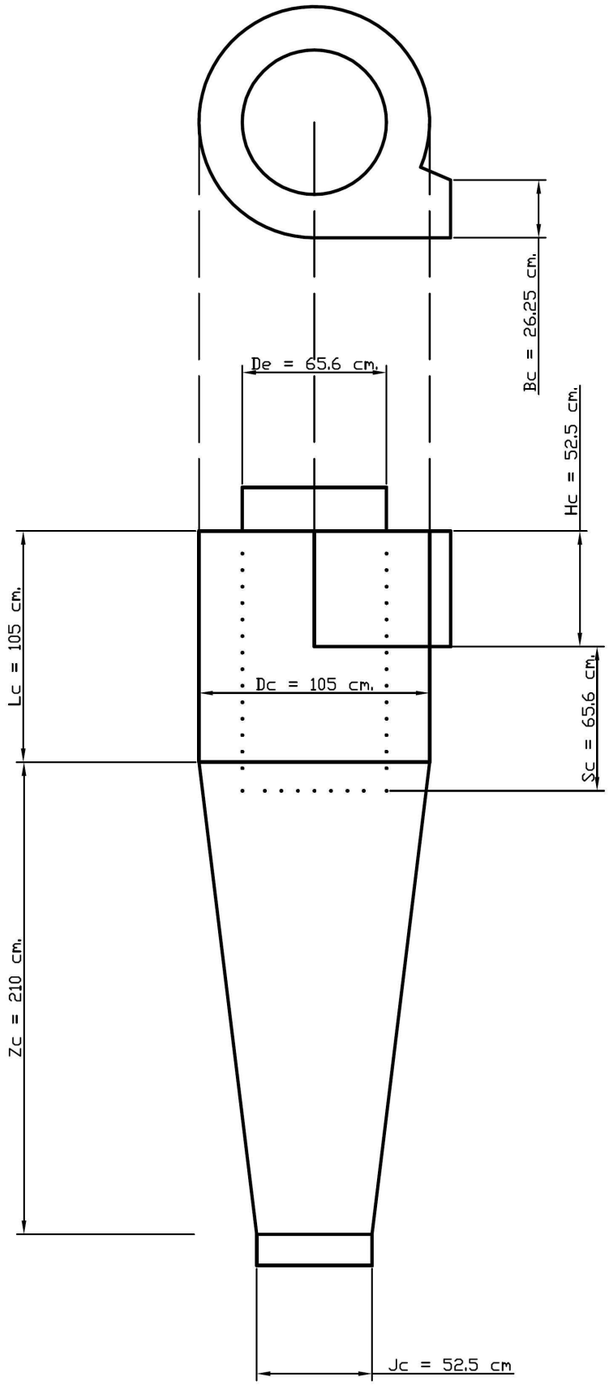


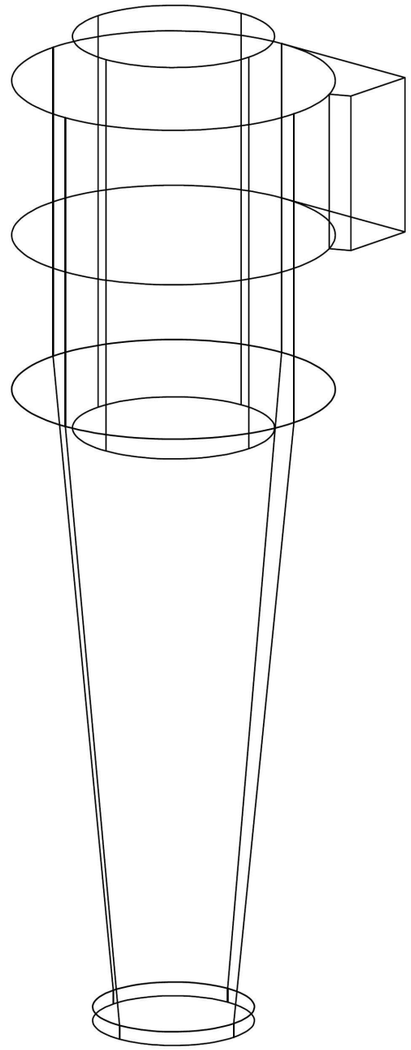


Ref.	Cantidad	Título/Nombre, designación, material, dimensión, etc.			Nº de artículo/Referencia	
Diseñado por Álvaro A. Gil García	Revisado por	Aprobado por - fecha 28/08/2011	Nombre archivo P.4		Fecha 28/08/2011	Escala
Universidad de Cádiz		Placa distribuidora del gas			Edición 0	Lámina 1/1

Plano P.5.- DETALLE DEL CICLÓN

Nº Rev	Nota de revisión	Fecha	Firma	Revisado





Ref.	Cantidad	Título/Nombre, designación, material, dimensión, etc.			Nº de artículo/Referencia	
Diseñado por Álvaro A. Gil García		Revisado por	Aprobado por – fecha 06/09/2011	Nombre archivo P.5	Fecha 06/09/2011	Escala
Universidad de Cádiz					Detalle Ciclón	
					Edición 0	Lámina 1/1

DOCUMENTO III:

PLIEGO DE CONDICIONES

INDICE

Capítulo 1: OBJETO.

1.1. Objeto del pliego de condiciones generales……...pag. 1

Capítulo 2: PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES DE LA OBRA.

2.1. Condiciones de índole facultativo

2.1.1. Cond. Legales, códigos, normas, leyes y reglamentos de referencia……....pág. 1

2.1.2. Dirección técnica. Atribuciones……pág. 6

2.1.3. Dirección facultativa. Atribuciones.....pág. 7

2.1.4. Personalidad del constructor……pág. 8

2.1.5. Libro de órdenes……pág. 8

2.1.6. Ejecución de la obra……..……pág. 8

2.1.7. Comprobación del replanteo……...pág. 11

2.1.8. Acciones previas a la ejecución de la obra.....pág. 13

2.1.9. Equipo y maquinaria……pág. 15

2.1.10. Ocupación de terrenos……pág. 16

2.1.11. Materiales……pág. 17

2.1.12. Obras defectuosas o mal ejecutadas.....pág. 19

2.1.13. Abono de la obra ejecutada…….……pág. 20

2.1.14. Modificación del contrato……...pág. 24

2.1.15. Suspensión de las obras……..….pág. 25

2.1.16. Resolución del contrato……pág. 25

2.1.17. Conclusión del contrato……pág. 26

2.2. Condiciones de índole económica

2.2.1. Principio general……pág. 30

2.2.2. Fianza. Ejecución de trabajos con cargo a la fianza y devolución de la misma…….….pág. 30

2.2.3. Precios……pág. 32

2.2.4. Obras por administración…….….pág. 36

2.2.5. De la valoración y abono de los trabajos……pág. 40

2.2.6. Las indemnizaciones mutuas……....pág. 45

2.2.7. Varios……..…..pág. 46

2.2.8. Obras no previstas……..pág. 49

2.2.9. Liquidaciones……..pág. 49

2.2.10. Garantía……..…..pág. 50

2.2.11. Acta de Recepción Provisional y Certificación de Liquidación Provisional..pág. 50

2.2.12. Acta de Recepción Definitiva y Liquidación Final……...pág. 50

2.2.13. Honorarios……....pág. 50

2.2.14. Coste de adquisición de materiales…….pág. 50

2.2.15. Revisiones de precios……pág. 51

2.2.16. Unidades de obra……..…pág. 51

2.2.17. Pruebas y análisis……..…pág. 52

2.2.18. Proveedores, marcas y firmas especializadas……..……..pág. 52

2.2.19. Estimación de precios a priori……..…pág. 52

2.3. Condiciones de índole legal

2.3.1. Modificaciones de obra……pág. 52

2.3.2. Derecho de rescisión……pág. 53

2.3.3. Rescisión por incumplimiento del contrato. ……pág. 53

2.3.4. Liquidación en caso de rescisión……pág. 53

2.3.5. Traspaso de contrato……pág. 54

2.3.6. Muerte o quiebra del contratista……pág. 54

2.3.7. Cuestiones no previstas o reclamaciones.....pág. 54

2.3.8. Fábricas y trabajos no previstos en este pliego……pág. 55

CAPITULO 1: OBJETO

1.1. Objeto del pliego de condiciones generales.

El objeto del presente Pliego de Condiciones consiste en definir las condiciones que regirán en el suministro y ejecución de la obra que conlleva el proyecto:

"Dimensionado de la unidad pirolítica de una planta de valorización energética de residuos plásticos en Andalucía**.**"

El alcance de esta especificación incluye, pero no limita, el suministro o prestación de todos los materiales, equipo, mano de obra, derechos de patente y servicios necesarios para la realización de una obra de estas características.

CAPÍTULO 2: PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES DE LA OBRA

2.1. Condiciones de índole facultativo.

2.1.1. Condiciones Legales, Códigos, Normas, Leyes y Reglamentos de referencia.

El contratista se compromete a cumplir toda la legislación y reglamentos vigentes referentes a Seguridad y Medicina del Trabajo.

Todas las instalaciones que se efectúen en el desarrollo del presente Proyecto deberán dar cumplimiento al Decreto 462/1971 de 11 de marzo, del Ministerio de la Vivienda, a fin de garantizar al máximo, tanto la seguridad de los trabajadores como la solidez de la construcción, así como lo establecido en:

- Reglamento de actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas (B.O.E. de 7 y 30 de diciembre de 1961 y de 2 y 7 de mayo de 1962).

- Real Decreto 2267/2004 de 3 de diciembre por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.
- Atribuciones complementarias para la Aplicación del Reglamento de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas. Orden del Ministerio de la Gobernación de 15 de marzo de 1963 (B.O.E. de 2 de abril de 1963).
- Real Decreto 919/2006, de 28 de julio, por el que se aprueba el Reglamento técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos y sus instrucciones técnicas complementarias ICG 01 a 11.
- Real Decreto 393/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de Autoprotección de los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia.
- Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos.
- Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, por el que se modifica el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, de 14 de mayo, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos, aprobado mediante Real Decreto 833/1988, de 20 de julio.
- Ley 22/2011 de 28 de Julio, de residuos y suelos contaminados; traspuesta de la Directiva Europea 2008/98/CE sobre residuos, y que deroga la anterior Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos, traspuesta a su vez de la anterior Directiva Europea 91/156/CEE, donde se definen los diferentes tipos de residuo, se regulan las competencias en materia de recogida y tratamiento de los mismos y se enuncia la jerarquía de gestión de los mismos.
- Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.
- Protección del Ambiente Atmosférico. Ley 38/1972 de la Jefatura de Estado de 21 de diciembre de 1972.

- Real Decreto 551/2006, de 5 de mayo, por el que se regulan las operaciones de transporte de mercancías peligrosas por carretera en territorio español.
- Normas Básicas de la Edificación. Acciones en la Edificación. NBE-EA-88.
- Real Decreto 2543/1994 de 29 de diciembre, por el que se aprueba la Norma de Construcción Sismorresistente.
- Desarrollo de la Ley de Protección al Medio Ambiente Atmosférico. Decreto 833/1975 del Ministerio de Planificación de Desarrollo del 6 de febrero de 1975.
- PGOU de Aznalcóllar con fecha de publicación 18 de marzo de 2002, y se aprueba el documento complementario CE/AD del 26 de septiembre de 2008, con fecha de publicación en el BOJA el 28 de enero de 2009.
- Ordenanza municipal de vertidos de Aznalcóllar.
- Orden de 10 de agosto de 1976 sobre normas técnicas de análisis y valoración de contaminantes de naturaleza química. (B.O.E de 10 de noviembre de 1976).
- Normas del Ministerio de Trabajo sobre Seguridad e Higiene (B.O.E. de 12 y 16 de marzo de 1971).
- Decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico.
- Orden de 18 de octubre de 1976 sobre prevención y corrección de la contaminación industrial de la atmósfera.
- Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (B.O.E. de 9 de octubre de 1973 y 27, 28, 29 y 31 de diciembre de 1973).
- Ley 26/2007, de 23 de Octubre, de Responsabilidad Medioambiental.
- Real Decreto 2090/2008, de 22 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo parcial de la Ley 26/2007, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental.
- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para tuberías de abastecimiento de agua. Orden del ministerio de Obras Públicas del 28 de julio de 1974; (B.O.E. de 2 y 3 de octubre de 1974).

- Normas básicas para instalaciones interiores de suministro de agua. Orden del Ministerio de Obras Públicas de 9 de diciembre de 1979 (B.O.E. de 13 de enero de 1976).
- Real Decreto 1244/1979 de 4 de abril por el que se aprueba el Reglamento de Aparatos a Presión.
- Real Decreto 379/2001, de 6 de abril por el que se aprueba el Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias MIE-APQ-1, MIE-APQ-2, MIE-APQ-3, MIE-APQ-4, MIE-APQ-5, MIE-APQ-6 y MIE-APQ-7.
- Código ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, 1986, sección VIII.
- Real Decreto 212/2002, de 22 de febrero, por el que se regulan las emisiones sonoras en el entorno debidas a determinadas máquinas de uso al aire libre.
- Ley 37/2003, de 17 de noviembre, de Ruido.
- Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental.
- Real Decreto 1367/2007 que desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, de Ruido.
- Normativa específica de Seguridad e Higiene en el Trabajo:

    - Lugares de trabajo:

        - Directiva del Consejo 89/391/CEE, de 12 de junio de 1989; relativa a la aplicación de medidas para promover la mejora de la seguridad y la salud de los trabajadores en el trabajo.
        - Directiva del Consejo 89/654/CEE, de 30 de noviembre de 1989; relativa a las disposiciones mínimas de seguridad y de salud en los lugares de trabajo (primera directiva específica con arreglo al apartado 1 del artículo 16 de la Directiva 89/391/CEE).

    - Ventilación y climatización:

- Orden de 9.3.71 (Ministerio de Trabajo). Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el trabajo. Art. 30: Ventilación, temperatura y humedad.
- Orden de 16.7.81 (Ministerio de Presidencia). Instrucciones Técnicas Complementarias de Reglamento de Instalaciones de Calefacción, Climatización y Agua Caliente Sanitaria.
- IT.IC.02: Exigencias ambientales y de confortabilidad.

o Ruido:

- Real Decreto 1316 de 1989, “Sobre la protección de los trabajadores frente a los riesgos derivados de la exposición al ruido durante el trabajo”.

o Vibraciones:

- Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Artículo 31: Ruidos, vibraciones y AtribucionesH. (Orden del Ministerio de Trabajo de 9/3/71).
- Norma ISO 2631.
- Norma ISO 5349.

o Iluminación:

- Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo (OGSHT.) (O.M T.9 de marzo 1971).
- Norma internaciones ISO 8995. (Primera edición 1989-10-01).

o Calor y frío:

- Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Orden de 9 de marzo de 1971.
- Ambientes térmicos. Instrumentos y métodos de medida de los parámetros físicos. Norma española UNE-EN 27726, marzo de 1995.
- Ergonomía. Determinación de la producción de calor metabólico.
- Norma española UNE-EN 28996, marzo 1995.
- Ambientes calurosos. Estimación del estrés térmico del hombre en el trabajo basado en el índice WBGT. Norma española UNE-EN-27243, enero 1995.
- Norma ISO 7933, julio 1989.
- Norma europea CEN 27730, julio 1993.

El contratista está obligado a la observación y cumplimiento de la Reglamentación del Trabajo correspondiente y de las demás disposiciones legales que regulen las relaciones entre Patronos y Obreros y todas aquellas de carácter social vigentes o que se dicten el tiempo de realización de la obra.

Nada que aparezca en esta especificación se interpretará como que el suministrador queda relegado de su responsabilidad de cumplir con todos los Códigos, Normas y Reglamentos aplicables.

2.1.2. Dirección técnica. Atribuciones.

Es atribución exclusiva del Ingeniero la Dirección Facultativa de la obra, así como la coordinación de todo el equipo técnico que en ella pudiera intervenir. En tal sentido le corresponde realizar la interpretación técnica, económica y estética del Proyecto, así como señalar las medidas necesarias para llevar a cabo el desarrollo de la obra estableciendo las adaptaciones, los detalles complementarios y modificaciones precisas para la realización correcta de la obra.

La autoridad del Ingeniero es plena, pudiendo recabar la inalterabilidad del Proyecto, salvo que expresamente renuncie a dicho derecho o fuera rescindido del convenio de prestación de servicios suscrito con el Promotor, en los términos y condiciones legalmente establecidos.

El Ingeniero Técnico deberá entregar a su debido tiempo todos los documentos que integran el Proyecto desarrollando las soluciones de detalle y de obra que sean necesarias a lo largo de la misma.

Son obligaciones específicas del Ingeniero Técnico dar la solución a las instalaciones, establecer soluciones constructivas y adoptar soluciones oportunas en los casos imprevisibles que pudieran surgir, fijar los precios contradictorios, redactar las certificaciones económicas de la obra ejecutada, redactar las actas o certificaciones de comienzo y final de las mismas.

Estará obligado a prestar la asistencia necesaria, inspeccionando su ejecución, realizando personalmente las visitas necesarias y comprobando durante su transcurso que se cumplen las hipótesis del Proyecto, introduciendo en caso contrario las modificaciones que crea oportunas.

2.1.3. Dirección Facultativa. Atribuciones.

Estará especializado fundamentalmente en el control, organización y ejecución de las obras, vigilando la estricta observancia del Proyecto y de las órdenes e instrucciones del Ingeniero Técnico Director.

Vigilará el cumplimiento de las Normas y Reglamentos vigentes, ordenará la elaboración y puesta en obra de cada una de las unidades y de los sistemas constructivos. Verificará la calidad de los materiales, dosificaciones y mezclas; comprobará las dimensiones, formas y disposición de los elementos resistentes y que su colocación y características correspondan a las que se fijan en el Proyecto.

Organizará la ejecución y utilización de las instalaciones provisionales y medios auxiliares y andamiajes a efecto de la seguridad, vigilará los encofrados, apeos, apuntalamientos y demás elementos resistentes auxiliares, incluido su desmontaje.

Llevará la medición de las unidades de obra construidas, así como la confección del calendario de obra, vigilando los plazos en él. Resolverá los problemas imprevisibles que puedan aparecer durante la ejecución dentro de la esfera de su competencia.

2.1.4. Personalidad del constructor.

El constructor adjudicatario actuará de patrono legal adjudicatario aceptando todas las responsabilidades correspondientes, y quedando obligado al pago de los jornales que legalmente se establezcan, y en general, a todo cuanto se legisle al particular antes o durante la ejecución de la obra, sin perjuicio de reclamar los sobreprecios o indemnizaciones a que haya lugar, según esta norma.

2.1.5. Libro de órdenes.

El Contratista tendrá en la obra el Libro de órdenes y asistencias para que los Técnicos Directores de la obra consignen cuantas órdenes crean oportunas y las observaciones sobre las que deban quedar constancia.

El Contratista, firmado su enterado, se obliga al cumplimiento de lo allí ordenado si no reclama por escrito dentro de las cuarenta y ocho horas siguientes al Director de la obra.

2.1.6. Ejecución de la obra.

Álvaro A. Gil García.
Ingeniero Químico, Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz.

Las obras serán ejecutadas por una empresa especializada conforme al presente proyecto, redactado por el Ingeniero Químico Álvaro Gil García, quien nombrará a un Director Facultativo de las obras.

Se entregarán los plenos precios, que constan además de los documentos de Memoria, Presupuestos y Planos. Con la documentación entregada, se compromete a cumplir el plazo estipulado en el presente Documento.

