

Cálculos Justificativos

PLAVEGA

1.	Introducción.....	5
2.	Cálculos justificativos de la Planta de Valorización Energética de Granada.....	5
2.1.	Situación	5
2.2.	Rechazos generados por Ecocentral.....	7
2.3.	Capacidad de diseño y nominal.....	8
2.3.1.	Capacidad de diseño del área de preparación del CDR	10
2.3.2.	Capacidad de tratamiento del área de horno-caldera	11
2.3.3.	Esquema de proceso.....	12
2.4.	Playa de recepción (área de almacenamiento)	14
2.5.	Área de preparación de CDR.....	15
2.5.1.	Alimentación	15
2.5.2.	Triturador primario	17
2.5.3.	Separador balístico.....	20
2.5.4.	Separador overband	23
2.5.5.	Separador inductivo (Foucault).....	24
2.5.6.	Separadores ópticos	26
2.5.7.	Cabina de triaje.....	29
2.5.8.	Bunkers	30
2.5.9.	Prensa de subproductos.....	32
2.5.10.	Separador densimétrico.....	33
2.5.11.	Triturador Secundario	35
2.6.	Almacenamiento CDR.....	38
2.7.	Área Horno-Caldera.....	42
2.7.1.	Horno-caldera.....	43
2.7.2.	Turbogenerador	59
2.7.3.	Sistema agua-vapor.....	60
2.7.4.	Sistema de lavado de gases.....	62

Lista de figuras

Figura 1: Situación de Plavega	6
Figura 2: Esquema de proceso Plavega	13
Figura 3: Croquis funcionamiento separador den simétrico	21
Figura 4: Diseño separador balístico. Fuente Leblan.....	22
Figura 5: Overband. Fuente Felemang.	24
Figura 6: Separador Foucault. Fuente Felemang	25
Figura 7: Separador óptico. Fuente Titech	28
Figura 8: Separador Densimétrico. Fuente Nihot.....	35
Figura 9: Posición Silo CDR.	42
Figura 10: Modelo de silo de CDR. Fuente DSG.....	42

Lista de tablas

Tabla 1: Volumen de Material de Entrada a Plavega.....	7
Tabla 2: Composición Material de Entrada a PLAVEGA.	8
Tabla 3: Datos de partida de PLAVEGA.	9

Tabla 4: Base de diseño del área de preparación de CDR.....	10
Tabla 5: Bases de diseño del área de Horno-Caldera.....	12
Tabla 6: Base de diseño de la instalación general.....	12
Tabla 7: Base de diseño de Playa de recepción.....	14
Tabla 8: Base de diseño de tolva de recepción.....	16
Tabla 9: Base de diseño de Alimentador.....	17
Tabla 10: Datos de partida de Triturador Primario.....	18
Tabla 11: Base de diseño de Triturador Primario.....	20
Tabla 12: Base de diseño de Separador Balísticos.....	23
Tabla 13: Base de diseño de Overband.....	24
Tabla 13: Base de diseño de Foucault.....	25
Tabla 14: Base de diseño de Separador óptico 1.....	27
Tabla 15: Base de diseño de Separador óptico 2.....	28
Tabla 16: Capacidad de triaje por operador.....	29
Tabla 17: Base de diseño de la Cabina de triaje.....	30
Tabla 18: Base de diseño de Bunkers.....	32
Tabla 19: Base de diseño de la Prensa se Subproductos.....	33
Tabla 20: Base de diseño de Separador Densimétrico.....	34
Tabla 21: Datos de partida de triturador secundario.....	36
Tabla 22: Base de diseño de triturador secundario.....	38
Tabla 23: Máximo volumen acumulado de CDR.....	40
Tabla 24: Datos de diseño para el almacenamiento de CDR.....	41
Tabla 25: Bases de diseño del silo de CDR.....	41
Tabla 26: Propiedades del CDR Generado.....	43
Tabla 27: Análisis y propiedades de compuestos.....	44
Tabla 28: Parámetros básicos de análisis en combustibles.....	45
Tabla 29: Composición química de CDR. Fuente Diputación de Granada.....	47
Tabla 30: Composición química y reacciones de combustión del CDR.....	47
Tabla 31: Gramos de elemento por kilogramo de CDR.....	48
Tabla 32: PCS del CDR.....	48
Tabla 33: Comparativa tipologías de cálculo del PCI.....	50
Tabla 34: Gramos de elemento por kilogramo de CDR.....	51
Tabla 35: Moles equivalentes de O_2 en la reacción de combustión.....	52
Tabla 36: Moles estequiométricos de O_2 en la reacción de combustión de 1kg CDR.....	52
Tabla 37: Datos del aire en condiciones normales.....	53
Tabla 38: Productos de reacción en 1 kg de CDR.....	54
Tabla 39: Cálculo exceso de O_2 en la combustión.....	55
Tabla 40: H_2O en el aire de combustión.....	55
Tabla 41: Composición de los gases de combustión.....	56
Tabla 42: Propiedades de los gases de combustión.....	56
Tabla 43: Datos de partida diseño Horno.....	57
Tabla 44: Datos de partida diseño Caldera.....	58
Tabla 45: Análisis de los Gases de escape.....	58
Tabla 46: Datos del turbogenerador.....	60
Tabla 47: Datos básicos del Calderin.....	60
Tabla 48: Datos básicos del tanque flash.....	61

<i>Tabla 49: Datos básicos del desaireador.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 50: Datos básicos del precalentador.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 51: Datos básicos del sistema de aerocondensación.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 52: Propiedades de los gases de escape.....</i>	<i>62</i>

1. Introducción

El diseño de instalaciones industriales ha sido a lo largo de la historia de la revolución industrial basado en el concepto de factor de escala, de manera que por lo general a mayor capacidad de producción menores costes de producción por unidad producida y por tanto menor costes de adquisición para el cliente final. Con el fin de ofrecer productos y servicios que sean más vendibles que el de otros competidores.

Este concepto ha llevado a la industria en muchos casos a cometer el gran error de descuidar los costes de producción, soportados por la economía de escala.

La productividad y la eficiencia de un proceso, en los tiempos que vivimos, no está ligada a una economía de escala, sino a unos principios filosóficos de producción en la que se elimine todo aquello que no aporte valor al producto final.

Esta metodología conocida como Kaizen o Lean Manufacturing, es la base sobre la que se debe apoyar cualquier instalación en proyección y explotación que a día de hoy quiera ser competitiva, y bajo su filosofía se intenta optimizar el diseño y operación esta planta de valorización energética.

2. Cálculos justificativos de la Planta de Valorización Energética de Granada

2.1. Situación

La futura Planta de Valorización Energética de Granada (PLAVEGA), tal y como se describe en la memoria descriptiva estará localizada en la antigua nave de procesado de envases ligeros, emplazamiento que quedó inutilizado en 2012 tras la puesta en marcha de la nueva planta de clasificación “Ecocentral Granada”. El espacio disponible bajo techado es de unos 2.800 m² (40 x 70 m). La situación de la nave y su aprovechamiento es idónea, ya que dispone de una amplia superficie urbanizada, y se encuentra muy cerca de la planta de clasificación de la Ecocentral Granada. La nave en desuso tiene una zona de recepción de residuos en el margen Este de la misma que servirá de almacenamiento para algunos los materiales a alimentar.

Puesto que la mayoría del material de entrada a PLAVEGA provendrá de la Ecocentral, se optimizará el traslado del rechazo desde la Ecocentral hasta PLAVEGA a través de varias cintas transportadoras capotadas, evitando la tediosa tarea de trasladar los rechazos a través de camiones de transferencia (tal y como actualmente salen los rechazos de la Ecocentral con destino a vertedero). El sistema de cintas realizará un by-pass a los actuales equipos denominados “estación de transferencia” que se encargan de compactar el rechazo en contenedores cerrados de 30 m³, suprimiendo así los costes eléctricos y de mantenimiento de este sistema creando el primer punto de ahorro económico del proyecto. No en vano la estación de transferencia seguirá instalada y en condiciones de operar en cualquier momento para entrar en acción cuando por cualquier motivo sea necesario desviar el rechazo a vertedero.

Con la implantación de este nuevo sistema de cintas de conexión directa entre la Ecocentral y PLAVEGA, la nueva planta funcionará como continuidad de la anterior por lo que se mantendrá el mismo horario operativo respecto a tiempo de procesos y turnos de trabajo.



Figura 1: Situación de Plavega

2.2. Rechazos generados por Ecocentral

Los rechazos generados por la Ecocentral durante el 2014 se situaron aproximadamente en torno a las 91.000 toneladas. Dicho valor es un valor estimado ya que en realidad solo se contabiliza el número de camiones que cada día transportan rechazos hasta el vertedero. Estos camiones han sido pesados con frecuencia en varios periodos y cumplen una media aproximada de 12 toneladas netas por camión. Obteniendo la siguiente tabla para el año 2014.

Tabla 1: Volumen de Material de Entrada a Plavega.

Rechazo transferencia					
	Camiones	Peso medio (t)	total (t)	Días operativos	Media diaria (t)
Enero	600	12	7.200	20	360
Febrero	582	12	6.984	19	368
Marzo	656	12	7.872	21	375
Abril	669	12	8.028	20	401
Mayo	708	12	8.496	21	405
Junio	673	12	8.076	20	404
Julio	671	12	8.052	23	350
Agosto	564	12	6.768	20	338
Septiembre	612	12	7.344	22	334
Octubre	610	12	7.320	23	318
Noviembre	650	12	7.800	20	390
Diciembre	590	12	7.080	21	337
	7.585	12	91.020	250	365

Se observa los meses de mayo y junio como los de mayor generación de rechazos con una media diaria aproximada de 400 toneladas. Ésta será nuestra principal base de cálculo para el diseño del resto de la instalación.

La composición de los rechazos de la Ecocentral es un valor con una incertidumbre moderada, ha de tenerse en cuenta que los rechazos provienen de un proceso que no tiene un flujo composicional fijo (es residuo urbano) y por tanto el material de salida dependerá de muchos factores, temporalidad en productos de consumo, evolución de los materiales utilizados por el hombre a lo largo de los años, etcétera.

Ejemplos de ello son por ejemplo para el caso de temporalidad anual, las fechas de festividades y climatológicas. Se genera mucho más residuo plástico tras las vacaciones de navidad, se producen picos de envases (latas, vidrios, vasos de plástico) durante meses festivos como es el caso del mes de Mayo en Granada, se cambian las costumbres alimenticias de la población de invierno a verano consumiendo en este muchas más bebidas envasadas y frutas. Y para el caso de la evolución en el consumo de nuevas materias, a lo largo de los últimos 20 años se

han ido sustituyendo muchos materiales como por ejemplos los textiles (anteriormente de lana y algodón, sustituidos en gran porcentaje hoy en día por telas sintéticas), el consumo de papel bastante más presente en productos de usar y tirar (celulosas, servilletas, cajas de embalajes, etc).

Aun con todas las posibles variaciones, la instalación de clasificación de la Ecocentral, durante su proceso va separando las fracciones de interés como la fracción orgánica, los envases plásticos, los metales, dando como rechazo unos materiales que por su composición física, morfológica y química son, dentro de un amplio rango “bastantes similares” si se agrupan por familias.

Durante el periodo 2012-2013-2014 la diputación de Granada ha estado realizando estudios de caracterización de todos los flujos generados en la Ecocentral con el fin de conocer y mejorar los resultados de producción. Estos estudios hacen que se tenga una importante base de datos a partir de la cual se puede aproximar una composición estándar de generación de rechazos, con las consideraciones anteriormente expuestas.

Dicha composición se obtiene de aplicar la metodología estadística de la norma americana ASTM D5231-92 con un intervalo de confianza de entre el 90% a cada una de las fracciones seleccionadas.

Tabla 2: Composición Material de Entrada a PLAVEGA.

Composición rechazos Ecocentral	% promedio	intervalo confianza 90%	
Plásticos	20,1%	15,7%	22,4%
<i>Pet</i>	<i>1,3%</i>	<i>1,1%</i>	<i>1,5%</i>
<i>Pead</i>	<i>0,5%</i>	<i>0,4%</i>	<i>0,8%</i>
<i>PP</i>	<i>2,0%</i>	<i>1,8%</i>	<i>2,4%</i>
<i>Film</i>	<i>12,5%</i>	<i>10,3%</i>	<i>13,1%</i>
<i>Otros</i>	<i>3,9%</i>	<i>2,2%</i>	<i>4,7%</i>
Textiles	13,4%	12,8%	14,8%
Papel y cartón	18,8%	17,2%	19,6%
Brick	1,1%	1,0%	1,2%
Metales	1,2%	0,7%	1,5%
<i>Fe</i>	<i>0,9%</i>	<i>0,5%</i>	<i>1,1%</i>
<i>No-Fe</i>	<i>0,3%</i>	<i>0,2%</i>	<i>0,4%</i>
Vidrio	0,2%	0,1%	0,8%
Materia Orgánica	29,4%	26,6%	32,8%
Madera	3,0%	2,3%	3,8%
Otros	12,8%	6,0%	18,0%
Total	100%		

Se considerará por tanto la composición promedio estudiada como base de cálculo para el balance de materia y diseño de la instalación.

2.3. Capacidad de diseño y nominal

Dentro de PLAVEGA, podemos identificar las áreas de almacenamientos y 2 áreas operativas distintas, por un lado el área de producción de CDR, Combustible Derivado de Residuo (parte donde comienza la alimentación del rechazo de la Ecocentral y clasificación del material) y por otro el área de horno-caldera donde el material será incinerado y transformado en energía eléctrica. La primera parte operará en las mismas condiciones horarias que la Ecocentral, de la cual recibirá la materia prima de su proceso. En cambio la segunda parte ha de estar trabajando 24 horas al día durante todos los días del año a excepción de las fechas de parada programada. Por tanto el área de horno-caldera será la parte limitante de la producción y marcará el diseño del área de producción de CDR y su operativa durante la operación de la planta.

Aun siendo el horno-caldera un sistema menos flexible que el resto de la instalación (por su condición de operación en continuo) puede tener ciertos márgenes de operación oscilando entre el 75%-110% de su capacidad de diseño.

Previendo un volumen mínimo de material de entrada de unos 90.000 t/año, considerando la posibilidad de alimentar otros residuos de procedencia distinta a los rechazos de la Ecocentral (tales como material voluminoso) y el posible aumento anual en la producción de residuos por parte de la población (el aumento del nivel de vida suele llevar asociado un aumento de la producción de RSU en torno al 2-3% anual), se diseña una instalación de tratamiento de 405 t/días con previsión de operación de 250 días al año (días operativos de la Ecocentral).

$$\text{Capacidad de diseño de tratamiento} = 405 \text{ t/día} \times 250 \text{ días/año} = \mathbf{101.250 \text{ t/año}}$$

La capacidad nominal prevista será la equivalente a la producción de rechazos de la Ecocentral durante el 2014.

$$\text{Capacidad de nominal} = \mathbf{91.020 \text{ t/año}}$$

$$\text{Sobredimensionamiento} = \frac{101.250 \text{ t/año}_{\text{diseño}}}{91.020 \text{ t/año}_{\text{nominal}}} - 1 \approx \mathbf{11\%}$$

Tabla 3: Datos de partida de PLAVEGA.