- Inspección de la obra:

Incumbe a la Propiedad ejercer de una manera continua y directa, la inspección de la obra durante su ejecución a través de la Dirección Técnica. El Contratista o su Delegado deberán acompañar en sus visitas inspectoras al Ingeniero Director.

- Conservación de la obra:

El Contratista está obligado no sólo a la ejecución de la obra, sino también a su conservación hasta su recepción definitiva. La responsabilidad del Contratista, por faltas que en la obra puedan advertirse, se extiende al supuesto que tales faltas se deban exclusivamente a una indebida o defectuosa conservación de las unidades de obra, aunque éstas hayan sido examinadas y encontradas conformes por la Dirección, inmediatamente después de su construcción o en cualquier otro momento, dentro del periodo de vigencia del contrato.

Al abandonar el Contratista el edificio, tanto por la buena terminación de la obra, como en el caso de rescisión del contrato, está obligado a dejarlo desocupado y limpio, en caso de no hacerlo así le será fijado un plazo no inferior a diez días por el Ingeniero Director, pasado el cual, la Propiedad dispondrá de cuantos materiales, herramientas, muebles, etc, que queden en la obra y procederá a la limpieza del edificio, todo ello por cuenta del Contratista.

- Señalización de la obra:

El Contratista está obligado a instalar señales precisas para indicar el acceso a la obra, la circulación en la zona que ocupan los trabajos y los puntos posibles de peligro debido a la marcha de aquellos, tanto en dicha zona como en sus lindes inmediatas.

- Seguros:

El Instalador se compromete a asegurar con una compañía de seguros de ámbito y garantía nacional, el resarcimiento de los daños que se produzcan en las obras de este pliego, por vicios de materiales y construcción general, todas aquellas responsabilidades que pueden derivarse de la misma en aplicación de lo dispuesto en la sección segunda, capítulo III del Código Civil y artículos 1902, 1903 y 1909 del mismo cuerpo legal, y por los plazos de garantía y prescripción que les corresponde.

Para el comienzo de ejecución de las obras, el instalador deberá mostrar al Director de las obras los documentos justificativos de haber cumplido la anterior condición. El Director de las obras no autorizará el comienzo de las mismas si a su juicio no están lo suficientemente aseguradas y garantizadas las responsabilidades de las obras en sí.

- Incumplimiento de los plazos:

En caso de no quedar finalizadas las obras objeto de este contrato en el plazo fijado en el mismo por causas imputables a la empresa instaladora, se le impondrá una multa de 900 € en concepto de indemnización que le será deducida de la liquidación de la obra.

Bien entendido quede que no podrá librarse de su obligación de construir mediante el pago de esta prestación que se estima como cláusula penal. No

podrá aceptarse como justificación de morosidad en la terminación de las obras el suministro de materiales o cualquier otra causa que no sea de fuerza mayor, la cual será apreciada por la Dirección Facultativa.

No se consideran causa de fuerza mayor: nevadas, hielos y otros fenómenos de naturaleza análoga, extremos que deberán ser acreditados por el Adjudicatario en tiempo y modo oportuno.

- Comunicación de los retrasos en las obras:

Los retrasos que puedan surgir en las obras por causas ajenas a la voluntad del Contratista deberán ser comunicados y debidamente justificados mediante comunicación escrita al Director de Obras y a la Propiedad en el plazo máximo establecido a tal efecto, desde la fecha en que se hayan producido.

Caso de que no se efectúe la comunicación en dicho plazo, o no se apruebe por el Director de la obra los citados retrasos, no serán reconocidos a efectos de los plazos y especificaciones anteriores.

2.1.7. Comprobación del replanteo.

- Acta de comprobación del replanteo:

Dentro del plazo de quince días desde la fecha de formalización del contrato, salvo casos justificados, se procederá, en presencia de la Propiedad o personas en quien delegue, del Contratista o de su representante debidamente autorizado, a efectuar la comprobación del replanteo hecho previamente por el Contratista, extendiéndose acta de éste, que será firmada por los presentes como partes interesadas, recibiendo cada una de ellas un ejemplar de la misma.

El acta de comprobación del replanteo reflejará la conformidad o disconformidad del mismo, respecto de los documentos contractuales del proyecto, con especial referencia a las características geométricas de las obras, a la autorización para la ocupación de los terrenos necesarios y a cualquier otro punto que pueda afectar al cumplimiento del contrato.

Cuando del resultado de la comprobación del replanteo se deduzca la viabilidad del proyecto, a juicio del Ingeniero Director de la obra y sin reserva por parte del Contratista, se dará a aquel la autorización para iniciarla, haciéndose constar este extremo explícitamente en el acta extendida, de cuya autorización quedará notificado el Contratista por el hecho de suscribirla y emplazándose a contar el plazo de ejecución de las obras desde el día siguiente al de la firma del acta.

- Gastos de comprobación del replanteo:

Serán de cuenta del Contratista los gastos de los materiales, los de su propio personal y los de los peritos que estime necesarios para la realización de la comprobación del replanteo.

- Modificaciones acordadas:

Si como consecuencia de la comprobación del replanteo, se deduce la necesidad de introducir modificaciones en el proyecto, el Ingeniero Director redactará en el plazo de quince días y sin perjuicio de la remisión inmediata del acta, una estimación razonada del importe de dicha modificación.

Si la Propiedad decide la modificación del proyecto, se procederá a redactar las modificaciones precisas para su viabilidad, acordando la suspensión temporal total o parcial de la obra, y ordenando en éste último caso la inicialización de los trabajos en aquellas partes no afectadas por las modificaciones previstas en el proyecto.

2.1.8. Acciones previas a la ejecución de la obra.

- Verificación y conformidad del proyecto:

El Contratista tiene la obligación de verificar todos los documentos del proyecto. En el caso de que el Contratista no indique a la Dirección Técnica, antes de la firma del acta de autorización, los posibles errores existentes, se hace responsable de los mismos.

- Acta de autorización de inicio de la obra:

El Contratista asistirá al replanteo del solar y fijación de rasantes, siendo los gastos que se produzcan tomados a su cuenta.

Previamente al inicio de las obras, deberá realizarse un acta de autorización de inicialización de las mismas, entre la Dirección Técnica y el Contratista. Este acta contendrá el Acta del replanteo, los plazos de ejecución, contratos, precios descompuestos, licencia de obra, nombramiento del personal necesarios y aceptación del Contratista de lo expuesto en los documentos del proyecto.

- Oficina para servicio de la dirección:

El Contratista habilitará una oficina por su cuenta para servicio de la Dirección Técnica, siendo aprobado su diseño y emplazamiento previamente por ésta. La oficina constará de los elementos que juzgue necesarios la Dirección Técnica y el Libro de Ordenes o fotocopia del mismo, así como copia de la documentación técnica usada en la obra.

- Conservación de líneas de referencia:

La Dirección Técnica con la colaboración del Contratista procederá a replantear sobre el terreno las líneas de referencia fundamentales y los puntos de nivel necesarios para el replanteo general.

- Presentación del programa de trabajo:

El Contratista está obligado a presentar en el plazo de un mes, salvo causas justificadas, desde la firma del contrato, un programa de trabajo. La Propiedad resolverá sobre él dentro de los treinta días siguientes a su presentación.

La resolución puede imponer modificaciones, por el cumplimiento de determinadas prescripciones, al programa de trabajo presentado, siempre que no contravenga las cláusulas del contrato.

En el programa de trabajo, a presentar en su caso por el Contratista, se deberán incluir los siguientes datos:

- Ordenación en parte o clase de obras, de las unidades que integran el proyecto con expresión del volumen de éstas.
- Determinación de los medios necesarios, tales como personal, instalaciones, equipo y materiales, con expresión de su rendimiento medio.
- Valoración en días de calendario de los plazos de ejecución de las diversas obras y operaciones preparatorias, equipo e instalaciones, y los de ejecución de las diversas partes de la obra.
- Valoración mensual y acumulada de la obra programada.
- Gráficos de las diversas actividades o trabajos.

- Definición de obra por órdenes:

Se concederá como definición de obra a realizar todas las órdenes que se dicten a lo largo de la ejecución de la obra por la Dirección Técnica o sus ayudantes delegados.

Cuando las órdenes dictadas sean modificaciones de unidades definidas en el proyecto, se podrá exigir por el Contratista que la Propiedad las autorice previamente, siempre y cuando estas exigencias se realicen ante la Dirección Técnica y en un plazo que no exceda de dos días después del recibo de dichas órdenes.

- Responsabilidad sobre la finalización de las obras:

El Contratista es el único responsable de la ejecución de las obras contratadas, y del cumplimiento del plazo de finalización de las mismas, no teniendo derecho a indemnización por los errores que cometiera durante su construcción.

2.1.9. Equipo y maquinaria:

- Aportación de equipo y maquinaria:

El Contratista queda obligado a aportar a las obras el equipo de maquinaria y medios auxiliares que sean precisos para la buena ejecución de aquella en los plazos parciales y totales convenidos por el contrato.

En caso de que para la ejecución del contrato hubiera sido condición necesaria la aportación por el Contratista de un equipo de maquinaria y medios auxiliares concretos y detallados, el Ingeniero Director exigirá aquella aportación en los mismos términos y detalles que se fijaron en tal ocasión.

Cada elemento de los que constituyen el equipo será reconocido por la Dirección, anotándose sus altas y bajas de puesta en obra con el inventario del

equipo. Podrá también rechazar cualquier elemento que considere inadecuado para el trabajo de la obra, con derecho del Contratista a reclamar frente a tal resolución a la Propiedad en el plazo de diez días contados a partir de la notificación que le haga por escrito el Ingeniero Director.

- Insuficiencia de equipo:

El Contratista no podrá efectuar reclamación alguna fundada en la insuficiencia de la dotación o del equipo que la Propiedad hubiera podido prever para la ejecución de la obra, aun cuando éste estuviese detallado en alguno de los documentos del proyecto.

2.1.10. Ocupación de terrenos.

- Ocupación temporal de terrenos a favor del contratista:

Son de cargo del Contratista la gestión de los permisos relativos a la ocupación de bienes durante la obra y el pago de las tasas correspondientes de los mismos.

- Uso temporal de bienes de la propiedad:

Cuando el Contratista ocupe temporalmente edificios y otros bienes inmuebles de la Propiedad, tendrá la obligación de conservarlos y repararlos en caso de deterioro.

- Vigilancia de terrenos y bienes:

Será la Dirección Técnica la que dictamine el momento en que el Contratista podrá ocupar los terrenos afectados por la obra. El Contratista será el responsable de la vigilancia de los terrenos y bienes que haya en los mismos.

2.1.11. Materiales.

- Procedencia de los materiales:

El Contratista tiene libertad para obtener los materiales que las obras precisen, siempre que los mismos reúnan las condiciones exigidas en el Pliego de prescripciones técnicas del presente proyecto.

Si durante la ejecución del contrato la Propiedad resolviera introducir en el proyecto modificaciones que produzcan aumentos o reducciones e incluso supresión de las unidades de obra definidas, serán obligatorias para el Contratista estas disposiciones, sin que tengan derecho alguno a reclamar ninguna indemnización.

- Aprovechamiento de los materiales:

El Contratista puede contratar con destino a la obra contratada, las sustancias minerales que se encuentran en los terrenos de la Propiedad, así como abrir y explorar canteras en ellos, con sujeción a las normas y establecidas por ente titular de aquellas, con obligación de darle aviso anticipado de sus actividades previstas y respetando o reponiendo las servidumbres existentes, así como adoptando las medidas oportunas para no perturbar el libre y seguro uso de dichos terrenos.

- Materiales procedentes de las excavaciones:

Los materiales o productos resultantes de las excavaciones en la obra y que puedan aprovecharse por la Propiedad serán acopiadas por la misma en los puntos o formas que ordene la Dirección, siéndole de abono los gastos suplementarios de transporte, vigilancia y almacenamiento.

- Ensayos y análisis de los materiales y unidades de obra:

La Dirección puede ordenar que se verifiquen los ensayos y análisis de los materiales y unidades de obra que en cada caso resulten pertinentes y los gastos que se originen serán por cuenta del Contratista, hasta un importe máximo del 1% del presupuesto de la obra.

La misma Dirección fijará el número, forma y dimensiones y demás características que deben reunir las muestras y probetas para ensayos y análisis, caso de que no exista disposición general al efecto ni establezca tales datos el Pliego de prescripciones Técnicas Particulares.

Si el Ingeniero Director tuviese la necesidad de realizar ensayos y pruebas una vez rebajado el 1 % del presupuesto de ejecución material, el Contratista tiene la obligación de realizarlos, siendo su abono a cuenta de la Propiedad, salvo en el caso de que los resultados fuesen desfavorables a juicio del Ingeniero Director, en tal caso se harán a cuenta del Contratista. Este y a sus expensas, podrá solicitar un nuevo ensayo realizado por el laboratorio elegido de común acuerdo con la Dirección y cuyo resultado servirá de base para la resolución pertinente a ésta.

- Almacenes:

El Contratista debe instalar en la obra, o por su cuenta, los almacenes precisos para asegurar la conservación de los materiales, evitando su destrucción o deterioro y siguiendo en su caso las instrucciones que a tal efecto reciba de la Dirección.

- Recepción y recusación de materiales:

El Contratista sólo puede emplear los materiales en la obra previo examen y aceptación de la Dirección Técnica en los términos y forma que ésta señale para el correspondiente cumplimiento de las condiciones convenidas.

Si la Dirección no aceptase los materiales sometidos a su examen, deberá comunicarlo por escrito al Contratista, señalando las causas que motivan tal decisión. En todo caso la recepción de los materiales por la Dirección no exime al Contratista de sus responsabilidades de cumplimiento de las características exigidas para los mismos en el correspondiente Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

- Retirada de materiales no empleados en la obra:

Los materiales recusados serán retirados fuera de la obra en el menor plazo posible, pudiendo entre tanto el Ingeniero Director no certificar la ejecución de la parte afectada por dichos materiales.

2.1.12. Obras defectuosas o mal ejecutadas.

Hasta que tenga lugar la recepción definitiva, el Contratista responderá de la ejecución de la obra contratada y de las faltas que en ella hubiera. El Contratista quedará exento de responsabilidad cuando la obra sea defectuosa o mal ejecutada como consecuencia inmediata de una orden de la Propiedad o de vicio del proyecto, salvo que éste haya sido modificado por el Contratista en la obra.

Si se advierten vicios o defectos en la construcción o se tienen razones fundadas para creer que existen ocultos en la obra ejecutada, la Dirección ordenará, durante el curso de la ejecución de las unidades de obra y siempre antes de la recepción definitiva, la demolición o reconstrucción de las unidades de obra en que se den aquellas circunstancias o las acciones precisas para comprobar la existencia de tales defectos ocultos.

Si la Dirección ordena la demolición y reconstrucción por advertir vicios y defectos en la construcción, los gastos de estas operaciones serán por cuenta

del Contratista, con derecho de éste a reclamar ante la Propiedad contratante en el plazo de diez días contados a partir de la notificación escrita de la Dirección.

Si la Dirección estima que las unidades de obra defectuosas y que no cumplen las condiciones del contrato son sin embargo admisibles, puede proponer a la Propiedad la aceptación de las mismas, con la consiguiente rebaja de los precios. Los precios de las unidades de obra de trabajos que no figuren en el Contrato se fijarán de forma contradictoria entre la Dirección Técnica y el Contratista o su representante.

El Contratista presentará los precios en forma descompuesta, siendo necesaria su aprobación antes de ejecutar las unidades de obra correspondientes. Para recoger el acuerdo sobre estos precios se levantarán actas, que deben ser firmadas por la Dirección Técnica, la Propiedad y el Contratista o sus representantes autorizados.

Se prevé también los casos de revisión por alza o baja de éstos. Para revisiones en alza, el Contratista puede solicitar a la Propiedad la revisión, siempre que haya cumplido lo dispuesto anteriormente, se comprometerá además a informar por escrito a la Propiedad de cualquier alteración de los precios contratados. El nuevo precio y la fecha de aplicación se acordará por ambas partes.

Si la Propiedad o la Dirección Técnica no estuvieran de acuerdo con los nuevos precios, esta última podrá proponer al Contratista unos nuevos precios, teniendo éste la obligación de aceptarlos.

2.1.13. Abono de la obra ejecutada:

- Medición y valoración:

- Mediciones:

La Dirección realizará mensualmente y en la forma que establece el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, la medición de las unidades de obra ejecutadas durante el periodo de tiempo anterior. El Contratista o su delegado podrán presenciar la ejecución de tales mediciones.

Para las obras o parte de ellas cuyas dimensiones y características hayan de quedar posterior y definitivamente ocultas, el Contratista está obligado a avisar a la Dirección con la suficiente antelación a fin de que esta pueda realizar las correspondientes mediciones y toma de datos, levantando los planos que la definen, cuya conformidad suscribirá el Contratista o su delegado.

- Relaciones valoradas:

El Director tomando como base las mediciones de las unidades de obra ejecutadas, a que se refiere el artículo anterior y los precios contratados, redactará la correspondiente relación valorada.

No podrá omitirse la redacción de dicha relación valorada mensual por el hecho de que, en algún mes, la obra realizada haya sido de pequeño volumen o incluso nulo, a menos que la Propiedad hubiese acordado la suspensión de la obra.

En la misma fecha en que la Dirección tramita la relación valorada, remitirá al contratista una copia de la misma, a los efectos de conformidad o reparo, que el Contratista podrá formular a partir de los quince días contados desde la recepción de los documentos. En su defecto, y pasado este plazo, el documento se considerará aceptado por el Contratista, como si él hubiera suscrito en ello su conformidad.

- Certificaciones:

Las certificaciones se expedirán por el Ingeniero Director tomando como base la relación valorada y se tramitará en los siguientes diez días del periodo que corresponda.

De su importe deducirá el Ingeniero Director el tanto por ciento que para la constitución de fianza se haya establecido en el contrato y de no especificarse será del diez por ciento de la contrata.

- Abono de las obras:

- Requisitos para el abono:

El Contratista tiene derecho al abono, con arreglo a los precios convenidos de la obra que realmente ejecute con relación al proyecto que sirvió de base para la licitación, a sus modificaciones aprobadas y a las órdenes dadas por escrito a la Propiedad.

- Mejoras propuestas por el contratista:

El Contratista podrá proponer, siempre por escrito a la Dirección, la sustitución de unidades de obra por otras que reúnan mejores condiciones, el empleo de materiales de más esmeradas preparaciones o calidades que los contratados, la ejecución con mayores dimensiones de cualquier parte de la obra, o en general cualquier otra mejor o de análoga naturaleza que juzgue beneficiosa para ella.

- Precios:

Todos los trabajos, medios auxiliares y materiales que sean necesarios para la correcta ejecución y acabado de cualquier unidad de obra se considerarán

incluidos en el precio de la misma aunque no figuren todos ellos especificados en la descomposición o descripción de los precios.

- Partidas alzadas:

Las partidas alzadas se abonarán conforme se indique en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. En su defecto, se considerarán a los efectos de su abono:

- Como “Partidas alzadas a justificar”, las susceptibles de ser medidas en todas sus partes como unidades de obra, con precios unitarios.
- Como “partidas alzadas de abono íntegro”, aquellas que se refieren a los trabajos cuya especificación figure en los documentos contractuales del proyecto, y no sean susceptibles de medición según Pliego.

Las partidas alzadas a justificar se abonarán a los precios de la contrata con arreglo a las mismas y el resultado de las mediciones correspondientes. Para que la introducción de nuevos precios así determinados, se considere modificación del proyecto, habrán de cumplirse conjuntamente las condiciones siguientes:

- Que la propiedad contratante haya aprobado además de los nuevos precios, la justificación y descomposición de la partida alzada.