Base de diseño de partida de PLAVEGA			
Residuos de entrada			
Rechazos generados Ecocentral en 2014	91.020	t/año	
Mínimos mensual	6.768	t/mes	Agosto
Máximo mensual	8.496	t/mes	Mayo
Media mensual	7.585	t/mes	
Días de operación	250	días/año	
Mínimo diario	318	t/día	
Máximo diario	405	t/día	
Media diaria	365	t/día	
Capacidad de diseño total anual	101.250	t/a	
sobredimensionamiento	11%		

2.3.1. Capacidad de diseño del área de preparación del CDR

Como se nombró anteriormente el área de preparación de CDR funcionará en línea con la producción de rechazos de la Ecocentral, cuya operativa es 2 turnos diarios de producción y un turno nocturno de mantenimiento. Cada turno será de 8 horas de las cuales se consideran 7 efectivas por lo que el número de horas productivas máximas cada día será de 14 h/día.

Considerando una alimentación de diseño de 405 t/día tendríamos:

$$\text{Capacidad de tratamiento área CDR} = \frac{405 \text{ t/día}}{14 \text{ h/día}} \approx 29 \text{ t/h}$$

La disponibilidad de planta se conoce como la relación entre el tiempo productivo y el tiempo total necesario de proceso. De este modo la planta de preparación de CDR necesitará una disponibilidad de:

$$\text{Tiempo productivo} = 14 \text{ h/día} \times 250 \text{ días/año} = 3.500 \text{ h/año}$$

$$\text{Tiempo necesario para capacidad nominal} = \frac{91.020 \text{ t/año}}{29 \text{ t/hora}} \approx 3.140 \text{ h/año}$$

$$\text{Disponibilidad necesaria} = \frac{3.140 \text{ h/año}}{3.500 \text{ h/año}} \times 100 \approx 90\%$$

Tabla 4: Base de diseño del área de preparación de CDR.

Capacidad de diseño	
Capacidad de diseño de área de Preparación de CDR	
Capacidad diaria máxima	405 t/día
Turnos operativos	2 turnos
Tiempo por turno	8 horas
Tiempo efectivo por turno	7,0 horas
Tiempo disponible total	14 horas/día
Capacidad de tratamiento base	29 t/hora
Operatividad y disponibilidad	
Disponibilidad planta producción CDR	
Días año	365 días/año
Sábados	52 días/año
Domingos	52 días/año
Festivos	11 días/año
Días efectivos de trabajo	250 días/año
horas efectivas de trabajo	3.500 horas/año
Capacidad de tratamiento diseño	101.250 t/año
Capacidad de tratamiento nominal	91.020 t/hora
Disponibilidad necesaria	90%

2.3.2. Capacidad de tratamiento del área de horno-caldera

A través de la etapa de preparación del CDR, se busca recuperar los materiales de valor económico que aún contenga el residuo así como la preparación de un combustible adecuado para su posterior valorización energética. Esta clasificación y afino de materiales lleva consigo un material de desecho al que llamaremos rechazos PLAVEGA.

La diferencia en tonelajes entre el material de entrada a PLAVEGA y el CDR producido para el horno es aproximadamente del 40% es decir de cada 100 toneladas que entran en el proceso de preparación del CDR se obtienen 60 de combustible y las otras 40 salen como rechazos de PLAVEGA y materiales reciclados. Puede verse en más detalle en el balance de masas del área de preparación de CDR.

Por tanto, según el balance de materia, para un caudal de diseño de entrada de 101.250 toneladas al año, se producirán aproximadamente en torno a 60.000 toneladas de CDR.

Considerando que el área de horno caldera funciona en continuo durante 337 días al año (2 paradas anuales de 14 días) tendremos una disponibilidad horaria tal que:

$$\text{Tiempo efectivo de trabajo} = 24 \frac{h}{\text{día}} \times 337 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 8.088 \frac{h}{\text{año}}$$

El caudal de diseño del área del horno-caldera será pues la cantidad de CDR producido en diseño entre las horas efectivas de trabajo.

$$\text{Capacidad de tratamiento área horno – caldera} = \frac{60.000 \frac{t}{\text{año}}}{8.088 \frac{h}{\text{año}}} \approx 7 \frac{t}{h}$$

La disponibilidad en esta área de producción es del 100% ya que es un sistema en continuo.

Tabla 5: Bases de diseño del área de Horno-Caldera

Capacidad de diseño			
Capacidad de diseño de área de Horno-caldera-turbina Operatividad y disponibilidad			
Días año	365	días/año	
Paradas técnicas	28	días/año	14+14
Días efectivos de trabajo	337	días/año	L-D
horas efectivas de trabajo	8.088	horas/año	
Capacidad de tratamiento anual (por balance)	59.128	t/año	60% de la entrada
Capacidad de tratamiento de diseño	7,3	t/hora	
Capacidad diaria media	175	t/día	
Turnos operativos	3	turnos	
Tiempo por turno	8	horas	
Tiempo efectivo por turno	8,0	horas	
Tiempo disponible total	24	horas/día	
Capacidad de tratamiento base	7,3	t/hora	
Disponibilidad	100%		

Resumiendo los 2 apartados anteriores, la planta de valorización energética de Granada estará diseñada para procesar:

Tabla 6: Base de diseño de la instalación general.

Base de diseño inicial de la instalación	t/hora	t/día	t/a
Capacidad del área de preparación CDR	29	405	101.250
Capacidad del área horno caldera	7,3	175	59.128

2.3.3. Esquema de proceso

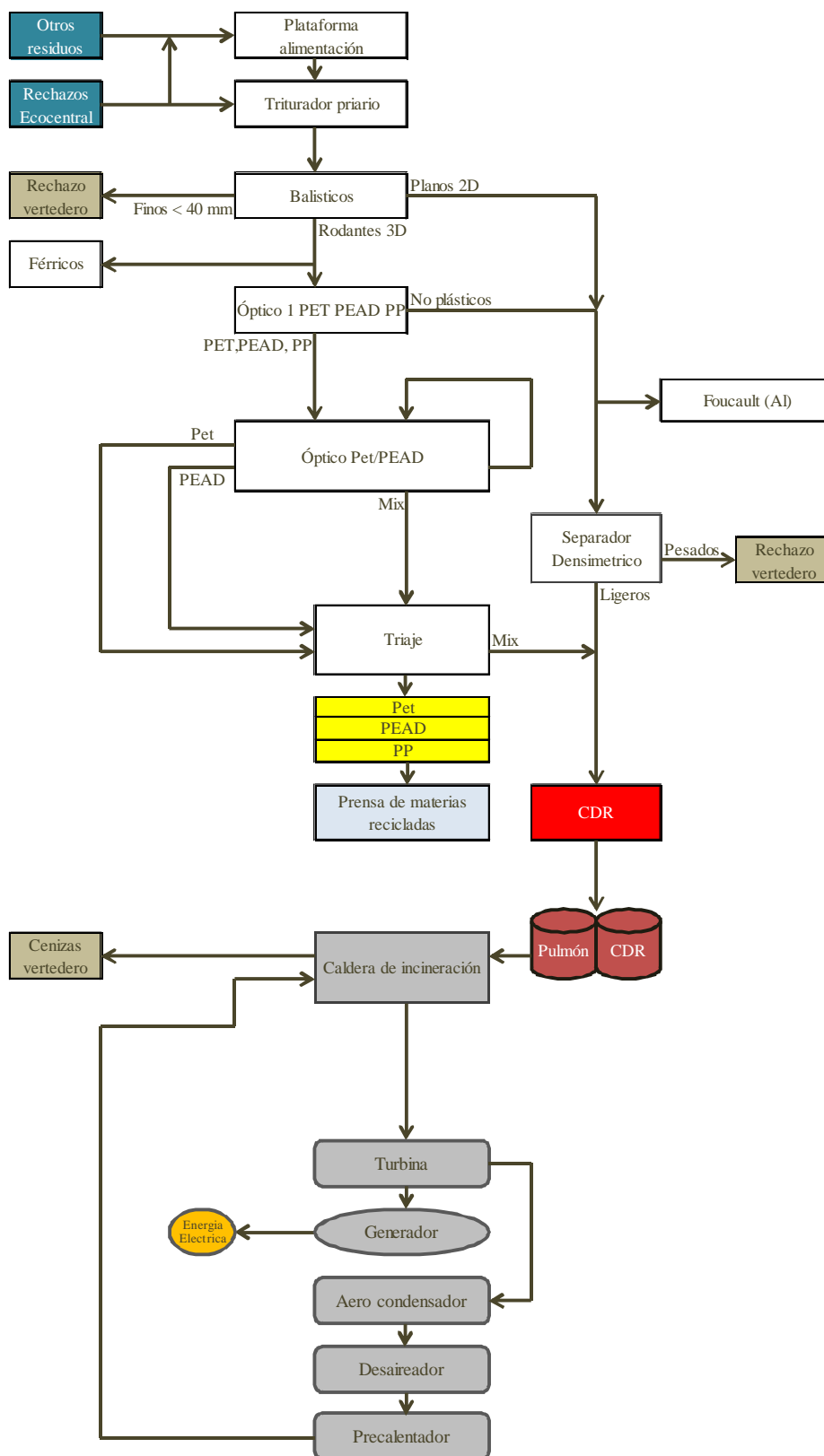


Figura 2: Esquema de proceso Plavega

2.4. Playa de recepción (área de almacenamiento)

En la actual nave en desuso, futura implantación de PLAVEGA, existe una playa de recepción donde se descargaba el residuo que se procesaba anteriormente. Dicha playa se encuentra bajo techado y su tamaño es aproximadamente de 40 x 20 metros lo que hace unos 800 m². Además, el acceso a ella se realiza por medio de una campa asfaltada de otros 20 x 40 m y que en caso necesario también podría utilizarse para aumentar la playa de recepción de capacidad.

Previsiblemente, la playa de recepción de residuos tendrá poca actividad ya que como se indicó, el material principal de entrada vendrá directamente desde la Ecocentral sin almacenamiento intermedio. No en vano se dispondrá de una capacidad de almacenamiento de residuos equivalente a 1 día de máxima producción de la Ecocentral (aprox 400 toneladas) con el fin de acumular residuos de otras procedencias y/o de las propia Ecocentral estando la planta de preparación de CDR parada por algún motivo.

Considerando una densidad aparente del residuo de entrada de 140 kg/m³ (ver balance de materia) se tendrá un volumen total a almacenar de:

$$\text{Volumen a almacenar} = \frac{400 \text{ t/día}}{0,140 \text{ t/m}^3} \approx \mathbf{2.900 \text{ m}^3}$$

Puesto que la superficie disponible bajo techado es de 40 x 20 = 800 m² y que se necesita un espacio minio para maniobrar con la pala tractora para alimentar el alimentador del proceso, estimado en unos 100 m² (12% de la superficie total disponible bajo techado), quedaría una superficie total disponible de:

$$\text{Superficie disponible} = 40 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times (1 - 0,12) = \mathbf{700 \text{ m}^2}$$

Con dicha superficie sería necesario una altura de apilamiento de:

$$\text{Altura de apilamiento} = 2.900 \text{ m}^3 / 700 \text{ m}^2 = \mathbf{4,1 \text{ m}}$$

En resumen:

Tabla 7: Base de diseño de Playa de recepción.

Base de diseño de playa de recepción		
Datos del residuo de entrada a playa		
Entrada máxima 1 día	405	t/día
Densidad media Residuo	0,140	t/m ³
Volumen total de almacenamiento	2.893	m ³
Largo nominal de playa actual	40	m
Ancho nominal de playa actual	20	m
Altura de apilamiento media		
Espacio aprovechable	88%	700 m ²
Altura de apilamiento	4,1	m

2.5. Área de preparación de CDR

El área de pretratamiento estará compuesta de los procesos mecánicos que tratan el residuo hasta dejarlo listo para su alimentación al horno.

2.5.1. Alimentación

La alimentación principal, como se ha comentado, será en continuo desde la Ecocentral, para ello se instalarán una serie de cintas transportadoras que descargaran en el primer equipo de proceso (el triturador primario), además se podrá alimentar el proceso desde la playa de recepción prevista, a través de una pala cargadora hacia un alimentador de placas dispuesto sobre la misma playa.

a. Cintas

- I. Cinta reversible habilitada tras la cinta número CT – 85E que actualmente se encuentra en la salida de proceso de la Ecocentral. Dicha cinta se nombrará como CT-PLV-001.
- II. Cintas CT-PLV-002, CT-PLV-003, CT-PLV-004 inclinadas y capotadas que transportará el material de la cinta CT-PLV-001 a la CT-PLV-005.
- III. Cinta CT-PLV-005 capotada que transportará el material de la cinta CT-PLV-004 a la CT-PLV-006.
- IV. Cinta CT-PLV-006 descubierta que transportará el material de la cinta CT-PLV-005 a la CT-PLV-007.
- V. Cinta CT-PLV-007 reversible descubierta que transportará el material de la cinta CT-PLV-006 a la CT-PLV-008.
- VI. Cinta CT-PLV-008 descubierta que transportará el material de la cinta CT-PLV-007 al triturador.

b. Alimentador

El sistema de alimentación desde la playa de recepción estará formado por una tolva de recepción y un alimentador de cadenas que descargará sobre el triturador primario.

La tolva de recepción estará en cota negativa respecto de la cota de la playa de recepción. Al ser un sistema cuyo único fin es canalizar el material para que el alimentador regule la alimentación, no necesita ser de un tamaño determinado. Tamaños grandes supondrán menor obra civil y tamaños menores supondrán mayor número de cargas con la pala tractora. Su geometría será de sección trapezoidal de manera que el fondo de la misma (por donde circula el alimentador de placas) tendrá un ancho igual a este (1,5 m), y el ancho superior será de un ancho mayor (3,2 m), la profundidad será de 1,5 m y el ángulo de talud formado será de 60°. Con estas medidas se consigue un volumen de:

Volumen de tolva \approx área de la sección trapezoidal \times longitud \approx

$$\frac{(base\ menor + base\ mayor) \times altura}{2} \times longitud \approx$$

$$\frac{(1,5\ m + 3,2\ m) \times 1,5\ m}{2} \times 4\ m \approx \mathbf{14\ m^3}$$

Tabla 8: Base de diseño de tolva de recepción.

Base de diseño de tolva			
Tolva			
longitud	4,0	m	
altura	1,5	m	
ancho inferior de tolva	1,5	m	mismo que alimentador
Angulo de talud	60	°	
Ancho superior de tolva	3,2		
Área de la sección trapezoidal	3,5		
volumen de tolva de recepción 14 m³			

El alimentador estará diseñado para mantener un caudal equivalente a la máxima capacidad horaria de diseño de la instalación (29 t/hora), sin embargo la mayoría de equipos de tratamiento de residuos se diseñan bajo caudales volumétricos, no másicos. Considerando una densidad de entrada de 140 kg/m³, el alimentador deberá ser capaz de procesar:

$$Capacidad\ volumétrica = \frac{capacidad\ másica}{densidad}$$

$$Capacidad\ volumétrica = \frac{29\ t/h}{0,140\ t/m^3} = \mathbf{207\ m^3/h}$$

Para procesar ese volumen será necesario establecer un ancho de banda a partir de valores estándares de velocidad del alimentador, normalmente variables en función del producto a alimentar (siendo 0,12 m/s un estándar general para RSU), y alturas de vena, que para este caso será suficiente una altura próxima a los 35 cm, con lo que pared lateral del alimentador será de unos 50 cm. La inclinación que toma el alimentador en este caso (40° de manera estándar) no es excesivamente significativa ya que el producto apilado tiene un ángulo de inclinación muy elevado (hasta 60°) por lo que permanecerá estático sin rodar hacia atrás.

$$Ancho\ del\ alimentador = \frac{capacidad\ volumétrica}{altura\ de\ vena \times velocidad\ nominal}$$

$$Ancho\ del\ alimentador = \frac{207\ m^3/h}{0,35\ m \times 0,12\ m/s \times 3.600\ s/h} = \mathbf{1,37\ m}$$

Bajo este resultado se estandariza a un ancho de alimentador de 1,5 m lo que su pone un sobredimensionamiento del 10% aproximadamente.

Tabla 9: Base de diseño de Alimentador.

Base de diseño de Alimentador		
Datos de entrada		
Cantidad de material prevista	29 t/h	
Procedencia	cinta de rechazos de Ecocentral y foso	
número de unidades de equipo	1	
Capacidad nominal	29 t/h	
densidad material	0,140 t/m ³	
Capacidad diseño volumétrico	207 m ³ /h	
Datos aproximados de diseño		
longitud	10,0 m	
inclinación	40°	
altura de vena aproximada	0,35 m	
Velocidad nominal	0,12 m/s	
Calculo ancho alimentador	1,367 m	
Sobredimensionamiento	1,5 m (10%)	
Datos finales de diseño		
Ancho efectivo	1,5 m	
Longitud	10 m	
Velocidad variable	0,12 m/s (nominal)	

2.5.2. Triturador primario

El triturador primario es un equipo monorrotor de giro lento (12-25 rpm) y una contracuchilla dentada, cuya función es conseguir una granulometría homogénea del material para mejorar su posterior separación.

Puesto que el flujo de material que le llegará será el caudal de diseño de entrada a planta, la capacidad del mismo debe ser suficiente para tratar toda la materia prevista, que es de un caudal de diseño de 29 t/h equivalente a unos 207 m³/h.

La granulometría de salida del mismo debe ser menor de 150 mm, por lo que sus dientes de corte serán de este tamaño de paso. Aunque el triturador estará diseñada para poder variar el tamaño de paso a través de su contracuchilla y si fuera necesario el cambio de sus dientes de corte.

Sabiendo las condiciones nominales de operación y el tamaño y geometría de su sistema de corte, podemos aproximar el cálculo del ancho necesario para poder procesar todo el material previsto.

Los datos básicos del triturador primario son los siguientes:

Tabla 10: Datos de partida de Triturador Primario

Datos de entrada residuos al Triturador Primario	
Cantidad de material prevista	29 t/h
Procedencia	Alimentador/cinta de alimentación
número de unidades de equipo	1
Capacidad nominal	29 t/h
densidad material	0,140 t/m ³
Capacidad diseño volumétrico	207 m ³ /h
Datos aproximados de diseño	
Tipo abrebolsas	Monorrotor
Geometría dientes	triangular
velocidad nominal	20 rpm
Radio del rotor	0,5 m
Datos de diseño de Diente	
alto	15 cm
ancho	15 cm
Área	113 cm ²
	0,011 m ²
espacio entre dientes	5 cm
línea de dientes en rotor	2
Eficiencia de arrastre	25%

La capacidad productiva por minuto debe ser:

$$Producción = \frac{207 \text{ m}^3/\text{h}}{60 \text{ min}/\text{h}} = 3,4 \text{ m}^3/\text{min}$$

A 20 rpm como velocidad de giro nominal, se necesitará una producción por revolución de:

$$Producción = \frac{3,4 \text{ m}^3/\text{min}}{20 \text{ rpm}} = 0,17 \text{ m}^3/\text{rev}$$

La velocidad tangencial que adquiera la superficie del cilindro que porta los dientes dependerá de la velocidad de giro y su radio:

$$Periodo = \frac{1}{20 \text{ rpm}} = 0,05 \text{ min} = 3 \text{ s}$$

$$velocidad \text{ tagencial} = \frac{2\pi \times \text{radio}}{\text{periodo}} = \frac{2\pi \times 0,5 \text{ m}}{0,05 \text{ min}} = 63 \text{ m}/\text{min} = 1,05 \text{ m}/\text{s}$$

Conociendo la velocidad tangencial que se adquiere en la superficie cilíndrica del rotor, la disposición geométrica de los dientes de corte, y la eficiencia de arrastre de cada diente, podemos calcular el número de dientes necesarios para conseguir la producción deseada de $207 \text{ m}^3/\text{h} = 3,4 \text{ m}^3/\text{min}$. Ha de tenerse en cuenta que generalmente estos trituradores tiene 2 hileras de dientes por cada revolución del rotor.

$$\text{Numero de dientes lineales} = \frac{\text{Producción total necesaria } m^3/\text{min}}{\text{capacidad volumetrica efectiva de 2 dientes } m^3/\text{min}}$$

Capacidad volumetrica efectiva de 2 dientes

$$= \text{Area de arrastre de diente } (m^2) \times \text{numero de dientes por revolución } (ud/rev) \\ \times \text{velocidad tangencial } (m/s) \times \text{periodo } (s) \times rpm \text{ rotor} \times \text{eficiencia de arrastre } \%$$

Capacidad volumetrica efectiva de 2 dientes

$$= 0,011(m^2) \times 2(ud/rev) \times 1,05(m/s) \times 3(s) \times 20 rpm \times 25 \% = 0,35 m^3/\text{min } ud$$

$$\text{Numero de dientes lineales} = \frac{3,4 m^3/\text{min}}{0,35 m^3/\text{min } ud} = 9,7 ud$$

Por lo que el número de dientes necesarios para lograr la producción debe ser de 9,7 aproximando a 10 unidades puesto que un diente no es fraccionable.

Para poder albergar 10 dientes de 15 cm de ancho y un espacio de 5 cm entre diente y diente, se necesita un ancho de trabajo de:

$$\text{Ancho efectivo de rotor} = 10 \text{ dientes} \times (15 + 5)cm = 200 cm = 2 m$$

Se estima necesario un ancho efectivo de 2 metros para lograr la producción deseada.

La potencia del triturador es un valor difícil de calcular ya que en ella interviene tanto la masa del sistema de corte (dientes, rotor) como la velocidad tangencial del mismo y la resistencia a la rotura de los materiales a procesar (que son de naturaleza muy diversa plástico, papel, maderas, vegetales, textiles. Por lo que se tomará un valor estimado al que muchos fabricantes denominan calculo “ojimétrico”, tomando como base una fuerza de 1,5 kN por cada diente de trabajo. Esos 1,5 kN son un valor medio aproximado para trituradores desgarradores donde no existe apenas fuerza de inercia (a diferencia de los molinos de martillo) con un diente medio de superficie de choque entre 100 – 200 cm² fabricado en acero.

Considerando este valor medio, su velocidad tangencial (la velocidad del diente), el número de dientes de trabajo (que es de 10 dientes x 2 hileras de dientes) y el coeficiente de rendimiento (debido al rendimiento del motor, perdidas por rozamiento, etc... estimado aproximadamente en un 72%), podemos estimar la potencia necesaria a instalar en el equipo.

$$\text{Potencia necesaria del motor} = \frac{\text{fuerza de diente} \times \text{velocidad tangencial} \times n^o \text{ dientes}}{0,72}$$

$$\text{Potencia necesaria del motor} = \frac{1,5 kN \times 1,05 m/s \times 20}{0,72} = 43,6 kW$$

Como es natural, se aplica un factor de seguridad de sobredimensionamiento, para este caso bastaría redondear a 50 kW reales lo que supone un 15% de sobredimensión.

Tabla 11: Base de diseño de Triturador Primario.

Base de diseño de triturador primario.		
Velocidad lineal		
Radio del rotor	0,50	m
periodo	0,05	min
	3,0	s
pi	3,14	
velocidad lineal máxima	62,83	m/min
	1,05	m/s
Calculo ancho del rotor		
capacidad volumétrica por par de dientes	0,02	m ³ /s
capacidad volumétrica por revolución	0,07	m ³ /rev
capacidad volumétrica por minuto	1,41	m ³ /min
eficiencia de arrastre	0,25	
capacidad volumétrica efectiva por minuto	0,35	m ³ /min
Numero de dientes necesarios	10	
ancho de rotor	200	cm
Potencia del motor		
Fuerza ejercida por diente	1.500	N
Velocidad tangencial	1,05	m/s
Número total de dientes	20,00	ud
Coefficiente de rendimiento	72%	
Potencia necesaria	43,6	kW
Sobredimensionamiento	15%	
Potencia real	50	kW
Datos finales de diseño		
Ancho efectivo	200	m
diámetro medio salida producto	15	cm
Producción máxima	207	m ³ /h
Potencia estimada	50	kW

2.5.3. Separador balístico

Para no redundar en la explicación ya expuesta en la memoria descriptiva, únicamente indicar que los separadores balísticos son equipos cuya principal función es separar materiales con forma esférica (botellas, latas, bricks) de materiales con forma plana (papel, film, textiles) por medio de un movimiento oscilatorio de palas en forma de escalera en la que el bote de materiales esféricos hace que caigan por gravedad escaleras abajo y la estabilidad de materiales planos hace que suban escaleras arriba. Además, las escaleras están perforadas con el fin de eliminar elementos finos a modo de tamiz.

El diseño de estos equipos se basa principalmente en el tiempo de residencia que los materiales están dentro de él, estrechamente vinculado con la velocidad y diámetro de giro en los peldaños que lo componen.

Puesto que la capacidad volumétrica debe ser en torno a $200 \text{ m}^3/\text{h}$. Se calculan las dimensiones y número de palas (peldaños) cesarías para albergar ese caudal. Generalmente los anchos de pala suelen estar en torno a 5 m de longitud x 0,5 metros de ancho, el giro generado por el cigüeñal en cada pala es pequeño (0,1 m diámetro) para aumentar el tiempo de residencia y con ello la capacidad de separar diferentes tipología de materiales, la velocidad (150-180 rpm) es rápida para generar efecto de rebotes en los materiales esféricos y favorecer el desplazamiento de los materiales planos. El volumen desplazado será el equivalente al volumen de material que hay sobre cada pala y desplazado en un giro de cigüeñal, multiplicado por el número de revoluciones que dé cada hora y la eficiencia de desplazamiento (estimada en 50%, que dependerá de la inclinación de las palas, del material...)

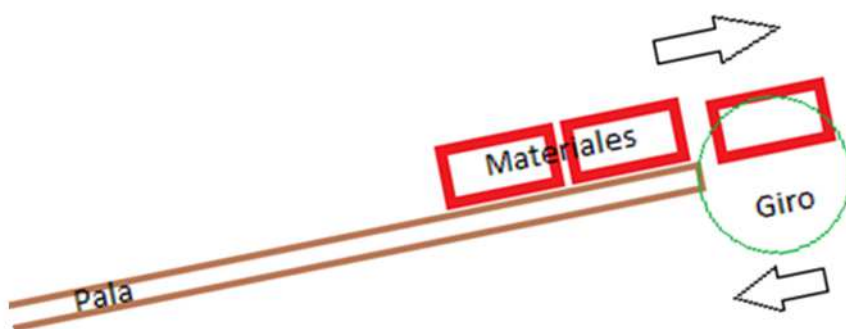


Figura 3: Croquis funcionamiento separador den simétrico

$\text{Volumen desplazado} = \text{ancho de pala} \times \text{diametro de giro} \times \text{altura de vena del material} \times \text{eficiencia}$

$\text{Volumen desplazado por revolucion de pala} = 0,5 \text{ m} \times 0,1 \text{ m} \times 0,1 \text{ m} \times 0,5 \approx 0.0025 \text{ m}^3/\text{rev}$

$\text{Vol. desplazado por minuto} = \text{volumen por revoucion} \times \text{rpm} = 0.0025 \frac{\text{m}^3}{\text{rev}} \times 150 \text{ rpm} = 0,38 \text{ m}^3/\text{min}$

$\text{Vol. desplazado por hora} = 0,38 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} = 22,5 \text{ m}^3/\text{h por pala}$

$n^\circ \text{ palas equivalentes necesarias} = \frac{\text{volumen a tratar}}{\text{volumen por pala}} = \frac{207 \text{ m}^3}{22,5 \text{ m}^3/\text{h pala}} = 9,2 \text{ palas}$

Puesto que el n° de palas efectivo deberá ser de 9,2 redondeamos a 10 como número de palas mínimas necesarias. Lo que nos dará un ancho de trabajo necesario de:

$\text{Ancho efectivo} = n^\circ \text{ de palas} \times \text{ancho de pala} = 10 \times 0,5 \text{ m} = 5 \text{ m}$

Otras características del separador balístico son su inclinación, que deberá ser variable entre 10 - 25°, un exceso o defecto de inclinación podría llevar a pérdidas de rendimientos en la separación deseada, por lo que al ser variable se podrá jugar con la posición más adecuada.

La potencia estimada para este equipo suele ser pequeña y manera estándar la mayoría de fabricantes la implantan entre 8-15 kW. El consumo principal es debido al motor que hace girar el cigüeñal que asume el 90% del consumo del equipo, otros componentes son ventiladores de ayuda, motor de inclinación...)

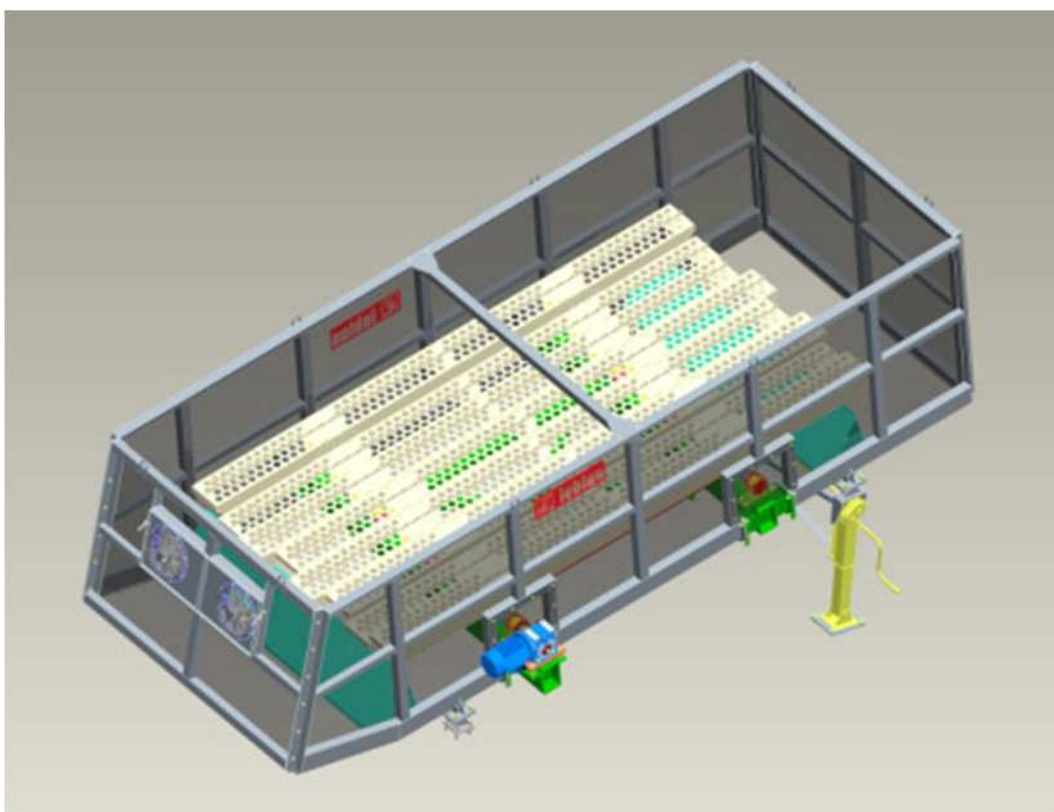


Figura 4: Diseño separador balístico. Fuente Leblan.