- Que el importe total de dicha partida alzada, teniendo en cuenta su valoración, tanto los precios incluidos en los cuadros de precios como los nuevos precios de amplificación, no excedan del importe de la misma figurado en el proyecto.

- Las partidas alzadas de abono íntegro se abonarán al Contratista en su totalidad, una vez terminados los trabajos u obras a que se refieran, de acuerdo con las condiciones del contrato sin perjuicio de las que el

Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares pueda establecer respecto de su abono fraccionado en caso justificado.

2.1.14. Modificación del contrato.

- Modificación en la obra:

Cuando sea necesario introducir modificaciones en el proyecto de las obras que rigen el contrato, el Ingeniero Director redactará la oportuna propuesta, integrada por los documentos de justificación por la Propiedad, y requerirá la previa audiencia del Contratista. Una vez se produzca dicha aprobación, la Propiedad entregará al Contratista copias de los documentos del proyecto que hayan sido objeto de nueva redacción, motivada por la variación en el número de unidades nuevas.

- Variaciones en los plazos de ejecución:

En cuanto a la variación en mayor o menor medida de los plazos que se deriven de las obras aprobadas, el Contratista expondrá por escrito dirigido a la Propiedad la repercusión a considerar en la marcha de los trabajos y el retraso que pueda originarse en los plazos acordados.

- Modificaciones no autorizadas:

Ni el Contratista ni el Ingeniero Director podrán introducir o ejecutar modificaciones en la obra objeto del contrato, sin la debida aprobación de aquellas, ni del presupuesto correspondiente por parte de la Propiedad.

Exceptuándose aquellas modificaciones que, durante la correcta ejecución de la obra, se producen únicamente por variación en el número de unidades realmente ejecutadas sobre las previstas en las indicaciones del proyecto.

Las modificaciones en las obras que no estén debidamente autorizadas por la Propiedad originarán responsabilidad en el Contratista, sin perjuicio de las que pudieran alcanzar al Director de la obra.

2.1.15. Suspensión de las obras.

Siempre que la Propiedad acuerde una suspensión temporal, parcial o total de la obra, o una suspensión definitiva, se deberá levantar la correspondiente acta de suspensión, que deberá ir firmada por el Ingeniero Director y el Contratista, y en la que se hará constar el acuerdo de la Propiedad que originó la suspensión, definiéndose concretamente la parte, partes o totalidad de la obra afectada por aquella.

El acta debe acompañar, como anexo, y en relación con la parte o partes suspendidas, la medición tanto de la obra ejecutada en dicha o dichas partes, como en los materiales acopiados a pie de obra, utilizables exclusivamente en las mismas.

2.1.16. Resolución del contrato.

- Sanciones al contratista por causas imputables al mismo:

En caso de resolución del contrato, por causas imputables al Contratista, la fijación y valoración de los daños y perjuicios causados se verificará por el Ingeniero Director, y resolverá la Propiedad previa audiencia del Contratista.

- Errores de proyecto:

Los errores materiales que puede contener el proyecto o presupuesto elaborado por la Propiedad, no anularán el Contrato.

- Incumplimientos por parte del contratista:

El incumplimiento por parte del Contratista de cualquier cláusula contenida en el contrato, autoriza a la Propiedad a exigir su extracto cumplimiento, o bien acordar la resolución del mismo. Si ha habido fraude por parte del Contratista, se acordará siempre la resolución del contrato.

- Causas de resolución del contrato:

Son causas de resolución del contrato de obra:

- El incumplimiento de las cláusulas contenidas en el mismo.
- Las modificaciones del proyecto, aunque fueran necesarias, que impliquen, aislada o conjuntamente, alteraciones del precio del contrato en cuantía superior a más o menos del 20 % del importe de aquel.
- La suspensión definitiva de las obras acordadas por la Propiedad, así como la suspensión temporal de las mismas por un plazo superior a un año, también acordada por ella.
- La muerte del Contratista individual.
- La extinción de la sociedad jurídica de la sociedad contratista.
- La quiebra del Contratista.
- Aquella que se establezca expresamente en el contrato.

2.1.17. Conclusión del contrato.

- Recepción provisional de la obra:

  - Aviso de terminación de la obra:

  El Contratista o su delegado, con una antelación de cuarenta y cinco días hábiles, comunicará por escrito a la Dirección la fecha prevista para la terminación de la obra.

El Ingeniero Director, en caso de conformidad con la citada comunicación del Contratista, la llevará con su informe con una antelación de un mes respecto a la fecha de terminación de la obra, a la Propiedad, a los efectos de que éste presente en el acto de la recepción provisional o proceda al nombramiento de un representante autorizado.

- Acta de recepción provisional:

La Propiedad o el representante a que se refiere la cláusula anterior fijará la fecha de la recepción provisional y a dicho objeto, citará por escrito al Ingeniero Director y al Contratista o su representante.

De la recepción provisional se levantará por triplicado, ejemplar que firmará el representante de la Propiedad, el Ingeniero Director y el Contratista, o su representante autorizado, siempre que hayan asistido al acto de recepción, retirando un ejemplar de dicha acta cada uno de los firmantes. Si el Contratista o su delegado no han asistido a la recepción provisional, el representante de la Propiedad le remitirá con acuse de recibo un ejemplar del acta.

En el acta se hará constar el estado de terminación conforme al proyecto, así como todas las diferencias u omisiones que se observen, y se emplazará al Contratista para que subsane las diferencias, que por no ser substanciales, se fijará un plazo breve para corregirlas.

- Prórroga de finalización de la obra:

Si por causas de fuerza mayor e independientemente de la voluntad del Contratista y siempre que esta sea distinta de la rescisión, no le fuese posible terminar la obra en los plazos prefijados, la Propiedad puede otorgar una prórroga proporcionada para el cumplimiento de lo pactado, previo informe favorable del Ingeniero Director. Para ello, el Contratista expondrá

por escrito a la Propiedad, a través del Ingeniero Director la causa que le impide la ejecución o la marcha de los trabajos y el retraso que por ello originaría en los plazos acordados, razonando la prórroga que por dichas causas necesita.

- Conservación de la obra durante el plazo de garantía:

El Contratista responderá de los daños o deterioros que puedan producirse en la obra durante el plazo de garantía, a no ser que prueben que los mismos hayan sido ocasionados por el mal uso que ellas hubiesen hecho los usuarios o la entidad encargada de la explotación, y al cumplimiento de sus obligaciones, vigilancia y policía de la obra.

En dicho supuesto tendrán derecho a que se reembolse el importe de los trabajos que deban realizarse para establecer en la obra las condiciones debidas, pero no quedará exonerado de la obligación de llevar a cabo los citados trabajos.

- Medición general y liquidación provisional:

- Medición general:

El Ingeniero Director de la obra citará, con acuse de recibo, al Contratista o su delegado, y fijará la fecha en la que, en función del plazo establecido por la liquidación provisional de la obra ejecutada, ha de procederse a su medición general.

El Contratista, bien personalmente, o bien mediante delegación autorizada, tiene la obligación de asistir a la toma de datos y realización de la medición general que efectuará la Dirección Técnica. Si por causas que le sean imputables no cumple tal obligación, no podrá ejercitar reclamaciones en orden al resultado.

Para realizar la medición general se utilizarán como datos complementarios la comprobación del replanteo, los replanteos parciales y los datos de las mediciones efectuadas durante la ejecución de la obra, el Libro de Incidencias, y cuantos otros estimen necesarios el Ingeniero Director y el Contratista.

- Liquidación provisional:

El Ingeniero Director formulará en el plazo máximo de tres meses desde la fecha de recepción provisional, la liquidación provisional, aplicando al resultado de la medición general, los precios y condiciones económicas del contrato. Los reparos que estime oportunos hacer el Contratista, a la vista de la liquidación provisional, los dirigirá por escrito a la Administración en la forma establecida en el último párrafo de la cláusula anterior y dentro de un mes, pasado el cual se entenderá que se encuentra conforme con el resultado y detalles de la liquidación.

- Recepción y liquidación definitivas:

- Acta de recepción definitiva:

El Ingeniero Director comunicará a la Propiedad con una antelación mínima de un mes, la fecha de terminación del plazo de garantía, a los efectos de que aquella proceda de por sí o mediante la designación de un representante para la recepción definitiva a fija la fecha de celebración de la misma, con antelación mínima de diez días, citando por escrito al Ingeniero Director y al Contratista o su delegado.

La asistencia del Contratista a la recepción definitiva se regirá por idénticos principios, reglas y trámites que los expresados para la recepción provisional.

Si del examen de la obra resulta que no se encuentra en las condiciones debidas para ser recibida con carácter definitivo, se hará constar así en el acta, y se incluirán en ésta las oportunas instrucciones al Contratista para la debida reparación de lo construido, señalándose un nuevo y último plazo para el cumplimiento de sus obligaciones, transcurrido el cual, se volverá a examinar la obra con los mismos tramites y requisitos señalados a fin de proceder a su recepción definitiva.

2.2. Condiciones de índole económica.

2.2.1. Principio general:

En este capítulo se trata de normalizar las relaciones económicas entre la propiedad y la contrata, y marca el papel del Ingeniero Director de la obra en estos temas, estableciendo como principio que el contratista debe percibir el importe de todos los trabajos efectuados, siempre que estos se hayan realizado con arreglo y sujeción al Proyecto y Condiciones Generales y Particulares que rijan la construcción del edificio y obras anejas contratadas.

Todos los que intervienen en el proceso de construcción tienen derecho a percibir puntualmente las cantidades devengadas por su correcta actuación con arreglo a las condiciones contractualmente establecidas.

La Propiedad, el Contratista, y en su caso, los técnicos pueden exigirse recíprocamente las garantías adecuadas al cumplimiento puntual de sus obligaciones de pago.

2.2.2. Fianza ejecución de trabajos con cargo a la fianza y devolución de la misma.

- Fianza:

El Contratista presentará fianza con arreglo a alguno de los siguientes procedimientos, según se estipule:

- Depósito previo, en metálico o valores, o aval bancario, por importe entre el 3% y 10% del precio total de contrata.
- Mediante retención en las certificaciones parciales o pagos a cuenta en igual proporción.

- Fianza provisional:

En caso de que la obra se adjudique por subasta pública, el depósito provisional para tomar parte en ella se especificará en el anuncio de la misma y su cuantía será de ordinario, y salvo estipulación distinta en el pliego de condiciones vigente en la obra, de un tres por ciento como mínimo del total presupuestado de contrata.

El Contratista a quien se haya adjuntado la ejecución de una obra o servicio para la misma, deberá depositar en el punto y plazo fijados en el anuncio de la subasta, la fianza definitiva que se señale y, en su defecto, su importe será del 10% de la cantidad por la se haga la adjudicación de la obra, fianza que puede constituirse en cualquiera de las formas especificadas en el apartado anterior.

El plazo señalado en el apartado anterior, no excederá de 30 días a partir de la fecha en que se le comunique la adjudicación, y dentro de él deberá presentar el adjudicatario la carta de pago o recibo que acredite la constitución de la fianza a que se refiere el mismo párrafo.

La falta de cumplimiento de este requisito dará lugar a que se declare nula la adjudicación, y el adjudicatario perderá el deposito provisional que hubiese hecho para tomar parte en la subasta.

- Ejecución de trabajos con cargo a la fianza:

Si el Contratista se negase a hacer por su cuenta los trabajos precisos para ultimar la obra en las condiciones contratadas, Dirección Facultativa, en nombre y representación del propietario, los ordenará ejecutar a un tercero, o, podrá realizarlos directamente por administración, abonando su importe con la fianza depositada, sin perjuicio de las acciones a que tenga derecho el Propietario, en el caso de que el importe de la fianza no bastare para cubrir el importe de los gastos efectuados en las unidades de obra que no fuesen de recibo.

- De su devolución en general:

La fianza retenida será devuelta al Contratista en un plazo que no excederá de 30 días una vez firmada el Acta de Recepción Definitiva de la obra. La Propiedad podrá exigir que el Contratista le acredite la liquidación y finiquito de sus deudas causadas por la ejecución de la obra, tales como salarios, suministros, subcontratos, etc.

- Devolución de la fianza en el caso de efectuarse recepciones parciales:

Si la Propiedad, con la conformidad de la Dirección Facultativa, accediera a hacer recepciones parciales, tendrá derecho el Contratista a que se le devuelva la parte proporcional de la fianza.

2.2.3. Precios.

El Contratista de las obras presentará dentro de los veinte días siguientes a la firma del presente documento precios unitarios de materiales, mano de obra y precios descompuestos de todas las partidas en proyecto.

- Composición de los precios unitarios:

El cálculo de los precios de las distintas unidades de obra es el resultado de sumar los costes directos, los indirectos, los gastos generales y el beneficio industrial.

Se consideran costes directos:

- Mano de obra, con sus pluses y cargas y seguros sociales, que interviene directamente en la ejecución de las unidades de obra.
- Los materiales, a los precios resultantes a pie de obra, que queden integrados en la unidad de que se trate o que sean necesarios para su ejecución.
- Los equipos y sistemas técnicos de seguridad e higiene para la prevención y protección de accidentes y enfermedades profesionales.
- Los gastos de personal, combustible, energía, etc., que tengan lugar por el accionamiento o funcionamiento de la maquinaria e instalaciones utilizadas en la ejecución de la unidad de obra.
- Los gastos de amortización y conservación de la maquinaria, instalaciones, sistemas y equipos anteriormente citados.

Se consideran costes indirectos:

- Los gastos generales de empresa, gastos financieros, cargas fiscales y tasas de Administración, legalmente establecidas. Se cifrarán como un porcentaje de la suma de los costes directos e indirectos.
- Beneficio industrial: El Beneficio industrial del Contratista se establece en el 11 % sobre la suma de las anteriores partidas.
- Precio de ejecución material: Se denominará precio de ejecución material el resultado obtenido por la suma de los anteriores conceptos a excepción del beneficio industrial.
- Precio de contrata: El precio de contrata es la suma de los costes directos, los indirectos, los Gastos Generales y el beneficio Industrial.

- El IVA gira sobre esta suma pero no se integra en el precio.

- Precios de contrata e importe de contrata:

En el caso de que los trabajos a realizar en cualquier obra aneja se contratasen a riesgo y ventura, se entiende por precio de contrata el que importa el coste total de la unidad de obra, es decir, el precio de ejecución material, más el tanto por ciento sobre este último precio en concepto de beneficio industrial del Contratista. El beneficio se estima normalmente en 11%, salvo que en las condiciones particulares se establezca otro distinto.

- Precios contradictorios:

Se producirán precios contradictorios sólo cuando la Propiedad por medio de la Dirección facultativa decida introducir unidades o cambios de calidad en alguna de las previstas, o cuando sea necesario afrontar alguna circunstancia imprevista. El Contratista estará obligado a efectuar los cambios.

A falta de acuerdo, el precio se resolverá contradictoriamente entre la Dirección Facultativa y el Contratista antes de comenzar la ejecución de los trabajos y en el plazo que se determine al efecto. Si subsiste la diferencia se acudirá, en primer lugar, al concepto más análogo dentro del cuadro de precios del proyecto, y en segundo lugar al banco de precios de uso más frecuente en la localidad.

Los contradictorios que hubiere se referirán siempre a los precios unitarios de la fecha del contrato.

- Reclamaciones de aumento de precios por causas diversas:

Si el Contratista antes de la firma del contrato, no hubiese hecho la reclamación u observación oportuna, no podrá bajo ningún pretexto de error u omisión

reclamar aumento de los precios fijados en el cuadro correspondiente del presupuesto que sirva de base para la ejecución de las obras.

- Formas tradicionales de medir o aplicar los precios:

En ningún caso podrá alegar el Contratista los usos y costumbres del país respecto de la aplicación de los precios o de la forma de medir las unidades de obra ejecutadas, se extenderá a lo previsto en primer lugar a este pliego de condiciones.

- De la revisión de los precios contratados:

Contratándose las obras a riesgo y ventura, no se admitirá la revisión de los precios en tanto que el incremento no alcance, en la suma de las unidades que falten por realizar de acuerdo con el calendario, un montante superior al 3% del importe total del presupuesto del Contrato.

Caso de producirse variaciones en alza superiores a este porcentaje, se efectuará la correspondiente revisión de acuerdo con la fórmula establecida en el presente Pliego, percibiendo el Contratista la diferencia en más que resulte por la variación del IPC superior al 3%.

No habrá revisión de precios de las unidades que puedan quedar fuera de los plazos fijados en el calendario de la oferta.

- Acopio de materiales:

El Contratista queda obligado a ejecutar los acopios de materiales o aparatos de obra que la Propiedad ordene por escrito. Los materiales acopiados, una vez abonados por el propietario son de la exclusiva propiedad de éste; de su guarda y conservación será responsable el Contratista.

2.2.4. Obras por administración.

- Administración:

Se denominan “Obras por Administración” aquellas en las que las gestiones que se precisan para su realización las lleva directamente el propietario, bien por sí o por un representante suyo o bien por mediación de un Contratista. Las obras por administración se clasifican en las dos modalidades siguientes:

- Obras por Administración directa.
- Obras por Administración delegada o indirecta.

- Obras por Administración Directa:

Se denominan así las obras en las que el Propietario por sí o por mediación de un representante suyo, que puede ser la propia Dirección Facultativa, expresamente autorizado a estos efectos, lleve directamente las gestiones precisas para la ejecución de la obra, adquiriendo los materiales, contratando su transporte a obra y en suma, interviniendo directamente en todas las operaciones precisas para que el personal y los obreros contratados por él puedan realizarla; en estas obras el Contratista, si lo hubiese, o el encargado de su realización, es un mero dependiente del propietario, ya sea como empleado suyo o como autónomo contratado por él, que es quien reúne en sí, por tanto, la doble personalidad de Propietario y Contratista.

- Obras por administración delegada o indirecta:

Se entienden por tales obras, las que convienen un Propietario y el Contratista para que éste, por cuenta de aquel y como delegado suyo, realice las gestiones y los trabajos que se precisen y se convengan. Son por tanto, características peculiares de este tipo de obras las siguientes:

- Por parte del Propietario, la obligación de abonar directamente o por mediación del Contratista todos los gastos inherentes a la realización de los trabajos convenidos, reservándose el Propietario la facultad de poder ordenar, bien por sí o por medio de la Dirección facultativa, en su representación, el orden y la marcha de los trabajos, la elección de los materiales y aparatos que en los trabajos han de emplearse y, en suma, todos los elementos que crea precisos para regular la realización de los trabajos convenidos.

- Por parte del Contratista, la obligación de llevar la gestión práctica de los trabajos, aportando sus conocimientos constructivos, los medios auxiliares precisos y en suma, todo lo que, en armonía con su cometido, se requiera para la ejecución de los trabajos, percibiendo por ello el Propietario un tanto por ciento prefijado sobre el importe total de los gastos efectuados y abonados por el Contratista.

- Liquidación de obras por administración:

Para la liquidación de los trabajos que se ejecuten por administración delegada o indirecta, regirán las normas que a tales fines establezcan las condiciones particulares de índole económica vigentes en la obra; a falta de ellas, las cuentas de administración las presentará el Contratista al Propietario, en relación valorada a la que deberá acompañarse y agrupados en el orden que se expresan los documentos siguientes todos ellos conformados por el representante técnico de la Dirección Facultativa:

- Las facturas originales de los materiales adquiridos para los trabajos y el documento adecuado que justifique el depósito o el empleo de dichos materiales en la obra.
- Las nóminas de los jornales abonados, ajustadas a lo establecido en la legislación vigente, especificando el número de horas trabajadas en la obra por los operarios de cada oficio y su categoría, acompañando a

dichas nóminas una relación numérica de los encargados, capataces, jefes de equipo, oficiales y ayudantes de cada equipo, peones especializados y sueltos, listeros, guardas, etc., que hayan trabajado en la obra durante el tiempo a que correspondan las nóminas que se presentan.