Tabla 12: Base de diseño de Separador Balísticos.

Base de diseño Balístico	
Separador balístico datos de entrada	
Cantidad de material prevista	29 t/h
Procedencia	Triturador primario
número de unidades de equipo	1
densidad material	0,140 t/m ³
Capacidad diseño volumétrico	207 m ³ /h
Datos aproximados de diseño	
Ancho pala	0,5 m
longitud pala	5,0 m
diámetro de giro	0,10 m
velocidad de giro	150,00 rpm
eficiencia de volumétrica	50% variable según inclinación y producto
inclinación	10-25° variable
mallado de paso	40,0 mm
geometría de paso	cuadrada
Salidas	3
Finos	<40 mm
Planos	fracción 2D (film, papel)
Rodantes	Fracción 3D (envases, metales...)
Calculo ancho necesario	
volumen desplazado por revolución	0,003 m ³ /rev pala
volumen desplazado por min	0,38 m ³ /min pala
volumen desplazado por hora	22,5 m ³ /h pala
nº palas equivalentes	9,2
nº palas reales	10,0
Ancho total efectivo	5,0 m
longitud aprox	7,5 m (5m palas + espacio caídas)
Potencia aproximada	12,0 kW

2.5.4. Separador overband

El separador overband no es más que un electroimán situado sobre una corriente dada para recuperar metales de condición férrea (acero). Las características importantes de estos equipos son por un lado el ancho útil de trabajo que debe ser ligeramente superior al ancho de banda de la cinta transportadora por la que circule el material a separar, y por otro la capacidad de atracción (penetración de campo magnético). Dependiendo del material del que esté fabricado el mismo la capacidad de atracción será mayor o menor. Para este caso bastará un overband de ferrita con un campo magnético de 400 Gauss a una distancia de 500 mm de la cinta inferior. La mayoría de estos equipos están estandarizados por lo que se expresan aquí las características necesarias del fabricante.

Existirá un overband electromagnético dispuesto sobre la línea de rodantes de balístico que tendrá unas dimensiones de imán de 1,2 x 1,4 metros, sobre una cinta de 1 m de ancho.

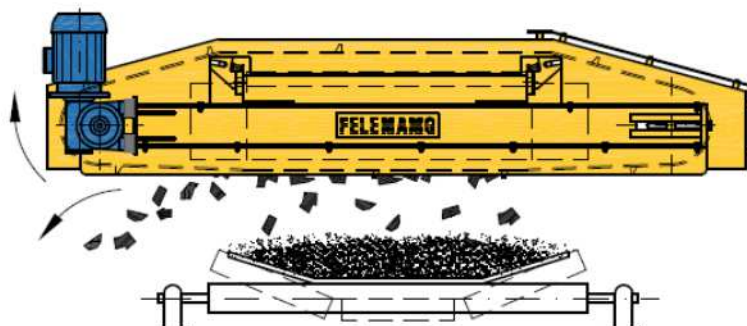


Figura 5: Overband. Fuente Felemang.

Tabla 13: Base de diseño de Overband.

Base de diseño de separadores de metales		
Overband		
	Procedencia	Rodantes de balístico
	número de unidades de equipo	1
Datos aproximados de diseño		
	Ancho imán	1,2 m
	Largo imán	1,4 m
	longitud total aproximada	3 m
	Potencia aproximada	13,0 kW

2.5.5. Separador inductivo (Foucault).

Sistema está formado por un separador de inducción y una banda impulsora que repele los metales de condición no férrea y los extrae de la corriente en cuestión. Un rotor, generalmente fabricado en imanes de Neodimio se hace girar a gran velocidad (hasta 3.000 rpm) dentro del tambor de la banda impulsora y con giro contrario a la misma, este giro crea un campo magnético negativo que hace repeler los metales de condición no férrea, principalmente aluminio, desviándolos de su trayectoria.

El equipo estará dispuesto en la línea previa a la alimentación al triturador secundario. Por lo que debe procesar todo el volumen de material que llegue a él. La eficiencia de un separador inductivo es mayor cuanto menor altura de vena tiene el material que está sobre él. Por lo que para asegurar una buena separación se prevé el modelo de mayor envergadura del mercado de 1,5 m de ancho efectivo.

Para calcular el ancho mínimo necesario basta conocer el caudal de material que nos llegará al equipo, la velocidad de cinta y la altura de vena deseada (cuanta más pequeña mejor).

$$\text{Ancho mínimo} = \frac{\text{volumen a tratar}}{\text{altura de vena} \times \text{velocidad cinta} \times \text{espacio ocupado en cinta}}$$

$$\text{Ancho mínimo} = \frac{0,05 \text{ m}^3/\text{s}}{0,05 \text{ m} \times 1,5 \text{ m/s} \times 70\%} = \mathbf{0,94 \text{ m}}$$

Tabla 13: Base de diseño de Foucault.

Foucault		
Procedencia	balístico	
número de unidades de equipo	1	
Capacidad nominal	24	t/h
densidad material	0,136	t/m³
Capacidad diseño volumétrico	178	m³/h
	0,05	m³/s
Potencia aproximada	13,0	kW
velocidad de cinta	1,5-2m/s	variable
Datos aproximados de diseño		
Altura de vena	0,05	m
velocidad de cinta	1,5	m/s
espacio ocupado en cinta	70%	
Ancho necesario	0,94	m
Ancho efectivo inducción	1,5	m
		60% sobredimensión

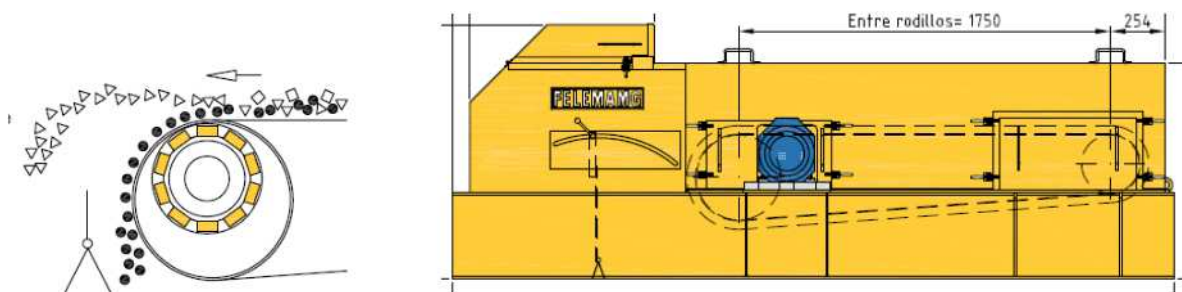


Figura 6: Separador Foucault. Fuente Felemang

2.5.6. Separadores ópticos

La tecnología de separación óptica ha sido descrita de manera general en la memoria descriptiva del proyecto. Su función principal en para este proyecto será clasificar de forma automática aquellos materiales que sean de interés económico. Esto dependerá de las condiciones del mercado en cada momento. Como objetivo principal clasificarán plásticos tipo Politereftalato de etileno (Pet), polietileno de alta densidad (Pead) y polipropileno (PP), los cuales, actualmente son los más numerosos y con mercados más estables.

El diseño del mismo se basa principalmente en conocer el ancho de trabajo adecuado, ya que cuanto mejor repartido y disgregado estén los materiales sobre su cinta, más efectiva será la clasificación. De forma general el equipo está compuesto por una cinta transportadora que va a una importante velocidad (2-3 m/s), llamada cinta de aceleración, con la finalidad de que los materiales que caigan sobre ella queden lo más separados posible unos de otros. Puesto que va a mayor velocidad que una cinta convencional el material que cae sobre ella tiende a moverse (girar, botar...) durante unos instantes por ello se dota a esta cinta de una longitud suficiente (5-6 m) para que el material tenga al menos un par de segundos para estabilizarse. Al final de la misma el sistema de detección óptica detecta el tipo de material y cuando éste sale de la cinta en caída formando un arco en el espacio, unos inyectores de aire dispuestos al final de la cinta, ejecutan un fuerte soplido que desvía el material del resto y lo lanza sobre una tolva de recepción previa a una cinta.

Puesto que la eficiencia aumenta cuanto mayor disgregación se tenga en la cinta de aceleración el calcularemos el ancho necesario de cada óptico con la siguiente formula:

$$\text{Ancho mínimo} = \frac{\text{volumen a tratar } m^3/s}{\text{altura de vena aparente } m \times \text{velocidad cinta } m/s \times \text{espacio ocupado en cinta } \%}$$

La clasificación de estos plásticos nombrados anteriormente se realizará por medio de 2 equipos de separación óptica:

- a. Equipo 1: separador óptico Pet-PEAD-PP vs resto de materiales:

Este equipo dividirá la corriente de entrada al mismo en 2, una corriente clasificada compuesta por una mezcla de los tres plásticos Pet-PEAD-PP y el resto de materiales que se consideran rechazo. El material de entrada al mismo será la corriente rodante de balístico a la que previamente se le ha separado el material férreo por medio del overband.

$$\text{Ancho mínimo} = \frac{0,019 \text{ } m^3/s}{0,05 \text{ m} \times 3 \text{ } m/s \times 10 \%} = 1,24 \text{ m}$$

Tabla 14: Base de diseño de Separador óptico 1.

1. SO 1: PET, PEAD, PP (datos de entrada)			
Cantidad de material prevista	9,7 t/h		
Procedencia	Rodantes de Balístico		
número de unidades de equipo	1		
Capacidad nominal	10,0 t/h		
densidad material	0,149 t/m ³		
Capacidad diseño volumétrico	67 m ³ /h		
	0,019 m ³ /s		
Datos aproximados de diseño			
Granulometría	80-150 mm		
Largo cinta aceleradora	6 m		
velocidad cinta aceleradora	3 m/s		variable
longitud total aprox	10 m		
Ancho efectivo mínimo	1,24 m		
altura de vena media	0,05 m		
espacio ocupado en cinta	10%		
Sobredimensionamiento	1,5 m/ancho		21%
Potencia aproximada	13 kW		

b. Equipo 2: Separador Pet vs Pead vs PP:

Este equipo dividirá la corriente de entrada al mismo en 3, puesto que la corriente de entrada es una fracción compuesta principalmente por plásticos (PET-PEAD-PP), las corrientes de salida serán, una corriente clasificada compuesta por Pet, una corriente clasificada compuesta por PEAD y el resto de materiales PP. Esta doble clasificación (de PET y PEAD) más el rechazo (en este caso mezcla de plásticos rica en PP) se consigue gracias realizar en un solo equipo a una recirculación del material, siendo equivalente a poner 2 sistemas ópticos en línea. Esto se realiza cuando los caudales son bajos (como es el caso), recortando así en inversión. A este tipo de separadores ópticos se les denomina de doble track.

Calculo del ancho del track 1 (donde llega la corriente PET-PEAD-PP).

$$\text{Ancho mínimo track 1} = \frac{0,007 \text{ m}^3/\text{s}}{0,05 \text{ m} \times 3 \text{ m/s} \times 10 \%} = 0,46 \text{ m}$$

Calculo del ancho del track 1 (donde llega la corriente PET-PEAD-PP).

$$\text{Ancho mínimo track 2} = \frac{0,005 \text{ m}^3/\text{s}}{0,05 \text{ m} \times 3 \text{ m/s} \times 10 \%} = 0,34 \text{ m}$$

Por lo que el ancho mínimo total del óptico sería **0,34+0,46 = 0,8 m**.

Tabla 15: Base de diseño de Separador óptico 2.

2. SO Pet/Pead (datos de entrada)			
Cantidad de material prevista	1,53 t/h		
Procedencia	SO.1		
número de unidades de equipo	1		
Tipo	doble track		
Datos aproximados de diseño			
Granulometría	80-150 mm		
Largo cinta aceleradora	6 m		
velocidad cinta aceleradora	3 m/s		variable
longitud aprox	10 m		
Track 1 Separación de PET			
Capacidad nominal	1,5 t/h		
Sobre dimensionamiento	2,0 t/h		31%
densidad material	0,081 t/m ³		
Capacidad diseño volumétrico	25 m ³ /h		
	0,007 m ³ /s		
Ancho efectivo	0,46 m		
altura de vena media	0,05 m		
espacio ocupado en cinta	10%		
Sobredimensionamiento	0,5 m/ancho		10%
Track 2 Separación de PEAD			
Capacidad nominal	1,2 t/h		
Sobre dimensionamiento	1,5 t/h		21%
densidad material	0,081 t/m ³		
Capacidad diseño volumétrico	18 m ³ /h		
	0,005 m ³ /s		
Ancho efectivo	0,34 m		
altura de vena media	0,05 m		
espacio ocupado en cinta	10%		
Sobredimensionamiento	0,5 m/ancho		46%
Datos finales de diseño			
Ancho efectivo	1 m		
Track1	0,5 m		
Track2	0,5 m		
Potencia estimada	13 kW		

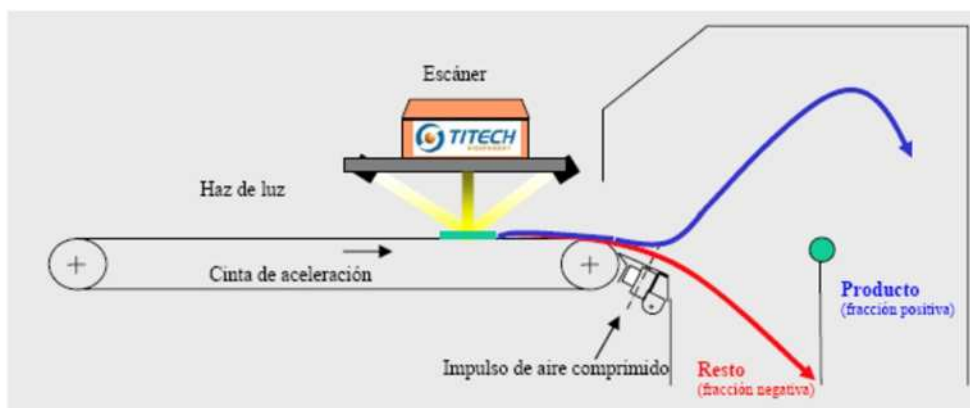


Figura 7: Separador óptico. Fuente Titech

2.5.7. Cabina de triaje

La cabina de triaje es el lugar donde llegan todas las corrientes separadas por los separadores ópticos. Puesto que los equipos ópticos tienen una eficiencia limitada, y los materiales separados aun siendo del mismo tipo de plástico, se presentan en diferentes formatos, lo que hace que en ocasiones sea necesaria una clasificación manual más selecta que le dé calidad a los productos que serán vendibles.

A la cabina llegarán 3 cintas, una transportará principalmente PET en un porcentaje mayor del 90% que terminará vertiendo su contenido en un bunker de almacenamiento, otra transportará principalmente PEAD en un porcentaje mayor del 90% que terminará vertiendo su contenido en otro bunker de almacenamiento, y una tercera transportará una corriente de plásticos mezclados (Mix) donde su principal componente será el PP y que terminará uniéndose a las corrientes que generarán el CDR.

La operativa general será por un lado, quitar elementos impropios en las cintas de PET y PEAD (se considera un propio aquel material que no sea PET ni PEAD) y posicionarlos en la tercera cinta de mezcla de plásticos (Mix), y por otro lado seleccionar manualmente los materiales de PP que contiene la cinta Mix, añadiéndolos a un bunker de almacenamiento. De esta manera, se realizaría un triaje en negativo (quitar impropios) en las cintas de PET y PEAD, y un triaje en positivo de PP en la cinta de Mix.

El número de operadores necesarios para el punto óptimo de operación depende de la capacidad de trabajo de un triador. Se expresan a continuación la capacidad de separación por persona y tipo de material (valores medios).

Tabla 16: Capacidad de triaje por operador.

Capacidad de triaje	
Triaje en negativo de plásticos varios	80,00 kg/operario*hora
Triaje en positivo de PP	150,00 kg/operario*hora

Conociendo la previsión de los materiales que llegarán a la cabina en cada cinta, se puede estimar el número de operadores necesarios en cada turno de trabajo.

$$\text{Numero de operadores} = \frac{\text{flujo de material a triar } \text{kg/h}}{\text{capacidad de triaje por operador } \text{kg/h}}$$

$$\text{Numero de operadores para Pet - PEAD} = \frac{(17 \text{ pet} + 15 \text{ pead}) \text{ kg/h}}{80 \text{ kg/h}} = 0,4 \text{ operadores Pet - Pead}$$

$$\text{Numero de operadores PP} = \frac{379 \text{ kg/h}}{150 \text{ kg/h}} = 2,53 \text{ operadores PP}$$

El número de operadores total estimado será de 2,9 aproximadamente, por lo que será necesario disponer de 3 operarios.

Tabla 17: Base de diseño de la Cabina de triaje.

Base de diseño cabina de triaje		
Datos de entrada		
Cantidad de material prevista	1,6	t/h
caudal cinta Pet	0,29	t/h
impropios en Pet	0,017	t/h
caudal cinta Pead	0,12	t/h
impropios en PEAD	0,015	t/h
caudal cinta Mix	1,11	t/h
PP presente	0,379	t/h
Procedencia	cascada ópticos	
número de líneas de triaje	1	
Datos aproximados de diseño		
Cintas previstas	ancho (m)	unidades
Pet	0,50	1
Pead	0,50	1
PP (Mix)	0,70	1
Capacidad de triaje		
Triaje en negativo de plásticos varios	80,00	kg/operario*hora
Triaje en positivo de PP	150,00	kg/operario*hora
Número de operadores	2,92	ud
Triajes en negativo en PET-PEAD	0,39	ud
Triaje en positivo de PP	2,53	ud
Datos finales de diseño		
Número de operadores por turno	3 operadores	
longitud aprox de cabina	5,0	m
descargas de productos a	Bunkers	

2.5.8. Bunkers

Los bunkers son los almacenamientos temporales sobre los que se acumula el material reciclado, normalmente se encuentra bajo las cabinas de triaje. Suelen ser de descarga automática mediante, un sensor de altura indica al operador que el bunker está lleno para que el operador active su descarga mediante su cinta inferior que hace de suelo del bunker, descargando al alimentador de prensa de subproductos.

Es importante diseñar un volumen de bunker adecuado para optimizar al máximo la operativa de planta.

El volumen de cada bunker debe ser al menos de la capacidad suficiente para albergar el material que conformará una bala estándar en la prensa de subproductos, es decir, puesto que la prensa de subproductos reduce mucho el volumen del material que se alimenta, lo ideal es que un bunker (que es el deposito del cual parten los materiales hacia la prensa) albergue al menos la cantidad mínima para que la prensa conforme una bala estándar de entre 1 y 1,5 metros de largo.

De otra manera, la operativa generará balas de tamaños diversos e interrupciones en la alimentación de cada material.

La densidad de cada material dentro de una mezcla es un valor difícil de calcular debido a que la presencia de diferentes materiales y equipos de tratamiento que pueden ir disgregando o compactando de material durante el tiempo que tarda en procesarse. Por ejemplo un contenedor de RSU estándar tiene una densidad de 250-300 kg/m³ conteniendo en torno a un 12-14% en peso en plásticos (lo que significaría que en 1 m³ habría unos 35 kg de plásticos), en cambio un contenedor de envases ligeros (contenedor amarillo) tiene una densidad de 25 kg/m³ con una composición en torno al 60-70% en plásticos (lo que serían unos 15 kg de plástico) de esta forma se puede comprobar como la densidad de los plásticos muy diferente dependiendo del material que lo acompañen, en 1 m³ de un contenedor de RSU hay unos 35 kg de plástico más el espacio para albergar 265-215 kg de otras materias, mientras en 1 m³ de contenedor amarillo hay 15 kg más el espacio para albergar 10 kg de otras materias.

Como datos generales aproximados se toman las siguientes densidades aparentes para los plásticos ya separados:

- Densidad de plásticos a granel: 30 kg/m³
- Densidad de plásticos en balas: 190 kg/m³

Con estas densidades y conociendo los flujos estimados de materiales que llegan a cada bunker según el balance, se puede diseñar el volumen necesario de los mismos.

$$\text{Volumen mínimo de Bunker} = \frac{\text{volumen de bala aprox m}^3 \times \text{densidad material prensado kg/m}^3}{\text{densidad material granel kg/m}^3}$$

$$\text{Volumen mínimo de Bunker} = \frac{1,2 \text{ m}^3 \times 190 \text{ kg/m}^3}{30 \text{ kg/m}^3} = 7,6 \text{ m}^3$$

Para formar una bala se necesitará al menos un bunker de 7,6 m³. Puesto que es un volumen bastante pequeño, se diseñará de tal forma que 1 bunker pueda albergar material para formar 2 balas, por lo que será como mínimo del doble.

$$\text{Volumen util de Bunker} = 7,6 \text{ m}^3 \times 2 \text{ ud} = 15,2 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen util de Bunker (sobredimensionado)} = 16 \text{ m}^3$$

Tabla 18: Base de diseño de Bunkers.

Base de diseño de bunkers		
Bunkers		
Cantidad de material prevista	0,70 t/h	
	23,37 m ³ /h	
Pet	0,28 t/h	
	9,18 m ³ /h	
Pead	0,11 t/h	
	3,68 m ³ /h	
PP	0,32 t/h	
	10,51 m ³ /h	
Procedencia	triaje	
número de unidades de equipo	3	
Datos aproximados de diseño		
densidad media plástico granel	0,03 t/m ³	
densidad de bala prensada	0,19 t/m ³	
volumen de bala aproximado	1,20 m ³	
volumen a granel para formar una bala	7,7 m ³	
nº balas por bunker	2,0 ud	
capacidad necesaria de bunker	15,4 m ³	
ancho	2,0 m	
alto	2,0 m	
largo	4,0 m	
Volumen de diseño de bunker	16 m³	

2.5.9. Prensa de subproductos

La prensa de subproductos tiene la finalidad de reducir el volumen de los materiales reciclados para su optimización a la hora de transportarlos.

Existen diferentes tipos de prensas para los productos que se reciclarán en PLAVEGA, en esta ocasión se considera más óptimo una prensa tipo horizontal de alimentación continua.

La capacidad de la misma debe ser capaz de embalar los volúmenes de reciclado que genere el área de pretratamiento, para poder embalar en el mismo tiempo de trabajo que el resto de la instalación.

Según se vio en el apartado anterior, la previsión de materiales reciclados suman un total de 0,7 t/h, lo que volumétricamente equivale a unos 23 m³/h.

La prensa a instalar deberá ser capaz de embalar ese volumen. Volumen que es relativamente pequeño para este tipo de maquinaria. Por lo que bastará escoger una gama baja de un fabricante de conocido. Las especificaciones de detallan en el cuadro.

La alimentación a la misma se realizará por medio de un alimentador que saldrá desde la línea de bunkers hasta la prensa.

Tabla 19: Base de diseño de la Prensa se Subproductos.

Base de diseño de prensa de subproductos			
Datos de entrada			
Cantidad de material prevista	0,7 t/h		
	23 m3/h		
Procedencia	bunkers		
número de unidades de equipo	1		
Capacidad nominal	0,7 t/h		
densidad material	0,030 t/m3		
Capacidad diseño volumétrico	23 m3/h		
Datos aproximados de diseño			
Dimensiones de bala aprox	0,8x0,8x..... mm		
Producción sobredimensionada	1,1 t/h		
	35,0 m3/h		50%
presión de trabajo	200,0 kg/cm2		
potencia aprox	18,0 kW		

2.5.10. Separador densimétrico

El separador densimétrico es un equipo con un sencillo sistema de clasificación. Los materiales pesados caerán a una cinta como rechazo de planta y los materiales ligeros serán impulsados por un flujo de aire que los enviará al triturador secundario, previo paso por una cinta de recogida.

El objetivo del equipo es eliminar aquellos elemento pesados (normalmente piedras, restos de obras, orgánicos grandes, vidrio, etc...) cuyo poder calorífico es poco o nulo y que además son elementos que pueden dañar el triturador secundario. Dando como fruto 2 corrientes una de pesados (con destino a vertedero) y otra de ligeros que formará el CDR después de ser triturado.

La principal característica de su diseño es el ancho de trabajo necesario para procesar la cantidad prevista de material que le llegará.

Para ello basta con conocer el volumen de material de entrada y las condiciones en las que se alimentará el material, tales como la velocidad de la cinta de alimentación, la altura de vena (espesor) del material en la cinta y el % de espacio ocupado por el material en la cinta. Estas condiciones pueden ser variables pero preferiblemente las siguientes:

- Velocidad de la cinta de alimentación: Su velocidad podrá ser variable, tomando como estándar 2 m/s (velocidad suficiente para conseguir altura de venas bastante bajas.
- Altura de vena del entorno de 0,1 m (10 cm) con anchos de película mayores podría bajar mucho la eficiencia de la separación
- Espacio ocupado en cinta: este factor depende de la granulometría y dispersión del material justo antes de alimentar al separador. Se tomará un

valor conservador del 25% con el objetivo de diseñar un equipo más flexible.

Con estos datos, se puede calcular el ancho de trabajo del separador densimétrico.

Primero se calculará el volumen de material de llegada al equipo, por medio de su flujo másico y la densidad del material de llegada, obtenida del balance de materia:

$$\text{Flujo Volumétrico} = \frac{\text{flujo másico}}{\text{densidad del material}}$$

$$\text{Flujo Volumétrico} = \frac{17 \text{ t/h}}{0,107 \text{ t/m}^3} = 158 \text{ m}^3/\text{h} = 0,044 \text{ m}^3/\text{s}$$

El ancho de trabajo podrá calcularse como:

$$\text{Ancho de trabajo} = \frac{\text{flujo volumetrico } \text{m}^3/\text{s}}{\text{Velocidad de cinta } \text{m}/\text{s} \times \text{altura de vena } \text{m} \times \text{espacio ocupado en cinta } \%}$$

$$\text{Ancho de trabajo} = \frac{0,044 \text{ m}^3/\text{s}}{2 \text{ m}/\text{s} \times 0,1 \text{ m} \times 25 \%} = 0,88 \text{ m}$$

Con un ancho efectivo necesario de 0,88 metros redondeamos sobredimensionando a 1 metro (14% más).

La potencia instalada del equipo se debe principalmente al consumo aportado por su ventilador de impulsión, que para anchos similares los fabricantes instalan potencias del orden de 15 kW.

Tabla 20: Base de diseño de Separador Densimétrico.

Base de diseño Separador Densimetrico	
Datos de entrada	
Cantidad de material prevista	17 t/h
Procedencia	cintas de planares y rodantes
número de unidades de equipo	1
Capacidad nominal	17 t/h
densidad material	0,107 t/m ³
Capacidad diseño volumétrico	158,00 m ³ /h
	0,044 m ³ /s
Datos aproximados de diseño	
Ancho efectivo (cálculo)	0,88 m
velocidad	2,00 m/s
altura de vena media	0,10 m
espacio ocupado en cinta	25%
Sobredimensionamiento	1 m/ancho (14%)
Largo	2,5 m
Potencia estimada ventilador de impulsión	15,0 kW



Figura 8: Separador Densimétrico. Fuente Nihot

2.5.11. Triturador Secundario

El triturador secundario finaliza el proceso de producción de CDR generando un material triturado de 25 mm de diámetro apto para su trasiego sencillo y alimentación al horno de forma mecánica o neumática.

Es un equipo monorrotor de giro rápido (200 rpm) y una parrilla perforada, cuya función es conseguir una granulometría homogénea del material por debajo de 25 mm.

El flujo de material que le llegará será el caudal de producido por el separador densimétrico más los plásticos mix no recuperables de la cabina de triaje, por ello, la capacidad del mismo debe ser suficiente para tratar toda la materia prevista, que es de un caudal de diseño de 17 t/h equivalente a unos 160 m³/h.

Sus principales parámetros de diseño son el ancho necesario de trabajo y la potencia instalada.

Sabiendo las condiciones nominales de operación y el tamaño y geometría de su sistema de corte, podemos aproximar el cálculo del ancho necesario para poder procesar todo el material previsto.

Los datos básicos del triturador primario son los siguientes:

Tabla 21: Datos de partida de triturador secundario.