- Las facturas originales de los transportes de materiales puestos en la obra o retirada de escombros.
- Los recibos de licencias, impuestos y demás cargas inherentes a la obra que haya pagado o en cuya gestión haya intervenido el Contratista, ya que su abono es siempre de cuenta del Propietario.

A la suma de todos los gastos inherentes a la propia obra en cuya gestión haya intervenido el Contratista se le aplicará, a falta de convenio especial, un 17%, entendiéndose que en este porcentaje están incluidos los medios auxiliares y los de seguridad preventivos de accidentes, los gastos generales que al Contratista originen los trabajos por administración que realiza y el beneficio industrial del mismo

- Abono al contratista de las cuentas de administración delegada:

Salvo pacto distinto, los abonos al Contratista de las cuentas de administración delegada los realizará el propietario mensualmente según los partes de trabajo realizados aprobados por el propietario o por sus representantes.

Independientemente, el representante técnico de la Dirección Facultativa redactará, con igual periodicidad, la medición de la obra realizada, valorándola con arreglo al presupuesto aprobado. Estas valoraciones no tendrán efectos para los abonos al Contratista salvo que se hubiese pactado lo contrario contractualmente.

- Normas para la adquisición de los materiales y aparatos:

No obstante las facultades que en estos trabajos por Administración delegada se reserve el propietario para la adquisición de los materiales y aparatos, si al Contratista se le autoriza para gestionarlos y adquirirlos, deberá presentar al propietario, o en su representación a la Dirección Facultativa, los precios y las muestras de los materiales y aparatos ofrecidos, necesitando su previa autorización antes de adquirirlos.

- Responsabilidad del contratista en el bajo rendimiento de los obreros:

Si de los partes mensuales de obra ejecutada que preceptivamente debe presentar el Contratista a la Dirección Facultativa, éste advirtiese que los rendimientos de la mano de obra, en todas o en alguna de las unidades de obra ejecutada, fuesen notoriamente inferiores a los rendimientos normales generalmente admitidos para unidades de obra iguales o similares, se lo notificará por escrito al Contratista, con el fin de que éste haga las gestiones precisas para aumentar la producción en la cuantía señalada por la Dirección Facultativa.

Si hecha esta notificación al Contratista, en los meses sucesivos, los rendimientos no llegasen a los normales, el Propietario queda facultado para resarcirse de la diferencia, rebajando su importe del 17% que por los conceptos antes expresados correspondería abonarle al Contratista en las liquidaciones quincenales que preceptivamente deben efectuársele. En caso de no llegar ambas partes a un acuerdo en cuanto a los rendimientos de la mano de obra, se someterá el caso a arbitraje.

- Responsabilidades del contratista:

En los trabajos de “Obras por administración delegada”, el Contratista sólo será responsable de los efectos constructivos que pudieran tener los trabajos o unidades por él ejecutadas y también de los accidentes y perjuicios que pudieran sobrevenir a los obreros o a terceras personas por no haber tomado

las medidas precisas que en las disposiciones legales vigentes se establecen. En cambio, y salvo lo expresado en artículos precedentes, no será responsable del mal resultado que pudiesen dar los materiales y aparatos elegidos con arreglo a las normas establecidas en dicho artículo.

En virtud de lo anteriormente consignado, el Contratista está obligado a reparar por su cuenta los trabajos defectuosos y a responder también de los accidentes o perjuicios expresados en el párrafo anterior.

2.2.5. De la valoración y abono de los trabajos.

- Formas varias de abono de las obras:

Según la modalidad elegida para la contratación de las obras, el abono de los trabajos se efectuará así:

1º. Tipo fijo o tanto alzado total. Se abonará la cifra previamente fijada como base de la adjudicación, disminuida en su caso en el importe de la baja efectuada por el adjudicatario.

2º. Tipo fijo o tanto alzado por unidad de obra, cuyo precio invariable se haya fijado de antemano, pudiendo variar solamente el número de unidades ejecutadas.

Previa medición y aplicando al total de las diversas unidades de obra ejecutadas, del precio invariable estipulado de antemano para cada una de ellas, se abonará al Contratista el importe de las comprendidas en los trabajos ejecutados y ultimados con arreglo y sujeción a los documentos que constituyen el Proyecto, los que servirán de base para la medición y valoración de las diversas unidades.

3º. Tanto variable por unidad de obra, según las condiciones en que se realice y los materiales diversos empleados en su ejecución de acuerdo con las órdenes de la Dirección Facultativa. Se abonará al Contratista en idénticas condiciones al caso anterior.

4º. Por listas de jornales y recibos de materiales autorizados en la forma que el presente pliego determina.

5º. Por horas de trabajo, ejecutado en las condiciones determinadas en el Contrato.

- Relaciones valoradas y certificaciones:

En cada una de las épocas o fechas que se fijen en el contrato o en los pliegos de condiciones que rijan en la obra, formará el Contratista una relación valorada de las obras ejecutadas durante los plazos previstos, según la medición que habrá practicado el aparejador.

Lo ejecutado por el Contratista en las condiciones preestablecidas, se valorará aplicando el resultado de la medición general, cúbica, superficial, lineal, ponderal o numeral correspondiente para cada unidad de obra, los precios señalados en el presupuesto para cada una de ellas, teniendo presente además lo establecido en el pliego de condiciones económicas respecto a mejoras o sustituciones de material y las obras accesorias y especiales, etc.

Al Contratista, que podrá presenciar las mediciones necesarias para extender dicha relación, se facilitarán por el aparejador los datos correspondientes de la relación valorada, acompañándolos de una nota de envío, al objeto de que, dentro del plazo de 10 días, a partir de la fecha del recibo de dicha nota, pueda el Contratista examinarlos y devolverlos firmados con su conformidad o hacer, en caso contrario, las observaciones o reclamaciones que considere oportunas. Dentro de los 10 días siguientes a su recibo, la Dirección Facultativa aceptará o rechazará las reclamaciones del Contratista si las hubiere, dando cuenta al mismo de su resolución, pudiendo éste, en el segundo caso, acudir ante el Propietario contra la resolución de la Dirección Facultativa en la forma prevenida en los Pliegos Generales de Condiciones Facultativas y Legales.

Tomando como base la relación valorada indicada en el párrafo anterior, expedirá la Dirección Facultativa la certificación de las obras ejecutadas. De su importe se deducirá el tanto por ciento que para la constitución de la fianza se haya preestablecido.

El material acopiado a pie de obra por indicación expresa y por escrito del Propietario, podrá certificarse hasta el 90% de su importe, a los precios que figuren en los documentos del proyecto, sin afectarlos del tanto por ciento de contrata.

Las certificaciones se remitirán al Propietario, dentro del mes siguiente al periodo a que se refieren, y tendrán el carácter de documento y entregas a buena cuenta, sujetas a las rectificaciones y variaciones que se deriven de la liquidación final, no suponiendo tampoco dichas certificaciones aprobación ni recepción de las obras que comprenden.

Las relaciones valoradas contendrán solamente la obra ejecutada en el plazo a que la valoración se refiere. En el caso de que el Arquitecto-Director lo exigiera, las certificaciones se extenderán al origen.

- Mejoras de obras libremente ejecutadas:

Cuando el Contratista, incluso con la autorización de la Dirección Facultativa, emplease materiales de más esmerada preparación o de mayor tamaño que el señalado en el Proyecto o sustituyese una clase de fábrica con otra que tuviese asignado mayor precio, o ejecutase con mayores dimensiones cualquier parte de la obra, o en general, introdujese en ésta y sin pedírsela, cualquier otra modificación que sea beneficiosa a juicio de la Dirección Facultativa, no tendrá derecho, sin embargo, más que al abono de lo que pudiera corresponderle en el caso de que hubiese construido la obra con estricta sujeción a la proyectada y contratada o adjudicada.

- Abono de los trabajos presupuestados con partida alzada:

Salvo lo preceptuado en los apartados de índole económica del pliego, vigente en la obra, el abono de los trabajos presupuestados en partida alzada, se efectuará de acuerdo con el procedimiento que corresponda entre los que a continuación se expresan:

- Si existen precios contratados para unidades de obra iguales, las presupuestadas mediante partida alzada, se abonarán previa medición y aplicación del precio establecido.

- Si existen precios contratados para unidades de obra similares, se establecerán precios contradictorios para las unidades con partida alzada, deducidos de los similares contratados.

- Si no existen precios contratados para unidades de obra iguales o similares, la partida alzada se abonará íntegramente al Contratista, salvo en el caso de que en el presupuesto de la obra se exprese que el importe de dicha partida debe justificarse, en cuyo caso, la Dirección Facultativa indicará al Contratista y con anterioridad a su ejecución, el procedimiento que de seguirse para llevar dicha cuenta, que en realidad será de Administración, valorándose los materiales y jornales a los precios que figuren en el presupuesto aprobado, ó, en su defecto, a los que con anterioridad a su ejecución convengan las dos partes, incrementándose su importe total con el porcentaje que se fije en el presente pliego en concepto de gastos generales y beneficio industrial del Contratista.

- Abono de agotamientos y otros trabajos especiales no contratados:

Cuando fuese preciso efectuar agotamientos, inyecciones u otra clase de trabajos de cualquier índole especial u ordinaria, que por no estar contratados

no sean de cuenta del Contratista, y no se contratasen con tercera persona, tendrá el Contratista la obligación de contratarlos y de satisfacer los gastos de toda clase que ocasionasen, los cuales le serán abonados por el propietario por separado de la contrata.

Además de reintegrar mensualmente estos gastos al Contratista, se le abonará juntamente con ellos el tanto por ciento del importe total, que, en su caso, se especifique en este pliego.

- Pagos:

Los pagos se efectuarán por el propietario en los plazos previamente establecidos, y su importe corresponderá precisamente al de las certificaciones de obra conformadas por la Dirección Facultativa, en virtud de las cuales se verifican aquellos.

- Abono de trabajos ejecutados durante el plazo de garantía:

Efectuada la recepción provisional y si durante el plazo de garantía se hubieran ejecutado trabajos cualesquiera, para su abono se procederá así:

1º. Si los trabajos que se realicen estuviesen especificados en el proyecto, y sin causa justificada no se hubieran realizado por el Contratista a su debido tiempo, y la Dirección Facultativa exigiera su realización durante el plazo de garantía, serán valorados a los precios que figuren en el presupuesto y abonados de acuerdo con lo establecido en los pliegos correspondientes, en el caso de que dichos precios fuesen inferiores a los que rijan en la época de su realización; en caso contrario, se aplicarán estos últimos.
2º. Si se han ejecutado trabajos precisos para la reparación de desperfectos ocasionados por el uso del edificio, por haber sido éste utilizado durante

dicho plazo por el propietario, se valorarán y abonarán a los precios del día, previamente acordados.

3º. Si se han ejecutados trabajos para la reparación de desperfectos ocasionados por deficiencia de la construcción o de la calidad de los materiales, nada se abonará por ellos al Contratista.

2.2.6. Las indemnizaciones mutuas.

- Importe de la indemnización por retraso no justificado en el plazo de terminación de las obras:

La indemnización por retraso en la terminación se establecerá en un tanto por mil del importe total de los trabajos contratados, por cada día natural de retrasos, contados a partir del día de terminación fijado en el calendario de obra. Las sumas resultantes se descontarán y retendrán con cargo a la fianza.

- Demora de los pagos:

Si el propietario no efectuase el pago de las obras efectuadas, dentro del mes siguiente al que corresponde el plazo convenido, el Contratista tendrá además el derecho de percibir un abono de un cuatro y medio por ciento anual, en concepto de interés de demora, durante el espacio de tiempo del retraso y sobre el importe de la mencionada certificación.

Si aún transcurrieran dos meses a partir del término de dicho plazo de un mes sin realizarse dicho pago, tendrá derecho el Contratista a la resolución del contrato, procediéndose a la liquidación correspondiente de las obra ejecutadas y de los materiales acopiados, siempre que éstos reúnan las condiciones preestablecidas y su cantidad no exceda de la necesaria para la terminación de la obra contratada o adjudicada.

No obstante lo anterior expuesto, se rechazará toda solicitud de resolución del contrato fundada en dicha demora de pagos, cuando el Contratista no justifique que en la fecha de dicha solicitud ha intervenido en obra o en materiales acopiados admisibles la parte de presupuestos correspondiente al plazo de ejecución que tenga señalado en el contrato.

2.2.7. Varios.

- Mejoras y aumentos de obra. Casos contrarios:

No se admitirán mejoras de obra, más que en el caso de que la Dirección Facultativa haya ordenado por escrito la ejecución de trabajos nuevos o que mejoren la calidad de los contratados, así como la de los materiales y aparatos previstos en el contrato. Tampoco se admitirán aumentos de obra en las unidades contratadas, salvo caso de error en las mediciones del proyecto, a menos que la Dirección Facultativa ordene, también por escrito, la ampliación de las contratadas.

En todos estos casos será condición indispensable que ambas partes contratantes, antes de su ejecución o empleo, convengan por escrito los importes totales de las unidades mejoradas, los precios de los nuevos materiales y los aumentos que todas estas mejoras supongan sobre el importe de las unidades contratadas.

Se seguirá el mismo criterio y procedimiento, cuando la Dirección Facultativa introduzca innovaciones que supongan una reducción apreciable en los importes de las unidades de obra contratadas.

- Unidades de obras defectuosas pero aceptables:

Cuando por cualquier causa fuera menester valorar obras defectuosas, pero aceptables a juicio de la Dirección Facultativa, esta determinará el precio o

partida de abono después de oír al Contratista, el cual deberá conformarse con dicha resolución, salvo en el caso de que, estando dentro del plazo de ejecución, prefiera demoler la obra y rehacerla con arreglo a condiciones, sin exceder de dicho plazo.

- Seguro de las obras:

El Contratista estará obligado a asegurar la obra contratada durante todo el tiempo que dure su ejecución hasta la recepción definitiva; la cuantía del seguro coincidirá en cada momento con el valor que tengan por contrata los objetos asegurados. El importe abonado por la entidad aseguradora, en el caso de siniestro, se ingresará en cuenta a nombre del propietario, para que con cargo a ella se abone la obra que se construya, y a medida que ésta se vaya realizando. El reintegro de dicha cantidad al contratista se efectuará por certificaciones, como el resto de los trabajos de la construcción.

En ningún caso salvo conformidad expresa del Contratista, hecho en documento público, el propietario podrá disponer de dicho importe para menesteres distintos del de reconstrucción de la parte siniestrada; la infracción de lo anteriormente expuesto será motivo suficiente para que el Contratista pueda resolver el Contrato, con devolución de fianza, abono completo de gastos, materiales acopiados, etc., y una indemnización equivalente al importe de los daños causados al Contratista por el siniestro y que no se le hubiesen abonado, pero sólo en proporción equivalente a lo que suponga la indemnización abonada por la compañía aseguradora, respecto al importe de los daños causados por el siniestro que serán tasados a estos efectos por la Dirección Facultativa.

En las obras de reforma o reparación, se fijarán previamente la porción de edificio que debe ser asegurada y su cuantía, y si nada se prevé, se entenderá que el seguro ha de comprender toda la parte del edificio afectada por la obra.

Los riesgos asegurados y las condiciones que figuren en la póliza o pólizas de seguros, los pondrá el Contratista, antes de contratarlos, en conocimiento del propietario, al objeto de recabar de este su previa conformidad o reparos.

- Conservación de la obra:

Si el Contratista, siendo su obligación, no atiende a la conservación de la obra durante el plazo de garantía, en el caso de que la edificación no haya sido ocupada por el propietario antes de la recepción definitiva, el Arquitecto-Director, en representación del propietario, podrá disponer todo lo que sea preciso para que se atienda a la guardería, limpieza y todo lo que fuese menester para su buena conservación, abonándose todo ello por cuenta de la Contrata.

Al abandonar el Contratista la obra, tanto por buena terminación de las mismas, como en el caso de resolución del contrato esta obligado a dejarlo desocupado y limpio en el plazo que la Dirección Facultativa fije.

Después que la recepción provisional corra a cargo del Contratista, no deberá haber en él más herramientas, útiles, materiales, muebles, etc., Que los imprescindibles para su guardería y limpieza y para los trabajos que fuese preciso ejecutar. En todo caso, ocupada o no la obra, está obligado el Contratista a revisar y repara la obra, durante el plazo expresado, procediendo en la forma prevista en el presente pliego de condiciones económicas.

- Uso por el contratista de bienes pertenecientes al propietario:

Cuando durante la ejecución de las obras ocupe el Contratista, con la necesaria y previa autorización del propietario, edificios o haga uso de materiales o útiles pertenecientes al mismo, tendrá obligación de repararlos y conservarlos para hacer entrega de ellos a la terminación del contrato, en perfecto estado de conservación, reponiendo los que se hubiesen inutilizado,

sin derecho a indemnización por esta reposición ni por las mejoras hechas en los edificios o propiedades que haya utilizado.

En el caso de que al terminar el contrato y hacer entrega del material, propiedades o edificaciones, no hubiese cumplido el Contratista con lo previsto en el párrafo anterior, lo realizará el propietario a costa de aquel y con cargo a la fianza.

2.2.8. Obras no previstas.

Cuando hayan de ejecutarse obras o unidades no previstas cuya necesidad se presente durante la ejecución de las obras que sean objeto de la creación de precios nuevos contradictorios, quedan obligados antes de comenzar la ejecución de estas unidades no previstas a advertir a la Dirección Facultativa y a la Propiedad la operación, así como de su repercusión económica sobre la totalidad de las obras, no pudiendo realizarlas sin el consentimiento de ambas.

Estos precios serán redactados por la Contrata y aprobados por la Dirección Facultativa y la Propiedad siendo afectada del alza objeto de concurso (si es que hubiera), que esté aprobado para el resto de la obra.

Si estas unidades de obra las ejecutara el Contratista antes de formalizarse el correspondiente precio, quedará éste sujeto al determinado por la Dirección Técnica.

2.2.9. Liquidaciones.

Las obras se liquidarán mediante certificaciones o relaciones valoradas, aprobadas por el Director de Obras. Estas certificaciones tendrán carácter de abono a buena cuenta. Una vez redactadas las certificaciones se remitirán a la empresa adjudicataria.

2.2.10. Garantía.

De las certificaciones se retendrá un 5% de su importe por parte de la Propiedad, en concepto de garantía, y será devuelta una vez firmada el Acta de Recepción Definitiva, incluyéndola en la valoración final de las obras.

2.2.11. Acta de Recepción Provisional y Certificación de Liquidación Provisional.

Terminadas las obras, se procederá a levantar la correspondiente Acta de Recepción Provisional, en la que se recoja en su caso las correcciones que hayan de efectuarse por parte de la Contrata, así mismo, se efectuará en el plazo máximo de dos meses a partir del Acta de Recepción Provisional de las obras, la Certificación de Liquidación Provisional.

2.2.12. Acta de Recepción Definitiva y Liquidación Final.

Pasados cuatro meses de la firma del Acta de Recepción Provisional, se procederá a la firma del Acta de Recepción Definitiva, siempre que en dicho plazo se hayan efectuado las correcciones previstas en el apartado anterior. Una vez firmada el Acta, se procederá a la redacción de la valoración de la Liquidación final de las obras.