Base de diseño de triturador secundario.		
Datos de entrada		
Cantidad de material prevista	17 t/h	
Procedencia	Varios	
número de unidades de equipo	1	
Capacidad nominal	17 t/h	
densidad material	0,107 t/m ³	
Capacidad diseño volumétrico	158 m ³ /h	
Datos aproximados de diseño		
Tipo granulador	Monorrotor	
Geometría dientes	triangular	
velocidad máxima	200 rpm	
Radio de rotor	0,4 m	
Datos de diseño de Diente		
alto	5 cm	
ancho	5 cm	
Área	13 cm ²	
	0,001 m ²	
espacio entre dientes	5 cm	
línea de dientes en rotor	2	
Parrilla intercambiable	25 mm estándar	

La capacidad productiva por minuto debe ser:

$$Producción = \frac{260 \text{ m}^3/\text{h}}{60 \text{ min}/\text{h}} = 2,6 \text{ m}^3/\text{min}$$

A 200 rpm como velocidad de giro nominal, se necesitará una producción por revolución de:

$$Producción = \frac{2,6 \text{ m}^3/\text{min}}{200 \text{ rpm}} = 0,013 \text{ m}^3/\text{rev}$$

La velocidad tangencial que adquiera la superficie del cilindro que porta los dientes dependerá de la velocidad de giro y su radio:

$$Periodo = \frac{1}{200 \text{ rpm}} = 0,005 \text{ min} = 0,3 \text{ s}$$

$$velocidad \text{ tagencial} = \frac{2\pi \times \text{radio}}{\text{periodo}} = \frac{2\pi \times 0,4 \text{ m}}{0,005 \text{ min}} = 502 \text{ m}/\text{min} = 8,37 \text{ m}/\text{s}$$

Conociendo la velocidad tangencial que se adquiere en la superficie cilíndrica del rotor, la disposición geométrica de los dientes de corte, y la eficiencia de arrastre de cada diente, podemos calcular el número de dientes necesarios para conseguir la producción deseada de $160 \text{ m}^3/\text{h} = 2,6 \text{ m}^3/\text{min}$.

$$\text{Capacidad volumetrica 1 diente} = \text{Area de arrastre de diente}(\text{m}^2) \times \text{velocidad tangencial}(\text{m}/\text{s})$$

$$\text{Capacidad volumetrica 1 diente} = 0,0011(m^2) \times 8,37(m/s) = \mathbf{0,0105 \, m^3/s}$$

$$\text{Capacidad volumetrica por par de dientes} = \text{capacidad de 1 diente} \times \text{numero de dientes porrevolución}$$

$$\text{Capacidad volumetrica por par de dientes} = 0,0105 \, m^3/s \times 2 = \mathbf{0,0209 \, m^3/s}$$

$$\text{Capacidad volumetrica por revolución (2 dientes)} = \text{Capacidad volumetrica por par de dientes} \times \text{periodo}$$

$$\text{Capacidad volumetrica por revolución (2 dientes)} = 0,0209 \, m^3/s \times \frac{1}{200 \, rpm \times 60 \, s/min} = \mathbf{0,006 \, m^3/rev}$$

$$\text{Capacidad volumetrica por minuto} = \text{Capacidad volumetrica por revolución} \times rpm \times \text{eficiencia de arrastre}$$

$$\text{Capacidad volumetrica por minuto} = 0,006 \, m^3/rev \times 200 \, rpm \times 10\% = \mathbf{0,13 \, m^3/min}$$

$$\text{Numero de dientes} = \frac{\text{Producción total necesaria } m^3/min}{\text{Capacidad volumetrica por minuto } m^3/min}$$

$$\text{Numero de dientes} = \frac{2,6 \, m^3/min}{0,13 \, m^3/min} = \mathbf{21 \, ud}$$

Por lo que el número de dientes necesarios para lograr la producción debe ser de 21.

Para poder albergar 21 dientes de 5 cm de ancho y un espacio de 5 cm entre diente y diente, se necesita un ancho de trabajo de:

$$\text{Ancho efectivo de rotor} = 21 \text{ dientes} \times (5 + 5)cm = \mathbf{210 \, cm = 2,1 \, m}$$

Se estima necesario un ancho efectivo de 2,1 metros para lograr la producción deseada.

La potencia del triturador es un valor difícil de calcular como se expresó en el triturador primario, ya que en ella interviene tanto la masa del sistema de corte (dientes, rotor) como la velocidad tangencial del mismo y la resistencia a la rotura de los materiales a procesar. En este caso se tomarán 250 N de fuerza por cada diente de trabajo. Esta fuerza depende del área de corte del diente en cuestión, este es un valor medio experimental del cálculo de los fabricantes de trituradores.

Considerando este valor de fuerza, su velocidad tangencial (la velocidad del diente), el número de dientes de trabajo (que es de 21 dientes x 2 hileras de dientes) y el coeficiente de rendimiento (debido al rendimiento del motor, pérdidas por rozamiento, etc... estimado aproximadamente en un 72%), podemos estimar la potencia necesaria a instalar en el equipo.

$$\text{Potencia necesaria del motor} = \frac{\text{fuerza de diente} \times \text{velocidad tangencial} \times n^{\circ} \text{ dientes}}{0,72}$$

$$Potencia\ necesaria\ del\ motor = \frac{250\ N \times 8,37\ m/s \times 42}{0,72} = 122\ kW$$

Como es natural, se aplica un factor de seguridad de sobredimensionamiento, para este caso bastaría redondear a 140 kW reales lo que supone un 15% de sobredimensión.

Tabla 22: Base de diseño de triturador secundario.

Base de diseño de triturador secundario.	
Datos aproximados de diseño	
Velocidad lineal	
Radio del rotor	0,4 m
periodo	0,005 min
	0,30 s
π	3,14
velocidad lineal máxima	502,4 m/min
	8,37 m/s
Calculo ancho del rotor	0,0105
capacidad volumétrica por par de dientes	0,0209 m ³ /s
capacidad volumétrica por revolución	0,006 m ³ /rev
capacidad volumétrica por minuto	1,26 m ³ /min
eficiencia de arrastre	0,1
	0,13 m ³ /min
Numero de dientes necesarios	21
ancho de rotor	210 cm
Potencia	
Fuerza ejercida por diente	250 N
Velocidad tangencial	8,37 m/s
Número total de dientes	42 ud
Coefficiente de rendimiento	72% rendimiento motor, rozamiento
Potencia estimada	121.914 W
	122 kW
sobredimensionamiento	15%
Potencia real	140 kW
Datos finales de diseño	
Ancho efectivo	210 m
diámetro medio salida producto	25 mm
Producción máxima	158 m ³ /h
Potencia estimada	140 kW

2.6. Almacenamiento CDR

Como se explica en la memoria descriptiva, el área preparación del CDR trabajará a un régimen de unas 3.750 horas al año, mientras el área de valorización energética lo hará a 8.100 horas al año. Puesto que el área de valorización energética trabaja en continuo 24 horas al día, se ha diseñado un área de preparación de CDR acorde a las necesidades másicas de la misma, de esta manera, la producción horaria de CDR será más rápida que el consumo en el horno. Por este motivo y además, por tener un stock de seguridad con el fin de disponer siempre de material

combustible para el horno, se estima necesario un almacenamiento pulmón que amortigüe las puntas de generación y almacenamiento de CDR.

El almacenamiento de CDR es un espacio de especial atención dentro de la instalación por diversos motivos. Por una parte es el lugar de almacenamiento de combustible el cual mantiene en operación el sistema de producción eléctrica, si por algún motivo llegase a quedarse vacío, el horno dejaría de alimentar combustible y tendría que entrar en acción la alimentación de combustible diesel con la consiguiente pérdida de rentabilidad de la instalación, por lo cual, debe de ser meticulosamente bien gestionada para sacar la máxima rentabilidad a la instalación. Por otra parte este almacenamiento contendría una carga de fuego muy elevada por lo que se deberán tener las máximas precauciones en materia contra incendios en la misma.

La tipología de almacenamiento, es de características especiales para este tipo de productos, formado por un silo de geometría prismática que carga y descarga de forma automática sin necesidad de pala cargadora ni de acceder a su interior.

Puesto que el área de preparación de CDR trabajará de lunes a sábados, siendo este último de un solo turno de trabajo (8 horas) y el área del horno trabajará 24 horas al día de lunes a domingo, existirá de forma semanal al menos unas 40 horas de distancia entre el último turno de la semana (en el área de producción de CDR) y el primero de la siguiente. (Desde las 15 horas aprox del sábado hasta las 7:00 aprox del Lunes).

Para estimar el volumen necesario de almacenamiento, estudiaremos el caso más desfavorable para el mismo, que coincidiría con las épocas de máxima producción de residuos, para este caso se toma como intervalo temporal el mes de mayo. Durante dicho mes la cantidad media de rechazos generados por la Ecocentral es de 400 t/día y por tanto la producción de CDR de PLAVEGA será unas 240 t/día (un 60%) considerando días de 14 horas efectivas de operación.

El área de horno caldera, como se ha comentado en la memoria descriptiva puede trabajar en un rango de entre el 75-110%. Para tomar una base de cálculo, estimaremos que durante el mes de mayo trabajará al 100% de su capacidad, lo que supone un consumo diario aproximado de 175 t/día.

Conociendo el régimen de producción del área de CDR (240 t/día) y el régimen de consumo de CDR del horno (175 t/día) durante el mes de máxima cantidad de residuos, podemos calcular las toneladas máximas acumuladas por el sistema, siendo ésta la capacidad necesaria del silo de almacenamiento de CDR.

En la siguiente tabla se presenta un balance de entradas y salidas obteniendo el máximo de material acumulado:

Tabla 23: Máximo volumen acumulado de CDR.

Días Mayo	alimentación a proceso t/día	procesado t/día	CDR generado t/día	Almacén CDR (t)	Alimentado a horno t/día	capacidad H-C %
l	203	203	118	118	0	0%
m	405	405	237	237	175	100%
x	405	405	237	298	175	100%
j	405	405	237	359	175	100%
v	405	405	237	420	175	100%
s	203	203	118	362	175	100%
d	0	0	0	187	175	100%
l	203	203	118	130	175	100%
m	405	405	237	191	175	100%
x	405	405	237	252	175	100%
j	405	405	237	313	175	100%
v	405	405	237	374	175	100%
s	203	203	118	317	175	100%
d	0	0	0	141	175	100%
l	203	203	118	84	175	100%
m	405	405	237	145	175	100%
x	405	405	237	206	175	100%
j	405	405	237	267	175	100%
v	405	405	237	328	175	100%
s	203	203	118	271	175	100%
d	0	0	0	96	175	100%
l	203	203	118	39	175	100%
m	405	405	237	100	175	100%
x	405	405	237	161	175	100%
j	405	405	237	222	175	100%
v	405	405	237	283	175	100%
s	203	203	118	226	175	100%
d	0	0	0	50	175	100%
l	203	203	118	0	168	96%
m	405	405	237	61	175	100%
total	8.708	8.708	169	420	5.081	

Máximo Acumulado

Por lo que el máximo acumulado se obtendría el día 5 (viernes de la primera semana) de mayo con un total de 420 toneladas acumuladas y un mínimo que se obtendría el último lunes de mayo en el que la capacidad de alimentación al horno caldera (H-C) habría que comenzar a bajarla al 96%.

Análogamente a este estudio se ha determinado el flujo de entradas y salidas del mes de Octubre, el de menos producción de residuos del año. Obteniendo un régimen de trabajo medio del horno caldera del 79%. La media anual correspondería a un régimen del 90%.

Son, por tanto, las 420 toneladas acumuladas la base de diseño de la capacidad de almacenamiento del CDR.

Éste almacenamiento es equivalente a una capacidad operativa equivalente a 2,4 días de alimentación al horno a máxima producción, es decir, el volumen acumulado tendrá la capacidad suficiente para poder alimentar a la área de valorización energética durante 2,4 días sin que el silo de CDR reciba aporte de material alguno.

El volumen de material máximo acumulado (420 t) dependerá de la densidad del material. Que para el caso del CDR triturado tiene un valor del entorno de 140 kg/m^3 .

$$\text{Volumen máximo de CDR} = \frac{\text{Capacidad másica acumulada } t}{\text{Densidad del CDR } \frac{t}{m^3}}$$

$$\text{Volumen máximo de CDR} = \frac{420 \text{ t}}{0,140 \frac{t}{m^3}} = 3.000 \text{ m}^3$$

Tabla 24: Datos de diseño para el almacenamiento de CDR

Datos de diseño Almacenamiento CDR	
Datos de entrada	
Producción aproximada anual	59.128 t/año
Producción máxima diaria	237 t/día
Producción máxima acumulada	420 t
Densidad media CDR aproximada	0,140 t/m ³
Volumen total de almacenamiento	2.998 m³
Stock de almacenamiento	2,4 días de alimentación a horno

Para éste almacenamiento se prevé entonces un volumen de 3.000 m^3 equivalente a 420 toneladas de CDR. Dicho volumen se albergaría en 1 silo de 3.600 m^3 específico para este tipo de materiales, muy usado en la industria cementera (capacidad ligeramente superior, asumible en precio).

El silo será de geometría prismática triangular con fondo plano y con un sinfín de arrastre para su descarga. Tendrán unas dimensiones de 12 m de ancho por 12 de alto y 25 de largo. El CDR será cargado mediante sistemas redlers (elevador de placas) y vaciados mediante un tornillo sinfín móvil que descargará sobre un redler de salida del silo. El silo se situará en la cara Oeste en el exterior de la nave de proceso.

Tabla 25: Bases de diseño del silo de CDR.

Base de diseño Silo CDR			
Diseño de almacenamiento de CDR			
Volumen del silo	3.600 m ³	20% sobredimensión	
Numero de silos	1		
Alto	12,0 m		
Ancho	12,0 m		
Largo	25 m		



Figura 9: Posición Silo CDR.

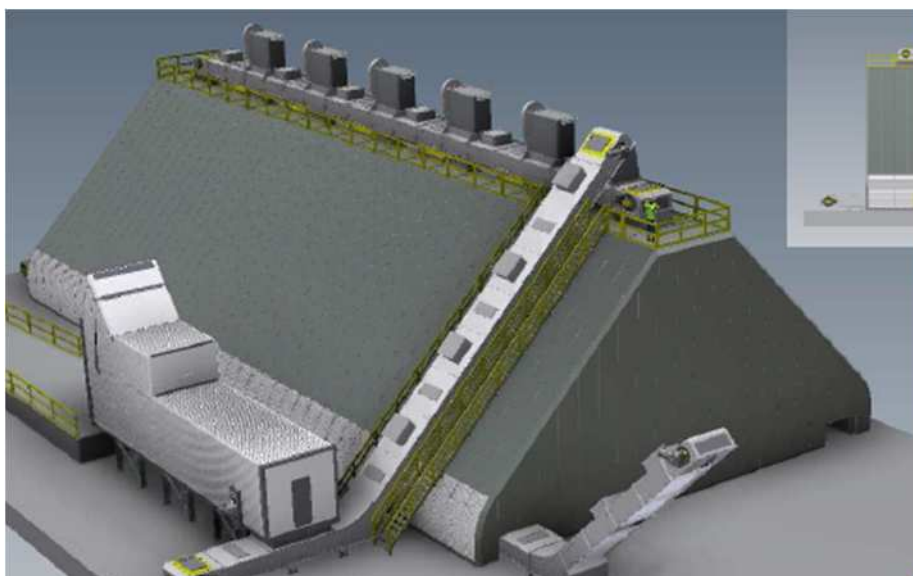


Figura 10: Modelo de silo de CDR. Fuente DSG

2.7. Área Horno-Caldera

Como se describe en la parte inicial de este documento, la operatividad del área de horno-caldera-turbina será de 8.088 horas/año a un régimen de 7,3 t/h como caudal nominal.

El área del horno-caldera-turbina, se compone de muchos elementos que deben ser calculados de manera precisa en una ingeniería de detalle. En esta memoria se expresan las bases de diseño de los equipos principales con el objetivo de que aquellos fabricantes a los que se solicite oferta del sistema, dispongan de una base de cálculo aproximada de la instalación. Igualmente, los cálculos aquí expresados proporcionan una idea muy aproximada de los rendimientos, capacidades y producciones que se obtendrían en una planta real de similares características.