2.2.13. Honorarios.

Las certificaciones mensuales de las obras, además de los incrementos previstos por el Presente Pliego de Condiciones, se incrementarán con el importe correspondiente a honorarios por Dirección de Obras.

2.2.14. Coste de adquisición de materiales.

En las certificaciones se podrán incluir, previa autorización del Director de las Obras, además de las obras ejecutadas, el 65% del coste de adquisición de materiales apropiados para las obras, de los cuales no podrá disponer el Instalador para otros fines y será responsable de su custodia y conservación mientras no se empleen en las obras y sigan figurando en las relaciones valoradas.

En ningún caso podrá certificarse como materiales acopiados, como máximo los materiales necesarios para un mes, a no ser que previamente la Propiedad y el Director de las Obras lo autoricen.

2.2.15. Revisión de precios.

En lo que respecta a revisiones de precios, se conviene que los mismos se ajustarán a lo establecido por el Decreto-Ley 2/1964 del 4 de Febrero de 1964 (B.O.E. 24-3-71), basándose para su aplicación en las fórmulas polinómicas fijadas por el Decreto 3650/1970 del 19 de Diciembre de 1970 (B.O.E. 24-12-1970; fórmulas 1 a 39), y el Real Decreto 2167/1981 (B.O.E. 24-9-1981; fórmulas 40 a 48).

Cada una de estas fórmulas son válidas para un tipo de obra bien determinado y especificado. Las revisiones de las obras se realizarán según la fórmula polinómica nº 470 establecida según el citado Decreto 3650/1981.

En caso de producirse revisiones de precios con el sistema establecido, sus importes sólo se incluirán en la valoración y liquidación provisional de las obras.

2.2.16. Unidades de obra.

Para cualquier interpretación en cuanto a unidades de obra se aplicará el criterio de precios descompuestos.

2.2.17. Pruebas y análisis.

Con la frecuencia que se estime oportuna, la Dirección Técnica ordenará pruebas y análisis de materiales, mezclas, dosificaciones, etc., cuyos gastos serán a cuenta de la empresa adjudicataria, la cual estará obligada a dar toda clase de facilidades, para la más rápida y mejor realización de las mismas.

2.2.18. Proveedores, marcas y firmas especializadas.

Para la contratación de determinadas partidas (albañilería, instalaciones especiales, etc.) la Propiedad facilitará al instalador las firmas especializadas a las que se desee se les pidan precios, para que en igual o mejores condiciones técnico-económicas respecto a una libre elección, pueden ser designados por él como proveedores de los efectos e instalaciones necesarias.

2.2.19. Estimación de precios a priori.

Si la complicación de las obras impidiera la estimación de un precio a priori, las obras se realizarán por el sistema de Administración, pero previamente la Contrata remitirá la relación de precios de materiales y costes de mano de obra para su aprobación.

De no cumplirse los anteriores requisitos, la Dirección Facultativa de las obras fijará el precio que considere razonable. Hay que dejar constancia que las condiciones que se exigen en este Pliego son las mismas aceptables.

2.3. Pliego de condiciones de índole legal.

2.3.1. Modificaciones de obra.

La obra podrá ser cambiada, disminuida, aumentada o suspendida total o parcialmente por el adjudicador. En el caso en el que el adjudicatario se vea

perjudicado en sus intereses, solicitará la indemnización a que se considere acreedor, y cuya estimación someterán las partes al laudo de la comisión arbitral. En los casos de suspensión no correrá plazo.

2.3.2. Derecho de rescisión.

El constructor podrá rescindir el contrato en los siguientes casos:

- Cuando las variaciones introducidas en la obra aumenten o disminuyan el importe total de ésta en más de un 20%.
- Cuando por razones ajenas al constructor se pase más de un año sin poder trabajar en la obra, en una escala equivalente a la mitad de la prevista, con arreglo al plazo establecido.
- Cuando se retrase más de seis meses el pago de alguna relación valorada.
- En caso de rescisión sin cumplimiento de contrato por parte del constructor, éste tendrá derecho al cobro de los gastos no resarcibles efectuados hasta la fecha de la notificación y valorados contradictoriamente, más de un 3% de la obra que reste por ejecutar.

2.3.3. Rescisión por incumplimiento del contrato.

En el caso de retraso injustificado sobre los plazos fijados se impondrá al constructor una multa del 1,5% del presupuesto por cada 1% de retraso respecto al plazo.

Los retrasos superiores al 25% así como los incumplimientos de contrato, serán motivo suficiente para su rescisión con pérdida de la fianza, aparte de las responsabilidades que quepan al constructor con arreglo al Código Civil.

2.3.4. Liquidación en caso de rescisión.

En caso de rescisión se hará una liquidación única que será la definitiva con arreglo a lo estipulado en este pliego. El constructor además es responsable de todos sus bienes con arreglo al código.

2.3.5. Traspaso de contrato.

Será facultativo del adjudicador autorizar la petición del constructor de traspasar el contrato a otro constructor siempre que éste cumpla las condiciones señaladas en el apartado correspondiente.

2.3.6. Muerte o quiebra del contratista.

En caso de muerte o quiebra del constructor podrán sus herederos traspasar a otro Contratista previa aprobación del adjudicador.

2.3.7. Cuestiones no previstas o reclamaciones.

Todas las cuestiones que pudieran surgir sobre interpretación, perfeccionamiento y cumplimiento de las condiciones del contrato entre el adjudicador y el constructor serán resueltas por la comisión arbitral.

La comisión arbitral deberá dictar resolución después de oídas las partes dentro de los quince días siguientes al planteamiento del asunto ante la misma. Durante este plazo el constructor deberá acatar las órdenes del Director de Obra sin perjuicio de reclamar las indemnizaciones correspondientes si la resolución le fuese favorable.

Entre las resoluciones dictadas por la comisión arbitral figurará en todo caso la proposición de que cada una de las partes deberá participar en el abono de los honorarios de las personas que forman la comisión y de los peritos cuyo informe haya sido solicitado por ella.

2.3.8. Fábricas y trabajos no previstos en este pliego.

En la ejecución de las obras, fábricas y trabajos que entren en la construcción de las obras para las cuales no existan prescripciones en este Pliego, el Contratista se atendrá en primer lugar a lo que resulte de la inspección de los planos, cuadros de precios y presupuestos; en segundo lugar a las reglas que dicte la dirección de la obra y en tercero a las buenas prácticas seguidas en fábricas y trabajos análogos por los mejores constructores.

Todos los planos e instrucciones estarán de acuerdo con los documentos del contrato, estas obras se considerarán adicionales a los mismos y tendrán la misma fuerza ejecutiva que aquellos. El Contratista no efectuará ningún cambio en el trabajo, salvo cuando le sea requerido por escrito por la Dirección de la obra o cuando resulte de las revisiones de planos o la emisión de nuevos planos que le sean oficialmente entregados.

El Contratista se compromete a realizar cuantas obras suplementarias o cambios, tanto en aumento o disminución, en el trabajo, que le sean solicitados por la Dirección y ejecutará este trabajo extra autorizado en los términos y bajo las condiciones del contrato, siempre que el aumento quede comprendido dentro del objeto y alcance del trabajo, indicado en las condiciones del contrato.

Las obras no previstas o sin autorización de cambio serán a cargo del contratista, a menos que la Dirección de la obra decida lo contrario.

Se entregará una copia del documento de "Autorización de cambio" al Contratista, quien la adjuntará a la certificación mensual.

El Contratista no emprenderá ningún trabajo adicional que no esté comprendido dentro del objeto o alcance del trabajo, salvo que, antes de

comenzar este trabajo adicional, se le haya cursado una cláusula adicional al contrato, autorizando explícitamente dicho trabajo.

Los materiales suplementarios suministrados por el contratista, no relacionados en los planos o especificaciones que forman parte del contrato original, se abonarán a precio de coste incrementado en un 10%. Este precio incluye todos los gastos generales, incluyendo el transporte a la obra. No se adquirirá ningún material suplementario sin la autorización previa por escrito de la Dirección de la obra. El importe de las obras suplementarias o de la autorización de cambio, se determinará por el procedimiento que determine la Dirección de la obra.

DOCUMENTO IV:

ANÁLISIS ECONÓMICO

INDICE

4.1. Introducción……..pág. 1

4.2. Datos de la unidad pirolítica proyectada…….pág. 3

4.3. Caso 1…….pág. 4

4.4. Caso 2…….pág. 8

4.5. Caso 3…….pág. 13

4.6. Comparativa estimaciones de costes del proyecto……pág. 17

4.1. Introducción:

Los cálculos económicos que se van a emplear están basados en el protocolo estándar de análisis del NREL (Laboratorio Nacional de Energía Renovable), perteneciente al Departamento de Energía de los EEUU. De esta forma, la unidad pirolítica se va a dividir en subunidades o partidas de proceso, y se van a calcular los costes como la suma del "Coste de Inversión del proyecto" más los "Costes de Operación":

a) Costes de Inversión: es el coste de la adquisición e instalación de equipos más los gastos indirectos y otros gastos como la puesta en marcha de la planta. El Grupo Harris (empresa consultora) ha llevado a cabo diversos proyectos durante años, y el año pasado revisó los elementos y factores a considerar, recalculando algunos porcentajes:

Item	Description	Amount
	Additional direct costs	
Warehouse	On-site storage of equipment and supplies.	4.0% of the installed cost of ISBL equipment
Site development	Includes fencing, curbing, parking lot, roads, well drainage, rail system, soil borings, and general paving. This factor allows for minimum site development assuming a clear site with no unusual problems such as right-of-way, difficult land clearing, or unusual environmental problems.	9% of ISBL
Additional piping	To connect ISBL equipment to storage and utilities outside the battery limits.	4.5% of ISBL
	Indirect costs	
Prorateable costs	This includes fringe benefits, burdens, and insurance of the construction contractor.	10% of total direct cost (TDC)
Field expenses	Consumables, small tool and equipment rental, field services, temporary construction facilities, and field construction supervision.	10% of TDC
Home office and construction	Engineering plus incidentals, purchasing, and construction.	20% of TDC
Project contingency	Extra cash on hand for unforeseen issues during construction.	10% of TDC
Other costs	Start-up and commissioning costs. Land, rights-of-way, permits, surveys, and fees. Piling, soil compaction/dewatering, unusual foundations. Sales, use, and other taxes. Freight, insurance in transit, and import duties on equipment, piping, steel, instrumentation, etc. Overtime pay during construction. Field insurance. Project team. Transportation equipment, bulk shipping containers, plant vehicles, etc.	10% of TDC

Tabla 56 – Factores empleados en el cálculo de los Costes de Inversión. Grupo Harris.

Donde el ISBL (Inside-Battery-Limits) hace referencia al coste de equipos dentro de los límites de batería (frontera del sistema o proceso). Al calcular los costes de la unidad pirolítica en concreto, todos los equipos están dentro de la batería, luego el ISBL es igual al Coste de Equipos. Para calcular dichos Costes de Equipos instalados, se va a considerar como base de datos diferentes casos de análisis económicos previos de otras plantas de pirólisis, y se usará una ecuación que emplea índices de costo en estimación para escalar los valores de equipos para una capacidad distinta (Blank y Tarquin, Ingeniería Económica 4ª Ed.), y con índices anuales de costes de plantas en Ingeniería Química (CEPCI) para escalar la variación temporal. La ecuación queda de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} Coste\ equipo\ de \\ capacidad\ "X" \\ en\ el\ año\ "Y" \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Coste\ equipo \\ en\ año\ "Z" \end{pmatrix} \cdot \left(\frac{CEPCI\ año\ "Y"}{CEPCI\ año\ "Z"} \right) \cdot \left(\frac{Capacidad\ equipo\ año\ "Y"}{Capacidad\ equipo\ año\ "Z"} \right)^{n}$$

Donde “n” es un exponente según el equipo y su capacidad o tamaño, aunque si es desconocido suele emplearse como promedio 0,6 - 0,7:

Equipment	Size Range	Units	Exponent**
Reactor – fixed beds	N/A		0.65-0.70
Column (including internals)	300-30,000	Feed rate, million lb/yr	0.62
Cyclone	20-8,000	Cubic feet/m	0.64
Vessel – vertical	100-20,000	US gallons	0.30
Vessel – horizontal	100-80,000	US gallons	0.62
Heat exchanger (S&T)	20-20,000	Square feet	0.59
Venturi scrubber	N/A		0.60
Compressor – centrifugal*	200-30,000	hp	0.62
Blower*	0.5 - 150	Thousand standard cubic feet per minute	0.60
Pump*	0.5-40 40-400	hp	0.30 0.67
Turbine Pressure discharge Vacuum discharge	 20-5,000 200-8,000	hp	0.81
Motor	10-25	hp	0.56

Tabla 57 – Ejemplos de exponentes típicos para la estimación de equipos según su capacidad.

Y donde los valores de los índices CEPCI a emplear son:

CHEMICAL ENGINEERING PLANT COST INDEX (CEPCI)

(1957-59 = 100)	Jan.'11 Prelim.	Dec.'10 Final	Jan.'10 Final	Annual Index:
***CE* Index**	564.8	560.3	532.9	2003 = 402.0
Equipment	681.7	674.6	631.8	2004 = 444.2
Heat exchangers & tanks	635.8	627.1	571.9	2005 = 468.2
Process machinery	642.5	627.6	601.9	2006 = 499.6
Pipe, valves & fittings	859.2	854.3	794.5	2007 = 525.4
Process instruments	431.0	426.2	419.8	2008 = 575.4
Pumps & compressors	876.5	903.6	903.0	2009 = 521.9
Electrical equipment	495.2	488.4	469.2	2010 = 550.8
Structural supports & misc	707.4	696.3	640.2	
Construction labor	326.7	328.1	331.0	
Buildings	505.6	503.3	494.8	
Engineering & supervision	334.8	335.6	342.4	

Tabla 58 – Índices de coste de plantas en Ingeniería Química. *www.che.com/pci*

b) Los Costes de Operación: gastos anuales de la planta, a su vez, van a ser "fijos" si es un gasto independiente de que la planta produzca o no, y "variables" si dependen del funcionamiento de ésta.

a. Variables: costes adquisición de materia prima.

b. Fijos: mano de obra, mantenimiento, gastos generales, impuestos y seguro. Son calculados de la siguiente forma (Aden et al. 2002):

- Mano de obra: oficina de Estadísticas Laborales para trabajadores del sector químico.
- Gastos generales (seguridad, ingeniería, gastos electricidad, etc): 90% del coste de empleados.
- Mantenimiento – 3% del ISBL.
- Seguros e impuestos: 0,7% de la Inversión del Capital Fijo.

4.2. Datos de la unidad pirolítica proyectada:

- Capacidad de tratamiento: 15.000 t. PEAD/año.
- Disponibilidad de la planta: 8.232 horas/año.
- Caudal másico de entrada a la unidad: 1,82 t. PEAD/hora.
- Coste adquisición materia prima: 140 €/t. residuo PEAD (Ecoembes).

- Caudal de salida del gas de pirólisis: 7,59 t. gas/hora.
- Formación de vapor en el intercambiador: 0,93 t./hora.
- Subunidades o partidas de la unidad pirolítica:
    - Pretratamiento (triturado, lavado y secado).
    - Reactor de pirólisis.
    - Separación de partículas del gas (ciclón).
    - Recuperación de calor mediante intercambiador de carcasa y tubos.

4.3. Caso 1:

"Large-scale pyrolysis oil production: a technology assessment and economic analysis". M. Ringer, V. Putsche, and J. Scahill. 2006.

a) Datos:

- Materia prima: astillas de madera.
- Pretratamiento: triturado y secado.
- Reactor: lecho fluidizado, a 500º C.
- Caudal másico de entrada en pretratamiento: 41,5 t. biomasa/hora al 50% en humedad.
- Caudal másico de entrada en reactor: 22,3 t. biomasa/hora al 7% en humedad.
- Caudal de entrada al intercambiador: 76,2 t. gas de pirólisis/hora.
- Unidades:

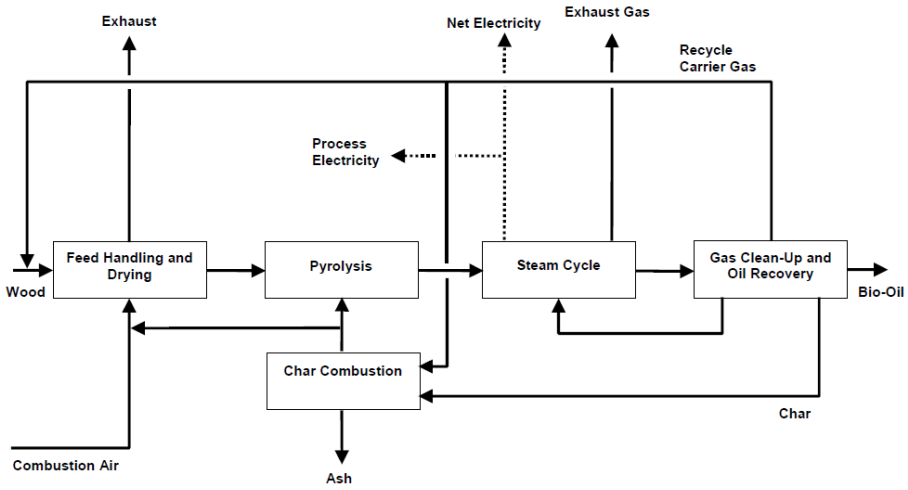


Figura 77 – Unidades de proceso caso 1.

- Costes de equipo instalado: (precios 2003).

Plant Area	Installed Equipment Cost ($ Million)
A1000- Feedstock Handling and Drying	$5.57
A2000 – Pyrolysis	$3.92
A3000 – Quench	$1.94
A4000 – Heat Recovery	$1.14
A5000 – Product Recovery and Storage	$0.80
A6000 – Recycle	$1.38
A7000 – Steam and Power Production	$3.16
A9000 – Utilities	$3.13
Equipment Contingency – 35%	$7.37
Total Installed Equipment Cost	$28.41

b) Estimación de costes del proyecto en base a caso 1:

b.1. Estimación Coste de Equipos: hay tres unidades del proyecto de los que no se tienen datos: pretratamiento, reactor y ciclón. En los costes de equipo del caso 1, el coste del ciclón viene incluido en el área A2000 de pirólisis, así que considerarán ambos costes como uno solo.

Unidad de proceso	Coste Equipos Instalados caso 1 (2003)	Coste Equipos Instalados Proyecto
Pretratamiento	5.570.000 $	1.236.384 €
Pirólisis + ciclón	3.920.000 $	870.115 €
Recuperador de calor	1.140.000 $	121.043 €
Coste Equipos Instalados	10.630.000 $	**2.227.542 €**

Para obtener los datos del proyecto se emplea la ecuación descrita antes de estimación de costos:

$$\left(\begin{matrix}Coste\ \mathrm{Pr}etratamiento\\ \mathrm{Pr}oyecto\end{matrix}\right)=5.570.000\$\cdot\left(\frac{550,8}{402}\right)\cdot\left(\frac{1,82t.\ PEAD/h}{22,3\ t.\ biomasa/h}\right)^{0,6}=$$

$$=1.697.004\ \$=1.236.384\ €$$

$$\left(\begin{matrix}Coste\ \mathrm{Re}actor+ciclón\\ \mathrm{Pr}oyecto\end{matrix}\right)=3.920.000\$\cdot\left(\frac{550,8}{402}\right)\cdot\left(\frac{1,82t.\ PEAD/h}{22,3\ t.\ biomasa/h}\right)^{0,6}=$$

$$=1.194.301\ \$=870.115\ €$$

$$\left(\begin{matrix}Coste\ Intercambiador\\ \mathrm{Pr}oyecto\end{matrix}\right)=1.140.000\$\cdot\left(\frac{550,8}{402}\right)\cdot\left(\frac{1,82t.\ gas\ pirólisis/h}{76,2\ t.\ gas\ pirólisis/h}\right)^{0,6}=$$

$$=166.166\ \$=121.043\ €$$

b.2. Estimación Coste Total de Inversión del proyecto:

Tipo de Coste	Cantidad
Coste Equipos Instalados	**2.227.542 €**
Almacén	89.102 €
Desarrollo en el lugar	200.479 €
Sistema tuberías adicional	100.239 €
Costes Directos Totales	**2.617.362 €**
Gastos prorateables	261.736 €
Gastos de campo	261.736 €

Oficinas y cuotas de construcción	523.472 €
Contingencias del proyecto	261.736 €
Otros costes (puesta en marcha)	261.736 €
Costes Indirectos Totales	**1.570.416 €**

Inversión de capital fijo	**4.187.778 €**
Suelo	18.845 €
Capital de explotación	209.389 €
Coste Total de Inversión del proyecto	**4.416.012 €**

b.3. Estimación Costes de Operación:

- Variables: costes adquisición de materia prima.

$$\begin{pmatrix} Capacidad\ tratamiento \\ de\ la\ planta \end{pmatrix} = 15.000 \frac{t.\ residuo\ PEAD}{año} \cdot \frac{140\ €}{1\ t.\ residuo\ PEAD} =$$

$$= 2.100.000 \frac{€}{año}$$

- Fijos:

Mano de obra			
Puesto	**Número necesario**	**Salario anual (€, 2007)**	**Coste (€/año)**
Jefe de planta	1	103.692	103.692
Ingeniero de planta	1	49.377	49.377
Supervisor mantenimiento	1	40.207	40.207
Jefe de laboratorio/Químico	1	39.501	39.501
Supervisor de turnos	1*	33.858	33.858
Técnico de mantenimiento	1*	28.215	28.215
Operarios de turno	4*	28.215	112.860
Administrativos	1*	25.394	25.394
Subtotal	.	-	**443.104**
Otros			
Gastos generales			398.793
Mantenimiento			66.826

Seguros e impuestos	29.314
Subtotal	**494.933**
Total Costes Operación Fijos	**938.037**

***** Los valores se han reducido para adaptarse al tamaño de la planta diseñada, de una capacidad inferior a la considerada por la estadística.

c) Resumen:

Tipo de coste	**Importe**	**Unidad**
Costes Directos Totales	2.617.362	€
Costes Indirectos Totales	1.570.416	€
Suelo	18.845	€
Capital de explotación	209.389	€
Coste Total de Inversión del proyecto	**4.416.012**	**€**
Costes de Operación Variables	2.100.000	€/año
Costes de Operación Fijos	938.037	€/año
Costes Totales de Operación	**3.038.037**	**€/año**

4.4. Caso 2:

"Techno-Economic Analysis of Biomass Fast Pyrolysis to Transportation Fuels" Mark M. Wright, Justinus A. Satrio, and Robert C. Brown (Iowa State University) Daren E. Daugaard (ConocoPhillips Company) David D. Hsu National (Renewable Energy Laboratory).

a) Datos:

- Materia prima: rastrojos de la planta del maíz.
- Pretratamiento: cortado, secado y triturado.
- Reactor: lecho fluidizado, a 480º C.
- Caudal másico de entrada: 83,3 t. biomasa seca/hora
- Productos de salida: bio-oil, bio-char, gas non-condensable.
- Unidades:

Section Name	Section Description	Key Assumptions
Chopping	Particle size reduction to 10 mm	Incoming biomass average size of 10 to 25 mm
Drying	Biomass drying to 7% moisture	Steam drying at 200°C
Grinding	Particle size reduction to 3 mm	Incoming biomass maximum size of <10 mm
Pyrolysis	Biomass conversion to pyrolysis products	480°C and 1 atm 2.75 kg of fluidizing gas per kg of biomass Heat provided by char combustion
Solids Removal	Removal of entrained solid particles from vapor stream	~90% particle removal
Bio-Oil Recovery	Collection of condensing vapors	Rapid condensation to about 50°C 95% collection of aerosols
Storage	Storage of bio-oil and char	4 weeks storage capacity
Combustion	Provides process heat and steam generation	120% excess air combustion 1,100°C gas temperature 200°C steam generation

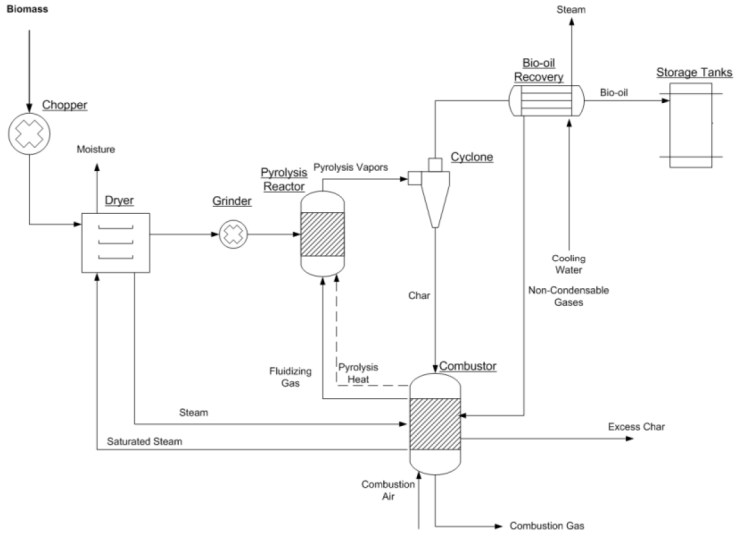


Figura 78 - Unidades de proceso caso 2.

- Costes de equipo instalado: el estudio emplea el programa Aspen Icarus para estimar el coste de equipos (valores 2010):

Number Required	Number Spares	No. Req. Variable	Area	Equipment Type	Equipment Cost	Total Equipment Cost (with spares)	Installed Cost
2	0	2	Pretreatment	Bale Transport Conveyor	$533,000	$1,066,000	$3,219,320
2	0	2	Pretreatment	Bale Unwrapping Conveyor	$200,000	$400,000	$1,208,000
1	0	1	Pretreatment	Discharge Conveyor	$67,000	$67,000	$202,340
1	0	1	Pretreatment	Truck Scales	$45,000	$45,000	$135,900
4	0	4	Pretreatment	Truck Unloading Forklift	$24,000	$96,000	$289,920
4	0	4	Pretreatment	Bale Moving Forklift	$24,000	$96,000	$289,920
1	0	1	Pretreatment	Concrete Storage Slab	$600,000	$600,000	$1,812,000
1	0	1	Pretreatment	Belt Press	$133,000	$133,000	$401,660
1	0	1	Pretreatment	Magnetic Separator	$19,000	$19,000	$57,380
1	0	1	Pretreatment	Biomass Chopping Screen	$22,500	$22,500	$67,950
4	0	4	Pretreatment	Rotary Dryer	$681,400	$2,725,600	$8,231,312
1	0	1	Pretreatment	Biomass Grinding Screen	$23,000	$23,000	$69,460
1	0	1	Pretreatment	Steam Blower	$803,300	$803,300	$2,425,966
1	0	1	Pretreatment	Grinding Hammer Mill	$302,200	$302,200	$912,644
1	0	1	Pretreatment	Chopper	$302,200	$302,200	$912,644
4	0	4	Pyrolysis	Screw Feeder	$162,500	$650,000	$1,963,000
1	1	2	Pyrolysis	Condenser Water Pump	$669,700	$1,339,400	$4,044,988
1	1	2	Pyrolysis	Bio-oil Condenser	$998,700	$1,997,400	$6,032,148
4	0	4	Pyrolysis	Biomass Feeding Bin	$41,400	$165,600	$500,112
1	0	1	Pyrolysis	Electro-Static Precipitator	$292,400	$292,400	$883,048
1	0	1	Pyrolysis	NCG/Oil Separation	$215,400	$215,400	$650,508
1	0	1	Pyrolysis	Pyrolysis Vapor Cyclones	$1,262,000	$1,262,000	$3,811,240
4	0	4	Pyrolysis	Pyrolysis Fluid Bed	$836,000	$3,344,000	$10,098,880

b) Estimación de costes del proyecto en base a caso 2:

b.1. Estimación Coste de Equipos: en este caso los precios son de 2010, luego no hay que usar el índice CEPCI. En la partida de la pirólisis el caso 2 ha incluido el ciclón y el intercambiador, luego se unen los 3 equipos en una sola unidad. Los equipos "Steam Blower" del pretratamiento, y "Electro-Static Precipitator" y "NCG/Oil Separation" de pirólisis no se contabilizarán al no existir en el proyecto.

Unidad de proceso	Coste Equipos Instalados caso 2 (2010)	Coste Equipos Instalados Proyecto
Pretratamiento	17.810.450 $	1,313,661€
Pirólisis + ciclón + intercambiador	26.450.368 $	1.950.334 €
Coste Equipos Instalados	44.260.818 $	**3.263.995 €**

$$\left(\begin{matrix}Coste\ \mathrm{Pr}etratamiento\\ \mathrm{Pr}oyecto\end{matrix}\right)=17.810.450\ \$\cdot\left(\frac{1{,}82t.\ PEAD/h}{83{,}3\ t.\ biomasa/h}\right)^{0{,}6}=1.796.100\ \$=$$
$$=1.313.661\ €$$

$$\left(\begin{matrix}Coste\ \mathrm{Re}actor+Ciclón+\\ Intercambiador\ \mathrm{Pr}oyecto\end{matrix}\right)=26.450.368\ \$\cdot\left(\frac{1{,}82\ t.\ PEAD/h}{83{,}3\ t.\ biomasa/h}\right)^{0{,}6}=$$
$$=2.667.396\ \$=1.950.334\ €$$

b.2. Estimación Coste Total de Inversión del proyecto:

Tipo de Coste	Cantidad
Coste Equipos Instalados	**3.263.995 €**
Almacén	130.560 €
Desarrollo en el lugar	293.759 €
Sistema tuberías adicional	146.880 €
Costes Directos Totales	**3.835.194 €**
Gastos prorateables	383.519 €
Gastos de campo	383.519 €
Oficinas y cuotas de construcción	767.038 €
Contingencias del proyecto	383.519 €
Otros costes (encendido)	383.519 €
Costes Indirectos Totales	**2.301.114 €**

Inversión de capital fijo	**6.136.308 €**
Suelo	27.613 €
Capital de explotación	306.815 €
Coste Total de Inversión del proyecto	**6.470.736 €**

b.3. Estimación Costes de Operación:

- Variables: costes adquisición de materia prima.

$$\begin{pmatrix} Capacidad\ tratamiento \\ de\ la\ planta \end{pmatrix} = 15.000 \frac{t.\ residuo\ PEAD}{año} \cdot \frac{140\ €}{1\ t.\ residuo\ PEAD} =$$

$$= 2.100.000 \frac{€}{año}$$

- Fijos:

Mano de obra			
Puesto	**Número necesario**	**Salario anual (€, 2007)**	**Coste (€/año)**
Jefe de planta	1	103.692	103.692
Ingeniero de planta	1	49.377	49.377
Supervisor mantenimiento	1	40.207	40.207
Jefe de laboratorio/Químico	1	39.501	39.501
Supervisor de turnos	1*	33.858	33.858
Técnico de mantenimiento	1*	28.215	28.215
Operarios de turno	4*	28.215	112.860
Administrativos	1*	25.394	25.394
Subtotal	.	-	**443.104**
Otros			
Gastos generales			398.793
Mantenimiento			97.920
Seguros e impuestos			42.954
Subtotal			**539.667**
Total Costes Operación Fijos			**982.771**

***** Los valores se han reducido para adaptarse al tamaño de la planta diseñada, de una capacidad inferior a la considerada por la estadística.

c) Resumen:

Tipo de coste	Importe	Unidad
Costes Directos Totales	3.835.194	€
Costes Indirectos Totales	2.301.114	€
Suelo	27.613	€
Capital de explotación	306.815	€
Coste Total de Inversión del proyecto	**6.470.736**	**€**
Costes de Operación Variables	2.100.000	€/año
Costes de Operación Fijos	982.771	€/año
Costes Totales de Operación	**3.082.771**	**€/año**

4.5. Caso 3:

"Feasibility Study for a Demonstration Plant for Liquefaction and Coprocessing of Waste Plastic and Tires" Gerald P. Huffman and Naresh Shah, Consortium for Fossil Fuel Liquefaction Science. University of Kentucky, Lexington.

a) Datos:

- Materia prima: residuos de plástico.
- Caudal másico de entrada: 300 t. residuos plásticos/día
- Productos de salida: 10-15% gases y 75-80% aceites pirolíticos..
- Unidades:
  - Pretratamiento: cortado y separación magnética.
  - Reactor: pirólisis a unos 600 ℃.
  - Condensador de gases de pirólisis.

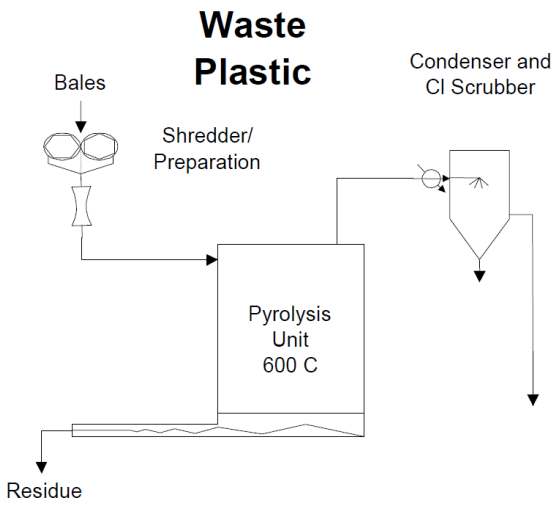


Figura 78 - Unidades de proceso caso 3.

- Costes de equipo instalado: (valores 1.999):

Equipment Unit	Capital cost ($MM)
Plastics shredder	1.129
Magnetic/eddy current separators	0.108
Plastic pyrolysis	9.429
Condenser/scrubber	0.438

b) Estimación de costes del proyecto en base a caso 3:

b.1. Estimación Coste de Equipos: el estudio emplea la investigación de N. Shah, J. Rockwell, y Huffman de la publicación *Energy & Fuels*. Las etapas de triturado y separadores magnéticos serán consideradas como pretratamiento, la pirólisis del plástico llevará incluido el ciclón y la etapa de condensación equivaldrá al intercambio de calor.

Unidad de proceso	**Coste Equipos Instalados caso 3 (1.999)**	**Coste Equipos Instalados Proyecto**
Pretratamiento	1.237.000 $	281.886 €
Pirólisis + ciclón	9.429.000 $	2.146.640 €

Intercambiador	438.000 $	99.680 €
Coste Equipos Instalados	11.104.000 $	**2.528.206 €**

$$\begin{pmatrix} Coste\ \Pr etratamiento \\ \Pr oyecto \end{pmatrix} = 1.237.000\$ \cdot \left(\frac{550,8}{390,6}\right) \cdot \left(\frac{1,82\ t.\ PEAD/h}{22,3\ t.\ biomasa/h}\right)^{0,6} =$$

$$= 387.874\ \$ = 281.886\ €$$

$$\begin{pmatrix} Coste\ Pirólisis + ciclón \\ \Pr oyecto \end{pmatrix} = 9.429.000\$ \cdot \left(\frac{550,8}{390,6}\right) \cdot \left(\frac{1,82\ t.\ PEAD/h}{22,3\ t.\ biomasa/h}\right)^{0,6} =$$

$$= 2.956.563\ \$ = 2.146.640\ €$$

$$\begin{pmatrix} Coste\ Condensador \\ \Pr oyecto \end{pmatrix} = 438.000\$ \cdot \left(\frac{550,8}{390,6}\right) \cdot \left(\frac{1,82\ t.\ PEAD/h}{22,3\ t.\ biomasa/h}\right)^{0,6} =$$

$$= 137.339\ \$ = 99.680\ €$$

b.2. Estimación Coste Total de Inversión del proyecto:

Tipo de Coste	**Cantidad**
Coste Equipos Instalados	**2.528.206 €**
Almacén	101.128 €
Desarrollo en el lugar	227.538 €
Sistema tuberías adicional	113.769 €
Costes Directos Totales	**2.970.641 €**
Gastos prorateables	297.064 €
Gastos de campo	297.064 €
Oficinas y cuotas de construcción	594.128 €
Contingencias del proyecto	297.064 €
Otros costes (encendido)	297.064 €
Costes Indirectos Totales	**1.782.384 €**
Inversión de capital fijo	**4.753.025 €**
Suelo	21.389 €

Capital de explotación	237.651 €
Coste Total de Inversión del proyecto	**5.012.065 €**

b.3. Estimación Costes de Operación:

- Variables: costes adquisición de materia prima.

$$\begin{pmatrix} Capacidad\ tratamiento \\ de\ la\ \ planta \end{pmatrix} = 15.000 \frac{t.\ residuo\ PEAD}{año} \cdot \frac{140\ €}{1\ t.\ residuo\ PEAD} =$$

$$= 2.100.000 \frac{€}{año}$$

- Fijos:

Mano de obra			
Puesto	**Número necesario**	**Salario anual (€, 2007)**	**Coste (€/año)**
Jefe de planta	1	103.692	103.692
Ingeniero de planta	1	49.377	49.377
Supervisor mantenimiento	1	40.207	40.207
Jefe de laboratorio/Químico	1	39.501	39.501
Supervisor de turnos	1*	33.858	33.858
Técnico de mantenimiento	1*	28.215	28.215
Operarios de turno	4*	28.215	112.860
Administrativos	1*	25.394	25.394
Subtotal	.	-	**443.104**
Otros			
Gastos generales			398.793
Mantenimiento			75.846
Seguros e impuestos			33.271
Subtotal			**507.910**
Total Costes Operación Fijos			**951.014 €**

***** Los valores se han reducido para adaptarse al tamaño de la planta diseñada, de una capacidad inferior a la considerada por la estadística.

c) Resumen:

Tipo de coste	Importe	Unidad
Costes Directos Totales	2.970.641	€
Costes Indirectos Totales	1.782.384	€
Suelo	21.389	€
Capital de explotación	237.651	€
Coste Total de Inversión del proyecto	**5.012.065**	**€**
Costes de Operación Variables	2.100.000	€/año
Costes de Operación Fijos	951.014	€/año
Costes Totales de Operación	**3.051.014**	**€/año**

4.6. Comparativa de estimaciones de costes del proyecto:

	Materia prima caso	Año caso	Capacidad tratamiento caso (t./h)	Estimación Coste Total Inversión del Proyecto realizado(€)	Estimación Coste Total Operaciones del Proyecto realizado (€/año)
Caso 1	Astillas madera	2.003	41,5	4.416.012	3.038.037
Caso 2	Rastrojo maíz	2.010	83,3	6.470.736	3.082.771
Caso 3	Residuos plásticos	1.999	22,3	5.012.065	3.051.014

El caso 3 emplea los mismos residuos que en el proyecto realizado, aunque son datos antiguos, de 1.999. Aún así, se ha observado que para los otros casos más recientes, aún con materias primas diferentes, los resultados no se alejan demasiado. Por tanto, los valores intermedios serían:

Coste Total Inversión Proyecto:	**5.299.604**	**€**
Coste Total Operaciones:	**3.057.274**	**€/año**