2.7.1. Horno-caldera

En el diseño de un horno de incineración y su caldera de vapor se ha de tener como parámetro principal de cálculo la cantidad de energía (flujo energético) que debe ser capaz de absorber y transformar en vapor. Dicha cantidad de energía proviene en este caso del combustible CDR.

El balance de materia de la instalación nos da como resultado el siguiente cuadro relativo a las condiciones del CDR.

Tabla 26: Propiedades del CDR Generado.

CDR a Horno	% composición	t/a	t/h	t/a seco	% seco	Energía disponible Mcal	Energía perdida (Agua) Mcal	Energía útil Mcal	PCI útil kcal/kg	Cenizas t/a	Cenizas %
Plásticos	28,6%	16.910	2,1	13.940	31,0%	111.448.324	1.775.839	109.672.485	6.486	629	1,1%
Pet	0,5%	322	0,0	283	0,6%	1.609.247	23.099	1.586.148	4.928	2	0,0%
Pead	0,2%	113	0,0	106	0,2%	1.067.160	4.049	1.063.111	9.422	2	0,0%
PP	1,5%	866	0,1	796	1,8%	7.828.245	41.409	7.786.836	8.996	33	0,1%
Film	20,7%	12.242	1,5	9.794	21,8%	77.688.640	1.464.141	76.224.498	6.226	511	0,9%
Otros	5,7%	3.367	0,4	2.961	6,6%	23.255.032	243.141	23.011.892	6.834	81	0,1%
Textiles	22,2%	13.122	1,6	10.498	23,4%	45.575.861	1.569.381	44.006.480	3.354	632	1,1%
Papel y cartón	30,0%	17.733	2,2	13.902	30,9%	43.591.398	2.290.794	41.300.604	2.329	2.676	4,5%
Brick	1,9%	1.096	0,1	877	2,0%	2.749.838	131.111	2.618.727	2.389	169	0,3%
Metales	0,1%	49	0,0	47	0,1%	0	1.478	-1.478	-30	47	0,1%
Fe	0,0%	12	0,0	12	0,0%	0	368	-368	-30	12	0,0%
No-Fe	0,1%	37	0,0	35	0,1%	0	1.110	-1.110	-30	35	0,1%
Vidrio	0,0%	5	0,0	5	0,0%	0	155	-155	-30	5	0,0%
Materia Orgánica	13,6%	8.029	1,0	4.014	8,9%	12.587.452	2.400.649	10.186.803	1.269	773	1,3%
Madera	3,3%	1.958	0,2	1.468	3,3%	5.889.591	292.711	5.596.880	2.859	103	0,2%
Otros	0,4%	225	0,0	203	0,5%	0	13.480	-13.480	-60	39	0,1%
Total	100%	59.128	7,3	44.955	100%	221.842.465	8.475.598	213.366.868	3.609	5.073	9%

Dicho balance se complementa con los datos analíticos obtenidos en laboratorio:

Tabla 27: Análisis y propiedades de compuestos.

Propiedades	humedad %	Cenizas %	PCI kcal/kg
Plásticos			
<i>Pet</i>	12%	1%	5.681
<i>Pead</i>	6%	2%	10.061
<i>PP</i>	8%	4%	9.830
<i>Film</i>	20%	5%	7.933
<i>Otros</i>	12%	3%	7.854
Textiles	20%	6%	4.342
Papel y cartón	22%	19%	3.136
Brick	20%	19%	3.136
Metales			
<i>Fe</i>	5%	100%	0
<i>No-Fe</i>	5%	100%	0
Vidrio	5%	100%	0
Materia Orgánica	50%	19%	3.136
Madera	25%	7%	4.011
Otros	10%	19%	0

a. Cálculo de la composición del CDR:

La composición del CDR y con ello las masas de cada elemento, vienen condicionadas por los rendimientos en la separación del material durante el proceso de clasificación en el área de preparación del CDR.

Es importante a la hora de calcular la cantidad de energía disponible en el combustible, la cantidad de materia seca, es por ello que se expresa además la **composición y masas de cada material en base seca** obtenidos a partir del análisis experimental de la humedad de cada producto.

$$\text{Material seco} = \text{Masa húmeda } t - \text{Masa húmeda } t \times (\text{humedad del material } \%)$$

$$\text{Pet seco} = 322 \text{ t/a} - 322 \text{ t/a} \times (12 \%) = 283 \text{ t/a b.s}$$

b. Cálculo de la humedad del CDR

La humedad del CDR se calcula a partir de los datos experimentales de laboratorio para cada uno de los materiales en cuestión. La humedad total correspondería a la diferencia entre las masas totales húmedas y las masas totales secas.

$$\text{Hudemad del CDR} = \text{Masa húmeda} - \text{Masa seca}$$

$$\text{Hudemad del CDR} = 59.128 \text{ t} - 44.955 \text{ t} = 14.173 \text{ t de agua}$$

$$\text{Humedad del CDR} = 14.173 \text{ t} / 59.128 \text{ t} = 0,24 = \mathbf{24\%}$$

c. Cálculo las cenizas del CDR

Las cenizas del combustible son también un parámetro importante a la hora de diseñar los hornos y sistemas de filtración del aire. Al igual que el PCI y la Humedad, se obtienen a partir de los datos experimentales obtenidos de cada elemento por separado, de manera que en función de la composición del CDR, cada elemento aportará una cierta cantidad de ceniza.

d. Cálculo de la energía del CDR

La **energía disponible** por cada kilogramo de CDR se expresa como el poder calorífico inferior en kcal/kg o kJ/kg. Existen dos vías o métodos para obtener el poder calorífico de un combustible:

I. PCI del CDR por análisis calorífico del combustible y/o sus componentes.

Cuando se analiza un combustible experimentalmente en un laboratorio suelen identificarse al menos los siguientes parámetros:

Tabla 28: Parámetros básicos de análisis en combustibles.

Analíticas de combustibles	
Humedad (%)	
Cenizas (%)	
PCI kcal/kg	
Composición química %	
	C (carbono)
	H (hidrogeno)
	N (nitrógeno)
	S (azufre)
	Cl (cloro)

El PCI (así como la humedad y cenizas) puede obtenerse por análisis directo del mismo material, material que a día de hoy no se dispone, sin embargo si se dispone del análisis de cada uno de sus componentes (componentes tomados del propio RSU), el CDR no deja de ser un RSU con diferente grado de composición entre sus elementos. De esta manera y como se ha explicado con el contenido en humedad y cenizas, puede realizarse un cálculo energético en función de la composición del combustible. En la tabla 27 se muestran las propiedades de cada uno de los compuestos que forman el CDR.

Puesto que los poderes caloríficos analíticos siempre se expresan sobre el material seco, se debe calcular el “poder calorífico útil”, que es aquel que puede obtenerse del material húmedo. Se expone un ejemplo:

En 1 kg de PET con una humedad del 12% se tienen 0,12 kilogramos de agua y 0,88 kilogramos de PET. Por tanto la cantidad de energía disponible del material seco sería:

$$Energía\ disponible = 0,88\ kg \times 5.681\ kcal/kg = 4.999\ kcal$$

Esas 4.999 kcal son la energía que habría en 1 kg de pet húmedo, puesto que la humedad es 0,12 g, parte de energía se empleará en evaporar ese agua y por tanto no se utilizará en aportar energía al sistema del horno-caldera. La energía de vaporización del agua a una temperatura de estándar de 0 °C (tomándolo como valor conservador) es de 598 kcal/kg. De esta forma se puede calcular la energía necesaria para evaporar el agua presente en el ejemplo:

$$Energía\ empleada\ en\ vaporización\ del\ agua = 0,12\ kg \times 598\ kcal/kg = 71,76\ kcal$$

Por lo tanto la energía útil del combustible (PCI útil) será:

$$PCI\ útil = 4.999\ kcal - 71,76\ kcal = 4.927\ kcal/kg$$

De este modo se calculan cada uno de los elementos que componen el CDR y con ello el valor global de PCI útil por kg de combustible. Que para este caso es de **3.609 kcal/kg de CDR**.

II. PCI por composición química.

La composición química de un combustible en sus elementos básicos, principalmente C, H y S es la base teórica de la cantidad de energía que puede extraerse de él. En este proyecto no se dispone de una gran exactitud sobre la composición elemental del CDR, por un lado porque no se dispone del material en su estado final y por otro porque aunque se dispusiera del mismo, la heterogeneidad es tal que los niveles de certidumbre serían muy bajos.

Por aportar una comparativa más técnica e ingenieril, se analiza el PCI de un CDR dado a partir de un rango de datos sobre la composición química del mismo, reportados por la industria de la combustión y facilitados por la Diputación de Granada.

Tabla 29: Composición química de CDR. Fuente Diputación de Granada.

Composición química del combustible CDR			
Composición en peso			
Rango máximo - mínimo			
C	45%	40%	
H	8%	5%	
S	0,5%	0,2%	
O	30%	20%	
N	1,5%	1,0%	
Cl	0,8%	0,5%	
cenizas	15%	7%	
humedad	30%	20%	

A partir de estos datos se puede formar un valor medio de composición de los elementos principales que interviene en el cálculo del poder calorífico y sus reacciones exotérmicas.

Tabla 30: Composición química y reacciones de combustión del CDR.

Datos de combustible				
Composición de materia seca promedio		Peso molecular (g/mol)	Reacciones combustión	energía liberada (kJ/kg combustible)
Carbono. C	42,5%	12,0	$C + O_2 = CO_2 + 32.800 \text{ kJ/kg C}$	32.800
Hidrogeno. H	6,5%	2,0	$H_2 + 1/2 O_2 = H_2O + 142.000 \text{ kJ/kg H}$	142.000
Azufre. S	0,4%	32,0	$S + O_2 = SO_2 + 165.000 \text{ kJ/kg S}$	9.278
Oxígeno. O	25,0%	32,0		

Para poder obtener la energía contenida en un material con esa composición, puede tomarse una base de cálculo sencilla, por ejemplo 1 kilogramo de combustible.

De esta manera, en un kilogramo de CDR se tendrá:

Tabla 31: Gramos de elemento por kilogramo de CDR.

Gramos de elementos por kg de Combustible			
Carbono. C	425,0	g	42,5%
Hidrogeno. H	65,0	g	6,5%
Azufre. S	3,5	g	0,4%
Oxígeno. O	250,0	g	25,0%
Otros (no combustible)	256,5	g	25,6%
Total	1.000	g	100%

Para cada una de esas cantidades de masa, existirá una reacción de combustión diferente, por ejemplo para el C:

$$\text{Energía liberada en la combustión del C} = \text{masa de carbono(kg)} \times \text{energía liberada en reacción} (\text{kJ/kg})$$

$$\text{Energía liberada en la combustión del C} = 0,425 \text{ kg} \times 32.800 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 13.940 \text{ kJ} = 3.335 \text{ kcal}$$

De esta forma se obtiene el poder calorífico superior (PCS) del CDR, que es la energía máxima que liberan todos sus componentes combustibles:

Tabla 32: PCS del CDR.

Calculo de la energía teórica del combustible					
Energía teórica por kg de Combustible	Reacción	Masa kg	(kJ/kg) reacción	Energía liberada (kJ)	Energía liberada (kcal)
Carbono. C	$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$	0,425	32.800	13.940,0	3.335
Hidrogeno. H	$\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$	0,065	142.000	9.230,0	2.208
Azufre. S	$\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$	0,0035	9.278	32,5	8
Poder calorífico Superior teórico				23.202	5.551

La presencia de hidrógeno en los combustibles, genera la reacción de combustión del mismo, dando como subproducto agua (H_2O). Dicha agua generada no aporta energía a la reacción global, al contrario, dicho agua absorbe energía a la energía global puesto que termina unida a los gases de combustión en forma de vapor (no líquida). Es decir, en la combustión del hidrogeno, se produce energía y agua, y la formación de esa agua hace que parte de la energía liberada se utilice en la evaporación de la misma, por lo que supone un gasto energético significativo. La diferencia entre el PCS (energía teórica liberada) y la energía necesaria para evaporar el agua formada en la combustión del hidrógeno, es el PCI (poder calorífico inferior) que es la energía real disponible en el combustible).

Para este caso de estudio, por cada mol de H_2 se genera uno de H_2O por lo que en la reacción se formaran:

$$\text{Numero de moles de } H_2 (n) = \frac{\text{masa de } H_2 (g)}{\text{Peso molecular } (g/mol)} = \frac{65 g}{2 g/mol} = 32,5 \text{ mol}$$

$$\text{Numero de moles de } H_2O (n) = \text{Numero de moles de } H_2 = \mathbf{32,5 \text{ mol}}$$

$$\text{Masa } H_2O (g) = \text{Numero de moles de } H_2O (mol) \times \text{Peso molecular } H_2O (g/mol)$$

$$\text{Masa } H_2O (g) = 32,5 (mol) \times 18 (g/mol) = \mathbf{585 g \text{ de } H_2O}$$

El calor latente de condensación del agua es de 2.502 kJ/kg (598 kcal/kg), por tanto la energía que se gastará en evaporar el agua del caso de estudio será:

$$\text{Energía gastada en el agua de reacción} = \text{masa de agua (kg)} \times \text{calor latente del agua (kJ/kg)}$$

$$\text{Energía gastada en el agua de reacción} = 0,585 (kg) \times 2.502 \left(\frac{kJ}{kg} \right) = \mathbf{1.463 kJ = 350 kcal}$$

De esta forma obtenemos el PCI del CDR seco.

$$\text{PCI CDR seco} = \text{PCS (kJ)} - \text{Energía gastada en el agua de reacción (kJ)}$$

$$\text{PCI CDR seco} = 23.202 \text{ kJ} - 1.463 \text{ kJ} = \mathbf{21.739 kJ = 5.201 kcal}$$

Puesto que el combustible (CDR) no es un material seco, para poder obtener el PCI útil (o energía real que se puede transmitir a los gases de combustión) se debe considerar la cantidad de humedad contenida en el mismo.

Tal y como se ha calculado, a partir de sus reacciones químicas, el PCI de 1 kg de CDR seco tendría un valor de 21.739 kJ. Puesto que la humedad media del CDR según resultados analíticos está entre 20-30%, tomaremos un 24% de valor medio (mismo valor que el obtenido en el apartado a.). Esto significa que en 1 kg de CDR húmedo habrá 240 g de agua y 760 g de combustible. Como la energía contenida en 1 kg de CDR seco es de 21.739 kJ, la energía contenida en 760 g (masa de combustible en el CDR húmedo) será:

$$\text{Energía en CDR húmedo} = \text{masa de combustible (kg)} \times \text{PCI seco (kJ/kg)}$$

$$\text{Energía en CDR húmedo} = 0,760 \text{ (kg)} \times 21.739 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = \mathbf{16.522 \text{ kJ} = 3.952 \text{ kcal}}$$

Un kilogramo de CDR húmedo contendrá por tanto 760 gramos de combustible que liberarán 16.522 kJ de energía.