INDICE DE FIGURAS, TABLAS, GRÁFICAS E IMÁGENES

Figuras……pág. 1

Tablas……pág. 6

Gráficas……..pág. 10

Imágenes……pág. 12

Mapas……..pág. 12

FIGURAS

Número	Comentario	Sección	Página
1	Esquema de polimerización del etileno para obtención de polietileno.	CAP.1. ANTEC.	2
2	Modelos estructurales de los plásticos		5
3	Vías de generación de residuos plásticos		12
4	Esquema de formas de gestión de residuos plásticos.		18
5	Esquema reciclaje mecánico primario		19
6	Sistema de incineración con recuperación energética. SOGAMA.		23
7	Consumo aparente de plásticos estándar en España. Centro español de plásticos.	CAP. 2. OBJ. Y JUSTIF.	5
8	Rotura de una molécula por craqueo térmico. BTG.		8
9	Pirólisis térmica y catalítica. Grupo de I+D de la Univ. de Ashton.		10
10	Tipos de reactores de pirólisis susceptibles de operación comercial. Grupo de Bioenergía de la Universidad de Ashton.		11
11	Esquemas de procesos con reactores BBF y CFB.		11
12	Reactor de lecho fluidizado burbujeante con ciclón interno. Fuente: Manual del Ingeniero Químico - Perry 7ª Ed.		13
13	Tipos de procesos producidos en reactores de lecho fluidizado.	CAP. 2. OBJ. Y JUSTIF.	16
14	Regímenes de fluidización.		17
15	Tipos de lechos con slugging.		18
16	Partes elementales de un reactor de lecho fluidizado.		20
17	Modelo De fluidización de dos fases. Handbook of solids fluidization.		22
18	Modelo de fluidización de Partdige y Rowe. Handbook of solids fluidization.		23
19	Modelo de Kunii-Levenspiel. Handbook of		24

	solid fluidization.		
20	Suposiciones realizadas en el modelo de Kunii-Levenspiel. Handbook of solids fluidization.		25
21	Modelo de fluidización de Kato y Wen. Handbook of solid fluidization.		26
22	Intercambiador de carcasa y tubos en forma de U. KLM Technology Group. Engineers India Ltd.		30
23	Intercambiador de carcasa y tubos con cabeza flotante (TEMA S). Engineers India Ltd.		31
24	Diferentes mecanismos propuestos de estallido de burbujas en la superficie de lechos fluidizados. (a) desde la nariz, (b) desde la estela, (c) desde la estela de dos burbujas coalescentes. Handbook of particle fluidization.		33
25	Zonas dentro de un depósito con un lecho fluidizado. Handbook of particle fluidization.		34
26	Tipos comunes de ciclón de flujo invertido. Handbook of particle fluidization.	CAP. 2. OBJ. Y JUSTIF.	36
27	Configuraciones de ciclones 1D3D, 2D2D y 1D2D		37
28	Pirólisis de biomasa. VTT.		38
29	Pirólisis de biomasa. BTG.		39
30	Pirólisis de biomasa. BTG.		39
31	Pirólisis de biomasa. Envergent		40
32	Evolución de la producción de petróleo en el tiempo. Agencia Internacional de la Energía.		41
33	Situación del PAMA. Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía.	CAP.3. UBIC. PLANTA	2
34	Detalles trituradora de plásticos. Fuente: Trituradores industriales ISVE.	CAPT. 6 DESC. PROCESO.	4
35	Esquema proceso Battelle de gasificación.		6
36	Tornillo sin-fin.		7
37	Sistema de alimentación al reactor. Uhde.		8

38	Reactor de Pirólisis. YassineMrabet.		9
39	Esquema de horno calefactor. Fuente: Elaboración propia.		11
40	Ciclón de flujo invertido.		12
41	Torre de condensación. Fuente: Airpol.		14
42	Separador de hidrocarburos. Fuente: Repsol.		15
43	Esquema de cogeneración en ciclo combinado. Fuente: Biblioteca SciElo.		16
44	Esquema de distribución de la energía generada en la planta. Fuente: General Electrics.		17
45	Esquema de la pirólisis. Hernández. Tesis Doctoral Universidad de Alicante.		20
46	Reacciones en el interior del reactor. Elaboración propia.		20
47	Desarrollo de pirólisis en reactor de lecho fluidizado. Hernández. Tesis Doctoral Univ. de Alicante.		21
48	Configuraciones de diferentes tipos de plenum. Handbook of fluidization and fluid-particle systems.	CAPT. 6 DESC. PROCESO.	23
49	Diferentes orientaciones de entrada del gas a través del distribuidor. Handbook of fluidization and fluid-particle systems.		23
50	Capuchas de burbujeo. (A) y (B) de flujo lateral, y la otra de flujo hacia abajo. Handbook of fluidization and fluid-particle systems.		24
51	Zonas de ebullición en flujo interno y evolución del coef. de transf. de calor. Del Valle et al. 1993.		26
52	Diseño planta IPCC. Alliant Energy		28
53	Rutas de producción de sustancias a través de la gasificación de los aceites de pirólisis. Grupo I+D Universidad Ashton.	CAP. 7. PROD. DEL PROCESO	4
54	Balance de materia global unidad pirolítica	ANEXO A.1	6

55	Balance de energía global unidad pirolítica		20
56	Esquema de los pasos a realizar en el diseño de reactores de lecho fluidizado. Krishna, 1994; Jazayeri, 1995.	ANEXO A.2	1
57	Zonas del lecho, según Baeyens y Geldart		19
80	Esquema de la unidad pirolítica y sus corrientes		23
81	Esquema de la unidad pirolítica y sus corrientes simplificadas		23
58	Algoritmo de cálculo para el diseño de un reactor de lecho fluidizado. Fogler et al. (1981).		36
59	Alturas del lecho fluidizado y en mínima fluidización dentro del reactor.		41
60	Modelo de burbujas lentas y rápidas de Davidson		42
61	Aproximación del modelo de Kunii-Levenspiel		47
62	Dispositivos para evitar desviaciones grandes en lechos con grandes burbujas. Octave Levenspiel.		52
63	Configuraciones de los orificios.		56
64	Diseño boquilla placa distribuidora.		58
65	Esquema de un chorro de gas saliente de la boquilla.		60
66	Coalescencia entre chorros en lechos fluidizados. Wu and Whiting, 1988.	ANEXO A.2	61
67	Esquema del compresor de gas recirculado al reactor.		63
68	Esquema de presiones en el reactor de pirólisis.		64
69	Disposición dimensional del ciclón 1D2D.	ANEXO 3	6
70	Red de resistencias térmicas asociada con la transferencia de calor en un intercambiador de calor de tubo doble. Amancio, Mg.	ANEXO 4	4
71	Distribución del reciclaje mecánico de	ANEXO B.	10

	plásticos en España por CC.AA. en 2006. CICLOPLAST		
72	Esquema itinerario de la documentación DCS.	ANEXO D.	15
73	Esquema de depuración de los vertidos. Elaboración propia.	ANEXO E.	9
74	Ejemplo de Scrubber. Fuente: Gemata, equipos de acabado		12
75	Esquema del tratamiento de las cenizas. Fuente: Proceso KOMPACTAT© de RESA.		14
76	Centrifugadora de lodos. Fuente: BEFESA.		16
77	Unidades de proceso caso 1.	ANALIS. ECO.	5
78	Unidades de proceso caso 2.		9
79	Unidades de proceso caso 3.		14

TABLAS

Número	Comentario	Sección	Página
1	Clasificación de los plásticos reciclables más famosos.	CAP.1. ANTECEDENTES	6
2	Tecnologías de gestión de residuos plásticos.		17
3	Condiciones de reacción típicas y productos de los procesos de pirólisis, gasificación e incineración.		24
4	Consideraciones para el cumplimiento de los criterios “Fin de residuo” de acuerdo con el artículo 6 de la Directiva Marco de residuos. JRC-IPTS	CAP. 2. OBJ. Y JUSTIF.	4
5	Polímeros como materia prima. Programa Medioambiental de N.U.		6
6	Tipos de productos de la pirólisis de plásticos. Programa medioambiental de Naciones Unidas.		7
8	Combinación de factores en los productos de pirólisis. Guerra Reyes y Ramos Robaina “Año 50 de la revolución”.		9
9	Designaciones TEMA para intercambiadores de calor de carcasa y tubos		29
10	Empresas comerciales que emplean pirólisis. NREL		38
11	Proyectos Incentivables. Fuente: BOJA.		43
12	Codificación y descripción de residuos plásticos. Código LER.	CAPT. 6 DESC. PROCESO.	1
13	Poderes caloríficos de los residuos plásticos usados. Fuente: Cicloplast.		2
15	Indice de octanos de diferentes compuestos. CEPSA.	CAP. 7. PROD. DEL PROCESO	3
16	Peso molecular y densidad del PEAD. Polymer Handbook Data.	ANEXO A.1.	1
17	Rendimiento de pirólisis del PE. Kaminsky,		2

	W. 1993.		
18	Tiempos de residencia. Mastral et al. 2001		3
19	Entalpías de fusión del PE en función de la temperatura. Umesh et al. 1981.		10
20	Parámetros cinéticos para la pirolisis del PE. Westerhout et al. 1997		12
21	Propiedades de la arena para fluidización. Choi et al. 1998.	ANEXO A.2	2
22	Constantes de Sutherland de varios gases. Hall, N.A. Thermodynamics of fluid flow.		5
23	Resumen datos de partida.		6
24	Valores K_1 y K_2 para la ecuación de mínima fluidización. Tésis doctoral Hernández Férez. 2007.		8
25	Criterios de transición entre régimen de fluidización particulado y agregativo.		14
26	Descripción de los diferentes regímenes de fluidización. Handbook of fluidization and fluid-particle systems.	ANEXO A.2	17
28	Ecuaciones de fluidización de diferentes autores.		20
29	Resultados de las ecuaciones de fluidización de diferentes autores.		21
30	Procedimiento prueba-error para el cálculo del coeficiente de recirculación del gas en el reactor.		26
31	Procedimiento prueba-error para el cálculo del coeficiente de recirculación del gas en el reactor. Continuación (a).		27
32	Procedimiento prueba-error para el cálculo del coeficiente de recirculación del gas en el reactor. Continuación (b).		28
33	Tabla resumen de los parámetros asociados en el cálculo del coeficiente de recirculación al reactor.		30

34	Parámetros cinéticos para la pirólisis del PE recogidos en la literatura.		33
35	Ecuaciones para calcular el diámetro de burbuja. Farshi et al. 2007		37
36	Correlaciones para el cálculo de la Altura de transporte libre.	ANEXO A.3.	1
37	Coeficientes de contracción para diferentes cocientes de áreas pequeña-grande.		11
38	Características de los tubos del intercambiador. Manual TEMA	ANEXO A.4.	7
39	Resistencias por ensuciamiento. Manual TEMA		8
40	Propiedades físicas del acero AISI 316		9
41	Propiedades de gases a presión atmosférica. Manual Perry		11
42	Propiedades de los gases extrapoladas a 830,5 K.		12
43	Propiedades del agua a diferentes temperaturas.		14
44	Tensión superficial interfase líquida agua-vapor a presión de saturación. NIST.		17
45	Propiedades del agua saturada (líquido-vapor). Tabla de presiones.		17
46	Resumen de parámetros de diseño del intercambiador.		19
47	Datos del reciclaje de envases de plástico en España. Ecoembes	ANEXO B.	3
48	Tipos de plásticos más comunes y composición en RSU. Fuente: Tesis Deseada Berenguer Muñoz.		4
56	Datos estimados de generación y reciclaje RPUA. Fuente: ANAIP Y CICLOAGRO		6
57	Plásticos de uso agrario en 2003. Cicloagro	ANEXO B.	7

58	Plásticos de uso agrario en 2003. Cicloagro		7
49	Recicladores de plástico en España. Cicloplast.		8
50	Acuerdos de colaboración firmados por la Consejería Medio Ambiente. Junta Andalucía.		9
51	Principales recicladores en España. Ecoembes.		12
52	Precios para residuos plásticos. Ecoembes.		13
53	Variables de evaluación de la significancia.	ANEXO A.E.	5
54	Evaluación de Impactos Ambientales.		6
55	Listado de residuos producidos por código LER.		12
55	Factores empleados en el cálculo de los Costes de Inversión. Grupo Harris.	ANALISIS ECO.	1
57	Ejemplos de exponentes típicos para la estimación de equipos según su capacidad.		2
58	Índices de coste de plantas en Ingeniería Química. *www.che.com/pci*		3

GRÁFICAS

Número	Comentario	Sección	Página
1	Principales aplicaciones de los plásticos reciclados en España.	CAP.1. ANTECEDENTES	8
2	Consumo aparente de plásticos por familias en España.		9
3	Avances de los envases y embalajes de plástico.		10
4	Evolución del reciclaje de residuos plásticos por sectores en España (Centro español de plásticos),		13
5	principales plásticos reciclados en España en 2005.		13
6	Consumo aparente de plásticos estándar en España. Centro español de plásticos.	CAP. 2. OBJ. Y JUSTIF.	5
7	Fracciones de productos de diferentes procesos termoquímicos. ECN.	CAP. 7. PROD. DEL PROCESO	3
8	Capacidad calorífica del PE cristalino en función de la temperatura. Umesh et al. 1981.	ANEXO A.1.	9
9	Capacidad calorífia del PE fundido en función de la temperatura. Umesh et al. 1981.		11
10	Caída presión en lecho fluidizado con arena. Hang et al. 2004.	ANEXO A.2.	3
11	Clasificación Geldart de partículas.		12
12	Regímenes de fluidización. Handbook of fluidization and fluid-particle systems.		16
13	Dependencia de la fracción de estela en las características de las partículas (Geldart, 1986).		44
14	Lecho fluidizado en función del tamaño de la burbuja. Ingeniería de las reacciones químicas. Levenspiel.	ANEXO A.2.	52
15	Representación espesor respecto al coeficiente de descarga.		57

16	Gráfica de cálculo de la rugosidad de pared	ANEXO A.3.	13
17	gráfica de Moody para el cálculo del factor de fricción.		13
18	Curva de corrección de la caída de presión del ciclón. Handbook of particle fluidization.		16
19	Factor de corrección para 1 paso de casco en un intercambiador de carcasa y tubos. Manual del Ing. Químico. Perry.	ANEXO A.4	2
20	Factor de corrección para 2 pasos de casco en un intercambiador de carcasa y tubos. Manual del Ing. Químico. Perry.		3
21	Factor de supresión frente al Reynolds.		16
22	Evolución del reciclado de plásticos en España. Cicloplast.	ANEXO B.	1
23	Número anual de plantas de selección de plásticos. Cicloplast.		2
24	Distribución de consumo de materiales plásticos en España según sector. Cicloplast.		3
25	Distribución consumo plástico por tipo (en % de peso) en la UE15, Noruega y Suiza (APME, 2004).	ANEXO B.	4
26	Distribución del consumo de plásticos por el sector de la agricultura. Cicloplast.		5
26	Distribución de formas de gestión de residuos en la U.E. Informe PlasticsEurope, EUPC, EUPr, EPRO. 2008.		11

IMÁGENES

Número	Comentario	Sección	Página
1	Plásticos apilados. Ecoembes	CAPT. 6 DESC. PROCESO.	2
2	Vista nave almacenamiento. Cicloplast.		3
3	Tambor rotatorio con hélice para lavado de plásticos. Elreciclajedeplástico.com		5
4	Secadora por centrifugación. LANNER.		6
5	Motor de gas “Jenbacher”. General Electrics.		17
6	Empleo de las técnicas de acolchado y tunelillo en cultivos.	ANEXO B.	5
7	Panorámica de la parcela 56.	ANEXO C.	3

MAPAS

Número	Comentario	Sección	Página
1	Datos del catastro geométrico. Dirección General del Catastro”, web del Ministerio de Economía y Hacienda.	ANEXO C.	1
2	Ortofoto y parcelario superpuesto. Visor SIGPAC, web del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.		2
3	Situación parcela. Visor SIGPAC		3
4	Zona industrial metropolitana de Huelva. Agencia Andaluza de la Energía.		4
5	Zona industrial metropolitana de Sevilla. Agencia Andaluza de la Energía.		5
6	Zona industrial metropolitana del Campo de Gibraltar. Agencia Andaluza de la Energía.	ANEXO C.	6
7	Distribución geográfica suministradores de residuos plásticos		7
8	Distribución geográfica suministradores de clientes potenciales.		8

LISTA DE ABREVIATURAS

ARI:	agua residual industrial.
BAT:	best available tecnology (MTD).
BFB:	bubbling fluidized bed.
BTX:	benceno, tolueno, xileno (hidrocarburos aromáticos).
CDR:	combustible derivado del residuo.
CDTI:	centro de desarrollo tecnológico industrial.
CFB:	circulating fluidized bed.
DB-SI:	documento básico de seguridad en caso de incendio.
DCS:	documentos de control y seguimiento (de residuos peligrosos).
EDAR:	estación depuradora de aguas residuales.
FEDER:	fondo europeo de desarrollo regional.
GHL:	gas de hidrocarburos ligeros.
GTL:	gas to liquids.
HCl:	ácido clorhídrico.
HDPE:	high density polyethylene (PEAD).
ICO:	instituto de crédito oficial.
IDEA:	instituto para la diversificación y el ahorro de la energía.
IGCC:	integrated gasification and combined cycle.
IPCC:	integrated pyrolysis and combined cycle.
JRC-IPTS:	joint research centre institute for prospective technological studies
LDPE:	low density polyethylene (PEBD).
LLDPE:	linear low-density polyethylene.
MBC:	mezclas bituminosas en caliente.
MBF:	mezclas bituminosas en frío.
MTD:	mejores técnicas disponibles.
NO_x:	óxidos de nitrógeno.
NREL:	nacional renewable energy laboratory
PAC:	compuestos aromáticos policíclicos.
PAH:	polycyclic aromatic hydrocarbons (PAC).

PE: polietileno (genérico).

PEAD: polietileno de alta densidad.

PEBD: polietileno de baja densidad.

PET: poli etilen tereftalato.

PP: polipropileno.

PROFIT: programa de fomento de la investigación técnica.

PS: poliestireno.

PTF: plastic to fuel.

PUA: plásticos de uso agrícola.

PVC: polyvinyl Chloride (Cloruro de polivinilo).

R.P. residuos peligrosos.

RPUA: residuos de plásticos de uso agrícola.

RSU: residuo sólido urbano.

SIG: sistema integrado de gestión.

TDH: altura de transporte libre (Transport Disengaging Height).

TEMA: tubular exchangers manufacturers assosiation.

WTE: waste to energy.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Bibliografía general……pág. 1

Direcciones de Internet……pág. 2

Artículos científicos……pág. 3

Bibliografía General:

- Asociación de Ciudades y Regiones para el Reciclaje. “Guía de buenas prácticas para el reciclaje de los residuos plásticos una guía por y para las autoridades locales y regionales”. 2004.
- Blank, Leland T.; Tarquin, Anthony J. “Ingeniería Económica”. Cuarta Edición. McGrah Hill.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).
- Centro Español de Plásticos.
- Converting waste plastics into a resource. Compendium of technologies. United Nations Environment programme.
- Fluidization Engineering, Kunii, D., y Levenspiel, O. John Wiley & Sons. New York, 1969.
- Geldart D, Abrahamsen Ar. Homogeneous fluidization of fine powders using various gases and pressures. 1978.
- Goossens, WRA. Clasification of fluidizied particles by Archimedes number. 1998.
- Grace Jr., “Contacting modes and behaviour classification of gas-solid and other two-phase suspension.” 1986.
- Guía de valorización energética de residuos. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- Karri SBR. Grid Design Chapter, PSRI Design Manual, 1991.
- Levenspiel O. Chemical Reaction Engineering, 2nd ed. New York: John Wiley, 1972.
- Los plásticos: la energía desde otro punto de vista. PlasticsEurope Ibérica.
- Manual deL Ingeniero Químico. Robert Perry. 7ª Edición.
- Manual TEMA (Tubular Exchangers Manufacturers Assosiation, 1999).

- Plan nacional de residuos de plásticos de uso agrario (2007-2015).
- Polymer Data Handbook. James E. Mark, University of Cincinnati.
- Proyecto de "Análisis de Ciclo de Vida de los plásticos", realizado por la Association of Plastics Manufacturers in Europe (APME).
- Wen-Ching Yang. Handbook of fluidization and fluid-particle systems. Siemens Westinghouse Power Corporation.

Direcciones de Internet:

- www.agenciaidea.es/cocoon/index (Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía (IDEA).
- www.anarpla.com (Asociación nacional de recicladores de plástico).
- www.aop.es (Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos).
- www.aznalcollar.es
- www.catastro.meh.es
- www.cicloplast.com
- www.cne.es (Comisión Nacional de Energía).
- www.construmatica.com
- www.ecoembes.com
- www.ecoticias.com
- www.ecojoven.com
- www.eia.doe.gov (U.S. Energy Information Administration).
- www.eucc-pama.es (Parque de Actividades Medioambientales de Andalucía (PAMA).
- www.fomento.es
- www.juntadeandalucia.es/boja (Boletín Oficial de la Junta de Andalucía)

- www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web
- www.juntadeandalucia.es/obraspublicasytransportes
- www.kalipedia.com
- www.lexjuridica.com
- www.marm.es (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino)
- www.mma.es
- www.monografias.com
- www.noticiasjuridicas.com
- www.oil-price.net
- www.paot.org.mx
- http://www.plasticseurope.org/
- www.rua.ua.es
- http://www.peacesoftware.de/einigewerte/calc_dampf.php5 (Calculador on-line de propiedades térmicas del agua y vapor).
- www.plasticsportal.net
- http://sigpac.mapa.es/fega/visor/
- www.traficoadr.com
- http://www.unctad.org/infocomm/espagnol/introdes.htm (United Nations Conference on Trade and Development).

Artículos Científicos:

- Aden, A.; Ruth, M.; Ibsen, K.; Jechura, J.; Neeves, K.; Sheehan, J.; Wallace, B.; Montague, L.; Slayton, A.; Lukas, J. *Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymantic Hydrolysis for Corn Stover.* NREL, 2002.
- Alonso Morales, María Noelia, “Obtención de sólidos carbonosos mediante pirólisis de baja densidad”.

- Amancio, Mg; Rojas Flores, R. “Análisis de los Intercambiadores de calor”.
- Aracil Sáez, Ignacio, “Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP).”
- Arendes, J. M., Bilbao, J., López Valerio, D. “Reciclado de Residuos Plásticos. Revista Iberoamericana de Polímeros”. Marzo 2004.
- Atal, A.; Levendis, Y.A.; Carlson, J.; Dunayevskiy, Y.; Vouros, P. “On the survivability and pyrosynthesis of PAH during combustión of pulverizad coal and tire crumb.” Combust. Flame. 1997.
- Baeyens J, Geldart D. Fluidization et ses Applications. Toulosse, 1973.
- Baeyens J, Geldart D. Fluidization et ses Applications. 1974.
- Baskakov AP, Berg BV, Vitt Ok et al. “Heat transfer to objects immersed in fluidized beds. Powder Technology, 1973.
- Basov VA, Markhevka VI, Melik-Akhnazanov TKh, Orochke DI. Investigation of th estructure of a non-uniform fluidized bed. Intern Chem Eng, 1969.
- Behie LA, Kehoe P. The grid region in a fluidized bed reactor. AIChE J 19:1070-1072, 1973.
- Berenguer Muñoz, Deseada “Craqueo catalítico de polímeros; estudio de diferentes sistemas polímero/catalizador.”
- Berrueco, C; Mastral, F.J.; Esperanza, E. and Ceamanos J., “Production of Waxes and Tars from the Continuous Pyrolysis of High Density Polyethylene. Influence of Operation Variables”. Department of Chemical and Environmental Engineering, Centro Politécnico Superior, University of Zaragoza, Spain.
- Beyler, CL & Hirschler, MM 2001, ‘Thermal decomposition of polymers’, In PJ Dinenno (ed), *SFPE Hanbook of Fire Protection Engineering*. 3rd edn, Quincy, Boston.

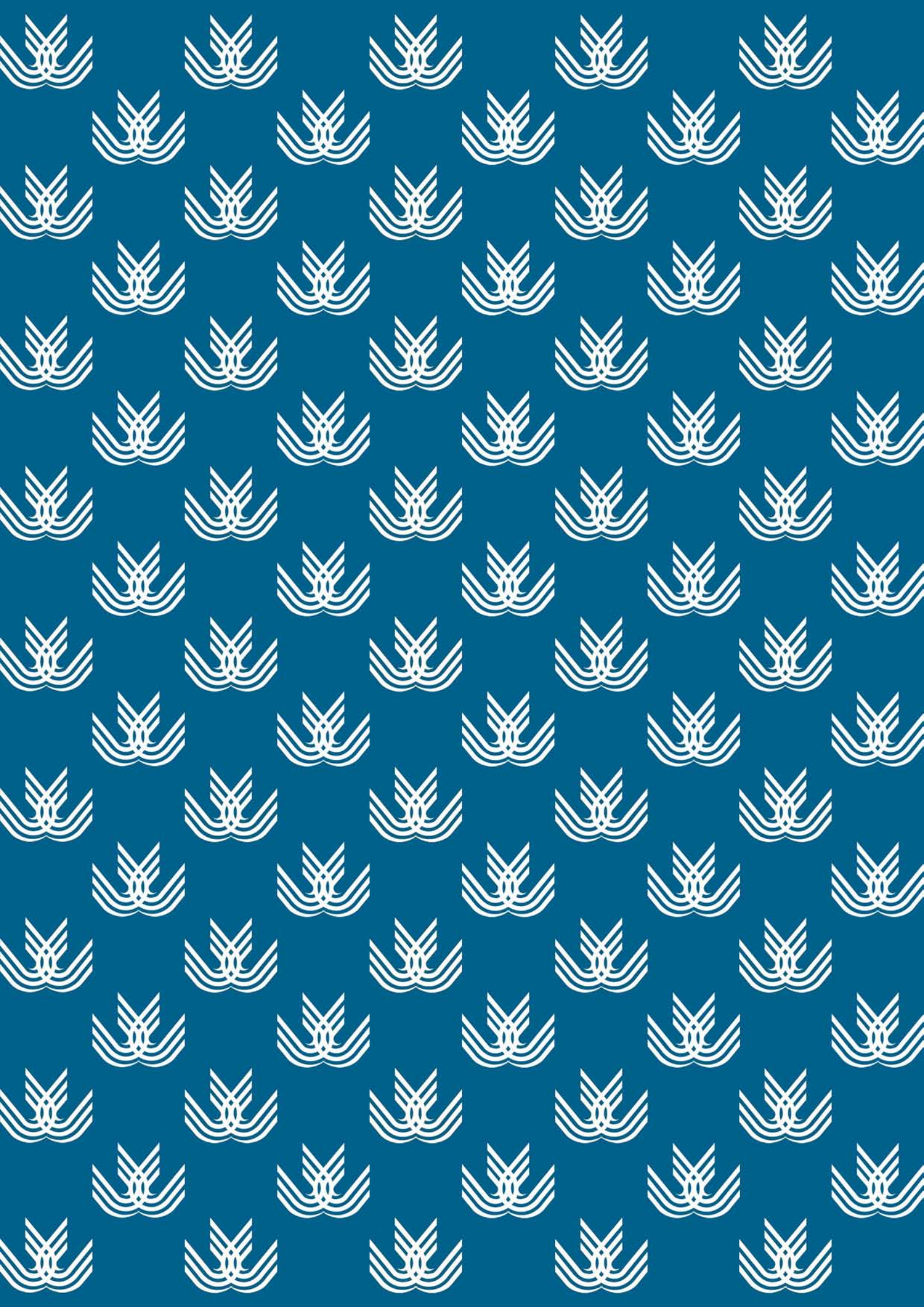
- Blinichev VN, Streltsov VV, Lebedeva ES. An investigation of the size reduction of granular materials Turing their processing in fluidized beds. Int. Chem. Eng 8(4):615-618, 1968.
- Boterill JSM. “Fluid bed heat transfer. Gas Fluidization Technology” (D. Geldart, Ed.). John Wiley, Chichester, 1986.
- Bryant HS, Silverman RW, Zenz FA. How dust in gas affects cyclone pressure drop. Hydrocarbon processing June. 1983.
- Buevich YA, Minaev GA. Mechanics of jet flows in granular layers, evolution of single jets and the nucleation mechanism. InzhFiz Zh, 1976.
- Buzeto, F.A.; Kaminsky W.; Campos J.S.C. “Recycling of polyolefins by pyrolysis in a fluidized bed reactor”. Department of Polymer Technology – College of Chemical Engineering State University of Campinas - University of Hamburg– Germany.
- Ceamanos, J; Mastral, J.F.; Millera, A.; Aldea, M.E. “Kinetics of pirólisis of high density polyethylene. Comparison of isothermal and dynamic experiments.” Departamento de Ingeniería Química y Medioambiente. Universidad de Zaragoza. 2001.
- Ceamanos J., Mastral J.F., Liesa F. “Modeling of the pyrolysis of large samples of polyethylene including the melting process”. University of Zaragoza, Spain. 2001.
- Chavarie C., Grace J.R. “Interphase mass transfer in a fluidized bed.” Chem. Eng. Sci. 1976.
- Chen, J.C., “A correlation for boiling heat transfer to saturated liquids in convective flow”. Ind. Eng. Chem. Process. Des. Dev., 5(3): 322-329 (1966).
- Choi, J. H.; Ma, S. C.; Shun, D. W.; Son, J. E.; Kim, S. D. Effect of Temperature on the Decay Constant of the Axial Solid Holdup Profile in the Splash Region of a Gas Fluidized Bed. *HWAHAK KONGHAK (Korea)*, 1997.

- Choi, Jeong-Hoo; Ruy, Ho-Jung; Shun, Do-Won; Son, Jae-Ek; Kim, Sang-Done. “Temperature Effect on the particle entrainment rate in a gas fluidized bed.” Department of Chemical Engineering, Kon-Kuk University, Seoul, South Korea. 1998.
- Choi J-H, Chang I-Y, Shun D-W, Yi C-K, Son J-E, Kim S-D. “Correlation on the particle entrainment rate in gas fluidized beds.” Ind. Eng. Chem. 1999.
- Conesa, Juan A.; Font, Rafael; Marcilla, Antonio and Garcia, Angela N. “Pyrolysis of Polyethylene in a Fluidized Bed Reactor”. Department of Chemical Engineering, University of Alicante. 1994.
- Conesa, J. A.; Marcilla, A.; Font, R.; Caballero, J. J. Anal. Appl. Pyrol. 1996, 36, 1.
- Conesa, J.A., R. Font, A. Marcilla, J.A. Caballero. “Kinetic model for the continous pyrolysis of two types of polyethylene in a fluidized bed reactor.” Department of Chemical Engineering, University of Alicante. 1997.
- Conesa, J.A., Font R, and Marcilla, A. “Comparison between the Pyrolysis of Two Types of Polyethylenes in a Fluidized Bed Reactor”. Department of Chemical Engineering, University of Alicante. 1997.
- Costa P.A., Pinto F. J., Ramos A.M. et al. “Kinetic Evaluation of the Pyrolysis of Polyethylene Waste”. INETI-DEECA, Lisboa, and REQUIMTE, Departamento de Química, FCT-UNL Caparica, Portugal. 2007.
- Cozzani, V.; Nicolella, C.; Rovatti, M. and Tognotti, L. “Influence of gas-phase reactions on the product yields obtained in the pyrolysis of polyethylene”. Universita` degli Studi di Pisa and Universita` degli Studi di Genova, Italy. 1997.
- Cozzani, V. “Characterization of coke formed in the pyrolysis of polyethylene.” Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza dei Materiali, Universita` degli Studi di Pisa, Italy.
- Cruz Fierro, Carlos Francisco “Viscosidad de gases”. Instituto Tecnológico de Durango.

- Darton RC, LaNauze RD, Davidson JF, Harrison D., “Bubble growth due to coalescence in fluidized beds.” 1977.
- Day, M.; Cooney, J.D.; Touchette-Barrette, C. and Sheehan, S.E. “The pirólisis of mixed plastics, the Role of PVC: a material of concern or convenience?” National Research Council Canada, Ottawa, Canada.
- De Vries RJ, van Swaaij WPM, Mantovani C, Heijkoop A. Proc 5th Europe Symp Chem Reaction Eng., Amsterdam, 1972.
- Del Valle, Víctor H.; Cruz C., Guillermo; Olayo G., Guadalupe. “Análisis de modelos para la determinación del coeficiente de transferencia de calor en el flujo a dos fases.” Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. México. 1993.
- Desconocido, “Study on Pyrolysis Kinetics of Biomass and Experiment of Mid-temperature Flash Pyrolysis to Produce Bio-oil.” China papers. Doctoral dissertations.
- Do H, Grace JR, Clift R. “Particle ejection and entrainment from fluidized beds”. Powder Technology, 1972.
- Farshi A., Javaherizadeh H., Hamzavi MA, “An investigation of the effect of bubble diameter on the performance of gas-solid fluidized bed reactor and two-phase modelling of bubbling fluidized bed reactor in melamine production” Research Institute of Petroleum Industry, Tehran. Iran. 2007.
- Fogler, H. S. and L. F. Brown “Reaction Control and Transport, in *Chemical Reactors, ACS Symposium Series 168*” (Washington, D.C. American Chemical Society, 1981).
- Gaur, Umesh et al. Heat capacity and other thermodynamic properties of linear macromocules. 1981.
- Geldart D., “Types of gas fluidization.” 1973.
- Harrison D., Leung LS. “Bubble formation at an orifice in a fluidized bed.” 1961.

- Harrison D., Davidson JF., de Kock JW., “On the nature of aggregative and particulate fluidization. 1961.
- Heesink A.B.M., Klaus J., Van Swaaij W.P.M., “The influence of particle residence time distritubion on the reactivity influidized bed reactors”. Department of Chemical Engineering. Twente University of Technology. The Netherlands, 1994.
- Hernández Férez, María del Remedio, “Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados”.
- Jazayeri B. “Successfully scale up catalytic gas-fluizied beds”. Chem Eng Prog. 1995.
- Johannes, I.; Tamvelius, H.; Tiikma, Laine “A step-by-step model for pyrolysis kinetics of polyethylene in an autoclave under non-linear increase of temperature”. University of Techonology. Estonia. 2004.
- Johannes, I.; Tamvelius, H.; Tiikma, Laine “A step-by-step model for pyrolysis kinetics of polyethylene in an autoclave under non-linear increase of temperature”. University of Techonology. Estonia. 2004.
- Kaminsky, W. “Recycling of polymers by pyrolysis.” 1993.
- Kang, Suk-Hwan; Kang, Yong; Han, Kun-Hee and Jin, Gyoung-Tae. “Effects of pressure on the minimum fluidization velocity and bubble properties in a gas-solid fluidized bed”. School of Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea. 2004.
- Kayacan, I and Dogan, O.M. “Pyrolysis of Los and High Density Polyehtylene. Part I: Non-isothermal Pyrolysis Kinetics.” University of Gazi, Turkey. 2008.
- Kececioglu I, Yang WC, Keairns DL. Fate of solids fed pneumatically through a jet into a fluidized bed. AIChe, 1984.
- Keusenkothen, Paul F. et al. “Pyrolysis reactor conversión of hydrocarbon feedstocks into higher value hydrocarbons.”

- Knowlton TM, Hirsan I. Fluidization. Plenum Press, 1980.
- Krishna R. “A systems approach to multiphase reactor selection.” Advances Chem Eng. 1994.
- Lee, W.J.; Takeda, N.; Takatsuki, H. “Control of chlorinated aromatic compounds from a MSW incinerator using limestone addition.” Toxicol. Environ. Chem. 1999
- Levy EK, Caram HS, Dille JC, Edelstein S. Mechanisms for solids-ejection from gas-fluidized beds. AIChE Journal, 1983.
- Martínez L., Aguado A., Moral A., Irusta R. “Fluidized bed pyrolysis of HDPE: A study of the influence of operating variables and the main fluidynamic parameters on the composition and production of gases. Dpto. Ing. Química y Tecnología Medioambiental. Universidad de Valladolid. 2009.
- Mastral, F.J.; Esperanza, E.; García, P.; Juste, M. “Pyrolysis of high-density polyethylene in a fluidised bed reactor. Influence of the temperature and residence time.” Department of Chemical and Environmental Engineering, University of Zaragoza, Spain. 2001.
- Mukunda, H.S. et al. “Thermo-chemical conversión of biomass. A retrospective and a prospective.”
- Nguyen XT, Leung LS. A note on Hubble formation at an orifice in a fluidized bed. Chem Eng Sci, 1972.
- Oakes, W.G.; Richards, R.B. “The thermal degradation of ethylene polymers.” 1949.
- Parnell, C. B. Jr. Cyclone design for air pollution abatement associated with agricultural operations. In *Beltwide Cotton Production Conferences*. Nashville, Tenn. 1996.
- Rosin P, Rammler E, Intelmann W. Principles and limits of cyclone dust removal. Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure, 1932.

- Rowe PN, MacGillivray HJ, Cheesman DJ. Gas discharge from an orifice into a gas fluidized bed. Trans Inst Chem Eng. 1979.
- Serrano, D.P.; Aguado, J.; García, R.; Rojo, C.; van Grieken, R. "Thermal and catalytic cracking of polyethylene under mild conditions". Department of Experimental Sciences and Engineering, ESCET, Rey Juan Carlos University, Móstoles and Repsol S.A., Technology Center. Madrid, Spain.
- Seth E. Levine, Linda J. Broadbelt. "Detailed mechanistic modeling of high-density polyethylene pyrolysis: Low molecular weight product evolution." Department of Chemical and Biological Engineering, Northwestern University, United States. 2008.
- Sit SP, Grace JR. Hydrodynamics and mass transfer in the distributor zone of fluidized beds. Proc Second World Cong Chem Eng, Montreal, Canada, 1981.
- Sridhar K. Iya, Williamsville et al. "Heating method for silane pirólisis reactor."
- Stewart PSB., Davidson JF., "Slug flow in fluidized beds". 1967.
- Wang, Lingjuan. Theoretical study of cyclone design. 2004.
- Wen C.Y., "Optimization of coal gasification processes". West Virginia University. 1972.
- Westerhout, R.W.J.; Kuipers, J.A.M. and van Swaaij, W.P.M. Experimental Determination of the Yield of Pyrolysis Products of Polyethene and Polypropene. Influence of Reaction Conditions. Faculty of Chemical Engineering, University of Twente. The Netherlands.
- Westerhout R.W.J., Waanders J., Kuipers J.A., van Swaaij W.P.M. "Kinetics of the low-temperature pyrolysis of polyethylene, polypropylene and polystyrene modeling, experimental determination, and comparison with literatura models and data". Faculty of Chemical Engineering, University of Twente, The Netherlands, 1997.

- Zenz PA, Weil NA. A theoretical–empirical approach to the mechanism of particle entrainment from fluidized beds. AIChE Journal, 1958.