Parte de esa energía deberá emplearse en evaporar los 240 gramos de agua restantes que contiene el kilogramo de CDR. La energía empleada en evaporar esa humedad, al igual que anteriormente será de 2.502 kJ (calor latente del agua) por cada kg de agua presente:

$$\text{Energía gastada en evaporar la humedad del CDR} = 0,240 \text{ (kg)} \times 2.502 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = \mathbf{600 \text{ kJ} = 144 \text{ kcal}}$$

Por tanto el PCI útil (energía real que se puede transmitir a los gases de combustión) será la diferencia entre la energía contenida en el CDR húmedo y la gastada para evaporar la humedad presente:

$$\text{PCI útil} = \text{Energía en CDR húmedo kJ} - \text{Energía gastada en evaporar humedad kJ}$$

$$\text{PCI útil} = 16.522 \text{ kJ} - 600 \text{ kJ} = \mathbf{15.922 \text{ kJ} = 3.800 \text{ kcal}}$$

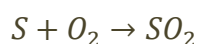
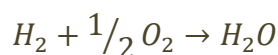
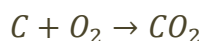
Si comparamos el cálculo del PCI por la metodología del apartado I. (PCI experimental a partir de análisis de PCI en laboratorio) y la usada en el apartado II. (PCI teórico a partir de las reacciones de combustión de sus elementos) se puede observar la cercanía de valores obtenidos no difiriendo más de un 6% uno respecto del otro:

Tabla 33: Comparativa tipologías de cálculo del PCI.

Comparativa de cálculo del PCI	
PCI calculo I.	3.609 kJ/kg
PCI calculo II.	3.811 kJ/kg
Variación	5,6%

e. Cálculo del aire de combustión

El aire necesario para la combustión de un material combustible dependerá de las reacciones comentadas anteriormente. A partir de ellas se puede estimar el volumen necesario de aire de inyección al horno.



Tomando, al igual que en anteriores apartados, como base de cálculo 1 kg de CDR, se obtiene una composición tal que así:

Tabla 34: Gramos de elemento por kilogramo de CDR.

Gramos de elementos por kg de Combustible		
Carbono. C	425,0	g
Hidrogeno. H	65,0	g
Azufre. S	3,5	g
Oxígeno. O	250,0	g
Otros (no combustible)	256,5	g
Total	1.000	g

Conociendo los gramos de cada elemento susceptible de entrar en reacción de combustión y con ello el número de moles de cada uno, se puede obtener el oxígeno necesario para dicha reacción:

$$\text{Numero de moles de C} = \frac{\text{masa de C}}{\text{Masa molecular}} = \frac{425 \text{ g}}{12 \text{ uma}} = 35,4 \text{ mol}$$

$$\text{Numero de moles de H}_2 = \frac{\text{masa de H}}{\text{Masa molecular}} = \frac{65 \text{ g}}{2 \text{ uma}} = 32,5 \text{ mol}$$

$$\text{Numero de moles de S} = \frac{\text{masa de S}}{\text{Masa molecular}} = \frac{3,5 \text{ g}}{32 \text{ uma}} = 0,1 \text{ mol}$$

$$\text{Numero de moles de O}_2 = \frac{\text{masa de O}}{\text{Masa molecular}} = \frac{250 \text{ g}}{32 \text{ uma}} = 7,8 \text{ mol}$$

Cada reacción estequiométrica tiene un número equivalente de moles de O_2 para la combustión de cada componente:

Tabla 35: Moles equivalentes de O_2 en la reacción de combustión.

Moles equivalentes de O_2 para reacción combustión		
Componente	Reacción	Moles equivalentes de O_2
Carbono. C	$C + O_2 = CO_2$	1
Hidrogeno. H	$H_2 + 1/2 O_2 = H_2O$	0,5
Azufre. S	$S + O_2 = SO_2$	1
Oxígeno. O	$O_2 = O_2$	-1

Por tanto para la reacción de 1kg de CDR se necesitarán los siguientes moles de O_2 :

Tabla 36: Moles estequiométricos de O_2 en la reacción de combustión de 1kg CDR.

Moles de O_2 para reacción combustión de 1kg de CDR		
Componente	Reacción	Moles equivalentes de O_2
Carbono. C	$35,4C + 35,4O_2 = 35,4CO_2$	35,4
Hidrogeno. H	$32,5H_2 + 16,2O_2 = 32H_2O$	16,2
Azufre. S	$0,1S + 0,1O_2 = 0,1SO_2$	0,1
Oxígeno. O	$7,8O_2 = 7,8O_2$	-7,8
Total	$51,8 - 7,8 O_2$	44

Las reacciones de combustión de los elementos de cada componente suman un total de 51,8 moles de O_2 necesarios para reaccionar, como el CDR tiene presente O_2 , éste sustituye parte del oxígeno necesario externo, obteniendo un balance global de O_2 externo de 44 moles estequiométricos.

El comburente natural de cualquier reacción de combustión es el aire atmosférico, para traducir los valores de necesarios de oxígeno para la combustión a unidades de masa y volumen tomamos los siguientes valores estándar del Aire:

Tabla 37: Datos del aire en condiciones normales.

Datos en condiciones normales del comburente				
Composición del comburente		Peso molecular (g/mol)	Densidad kg/m ³	
H ₂ O		18,0	0,8	
O ₂	21,0%	32,0	1,4	
N ₂	79,0%	28,0	1,3	
CO ₂		44,0	2,0	
SO ₂		64,0	2,9	

Exceso para combustión		H. relativa	Densidad kg/Nm ³	T ^a °C
Aire	50,0%	60%	1,3	25

Traducidos a valores de masa y volumen, el O₂ necesario para la combustión de 1 kg de CDR es de:

$$\text{Masa estequiométrica de O}_2 = n \text{ de O}_2 / \text{Masa molecular} = 44 \text{ mol} / 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 1.407 \text{ g/kg CDR}$$

$$\text{Volumen estequiométrico de O}_2 = \text{kg O}_2 / \text{densidad O}_2 = 1.407 \text{ kg} / 1.43 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0.98 \text{ m}^3 \text{ de O}_2 / \text{kg CDR}$$

$$\text{Volumen estequiométrico de Aire} = \text{m}^3 \text{O}_2 / 21\% = 0.98 / 21\% = 4.7 \text{ m}^3 \text{ de aire} / \text{kg CDR}$$

$$\text{Masa estequiométrica de Aire} = \text{m}^3 \text{ de aire} \times \text{densidad del aire} = 4.7 \times 1.3 = 6 \text{ kg de aire} / \text{kg CDR}$$

Dependiendo del tipo de tecnología y de proceso la cantidad de oxígeno inyectado en la combustión puede diferir enormemente, para este caso, la tecnología de incineración en horno tipo parrilla, es común alimentar al horno con un 50% de exceso sobre el oxígeno estequiométrico, por lo tanto los volúmenes de aire de combustión por cada kilogramo de CDR quedarían:

$$\text{Volumen total de O}_2 = \text{m}^3 \text{estequiométrico de O}_2 + (\text{m}^3 \text{estequiométrico de O}_2 \times 50\%)$$

$$\text{Volumen total de O}_2 = 0.98 \text{ m}^3 + (0.98 \text{ m}^3 \times 50\%) = 1.5 \text{ m}^3 \text{ de O}_2 / \text{kg CDR}$$

$$\text{Volumen total de Aire} = m^3 \text{estequiométrico de aire} + (m^3 \text{estequiométrico de aire} \times 50\%)$$

$$\text{Volumen total de Aire} = 4,7 \text{ m}^3 + (4,7 \text{ m}^3 \times 50\%) = 7 \text{ m}^3 \text{ de aire} / \text{kg CDR}$$

Para definir las bases de diseño de un horno y caldera, expresaremos el volumen del aire necesario para la combustión como un flujo volumétrico. Puesto que por cada kilogramo de CDR se necesitarán aproximadamente 7 m^3 de aire y el ritmo de alimentación del CDR será de 7.300 kg/h , se necesitará diseñar un horno con una capacidad inyección de aire de:

$$\text{Flujo de Aire a inyectar para la combustión} = 7 \text{ m}^3 / \text{kg} \times 7.300 \text{ kg/h} = 51.100 \text{ m}^3 \text{ de aire} / \text{h}$$

f. Cálculo de gases de combustión

Las reacciones de combustión del combustible CDR generará un gas de combustión que portará el calor necesario para la evaporación del agua de caldera y con ello el comienzo del ciclo energético de la planta de valorización energética.

Tal y como se definieron antes las reacciones de combustión para el cálculo del aire de combustión, por cada kilogramo de CDR se obtendrían los siguientes productos.

Tabla 38: Productos de reacción en 1 kg de CDR.

Productos de reacción para reacción combustión de 1kg de CDR		
Componente	Reacción	Productos
Carbono. C	$35,4\text{C} + 35,4\text{O}_2 = 35,4\text{CO}_2$	$35,4 \text{ mol CO}_2$
Hidrogeno. H	$32,5\text{H}_2 + 16,2\text{O}_2 = 32,5\text{H}_2\text{O}$	$32,5 \text{ mol H}_2\text{O}$
Azufre. S	$0,1\text{S} + 0,1\text{O}_2 = 0,1\text{SO}_2$	$0,1 \text{ mol SO}_2$

Los productos de reacción irán acompañados por el exceso de aire introducido (50%) y por la humedad presente en ese aire, por lo que a los productos anteriores debe de sumarse:

I. Oxígeno en exceso

Tabla 39: Cálculo exceso de O₂ en la combustión.

O ₂ introducido en el aire de combustión	Mol/ kg CDR
O ₂ estequiométrico	44,0
O ₂ en exceso	22,0 (50%)
total	65,9

II. Nitrógeno del Aire

La composición media del aire en O₂ y N₂ puede aproximarse a: en volumen 21% -79%, en peso 23,3% - 76,7%.

Conociendo que se introducen 65,9 moles de O₂, y por tanto (65,9 mol *32 g/mol = 1.110 g O₂), la cantidad de N₂ presente en los gases de combustión será:

$$N_2 \text{ en gases} = g \text{ de } O_2 \times 76,7\% / 23,7\% = 1.110 \times 76,7\% / 23,7\% = \mathbf{6.946 \text{ g } N_2 = 248 \text{ mol } N_2}$$

III. H₂O del Aire

Tabla 40: H₂O en el aire de combustión.

H ₂ O introducido en el aire de combustión como humedad	
humedad relativa	60%
T ^a	25 °C
gramos de H ₂ O por kg de aire seco	12 g
kg de aire por kg de CDR	9,1 kg
gramos de H ₂ O por kg de CDR	108,8 g
mol de H ₂ O por kg de CDR	6,0 mol

A partir de todos los moles presentes en los gases de combustión, las masas moleculares de cada producto y por aproximación, la ley de gases ideales, se puede estimar la composición aproximada de los gases de combustión:

Tabla 41: Composición de los gases de combustión.

Composición de los gases de combustión	g/kg CDR	p/p	Nm ³ /kg CDR	v/v
H ₂ O (de reacción)	585,0	5,9%	0,8	9%
H ₂ O (de aire húmedo)	108,8	1,1%	0,1	2%
(exceso sobrante) O ₂	703,4	7,1%	0,5	6%
N ₂	6.946,2	70,1%	6,1	72%
CO ₂	1.558,3	15,7%	0,9	10%
SO ₂	7,0	0,07%	0,0	0%
	9.908,8	100,0%	8,4	100%

A partir de los volúmenes de gases generados por kg de CDR combustionado y de la energía calórica aportada por el CDR, se puede definir el flujo y las condiciones del gas.

Tabla 42: Propiedades de los gases de combustión.

Propiedades de los gases de combustión		
Volumen de los gases de combustión	62.383	Nm ₃ de gases/h
	17,3	Nm ₃ de gases/s
Temperatura de Gases de combustión	850	°C
Energía de gases de combustión	1,77	MJ/Nm ₃

g. Datos básicos de diseño del horno-caldera

Para llevar a cabo una solicitud de oferta y/o comenzar el diseño profundo de un sistema de horno-caldera, los fabricantes necesitan unos datos básicos de diseño.

Para el caso del horno, por un lado se debe conocer el flujo másico del combustible y el PCI, a partir de lo cual se define la potencia térmica del horno y el flujo de aire necesario para la combustión (todo ello calculado anteriormente):

$$\text{Capacidad térmica del Horno} = 7,3 \frac{t}{h} \times 3.609 \frac{kcal}{kg} = 26.381 \frac{Mcal}{h} = 110.271 \frac{MJ}{h} = \mathbf{30,6 \text{ MWt}}$$

De esta forma se define la capacidad térmica del horno en 30,6 megavatios térmicos.

Los gases de combustión deben estar por encima de 850 °C para el caso de residuos no peligrosos (según RD 653/2003 de incineración de residuos).

Por tanto los datos básicos de diseño del horno se definen tal que así:

Tabla 43: Datos de partida diseño Horno.

Datos de partida diseño Horno	
Combustible CDR	7,3 t/h
PCI del CDR	3.608,6 kcal/kg
Capacidad térmica	26.380,7 Mcal/h 110.271,2 MJ/h 30,6 MWt
Aire de combustión estimado	51.372,4 Nm ³ /h
Temperatura de gases de combustión	850,0 °C

El diseño de una caldera de vapor dependerá del tipo de instalación y del rendimiento que se desee de la misma. Normalmente, para instalaciones de incineración de residuos con fines de producción eléctrica, suelen instalarse calderas de vapor sobrecalentado que superan los 60 bares de presión. Pero estas condiciones varían según fabricantes.

Para este proyecto se ha seleccionado una caldera que trabaje con vapor sobrecalentado a 400°C y 60 bar, lo que supone un vapor con una entalpía de 3.178,2 kJ/kg de vapor.

Sabiendo las necesidades energéticas de dicha caldera, es necesario dimensionarla (calcular el flujo de vapor que podemos producir en función de la cantidad de energía que aportemos al horno).

Puesto que la cantidad de energía que podemos aportar a la caldera es de aproximadamente 30,6 MWt (30.600 kJ/s), y conociendo el rendimiento térmico del sistema horno-caldera fijado por fabricantes en torno al 90-91%, se podría obtener el caudal de vapor vivo. Para ello, además del flujo de energía aportado a caldera y las condiciones de vapor a producir, se necesita saber las condiciones de agua de alimentación a la caldera. Para aumentar el rendimiento de la caldera suele precalentarse el agua de aporte a la misma, que para este caso se eleva a 160°C y a las condiciones de 60 bares de presión, supone una entalpía de 679 kJ/kg.

Caudal de vapor vivo

$$= \frac{\text{capacidad del horno}}{\text{entalpía del vapor vivo} - \text{entalpía agua de alimentación}} \times \text{rendimiento de caldera}$$

$$\text{Caudal de vapor vivo} = \frac{30.600 \text{ kJ/s}}{3.178 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 679 \text{ kJ/kg}} \times 91\% = \mathbf{11,15 \text{ kg/s}}$$

Por tanto los datos básicos de diseño de la caldera se definen tal que así:

Tabla 44: Datos de partida diseño Caldera.

Datos de partida diseño Caldera	
Condiciones del vapor producido	Vapor sobrecalentado
Temperatura	400,0 °C
Presión	60,0 bar
Entalpía	3.178,2 kJ/kg
Capacidad	11,2 kg/s

La energía radiante de los gases de combustión sobre la caldera y la energía contenida en el flujo del agua de reposición, conforman la energía total aportada al agua de la caldera, puesto que el rendimiento de la misma no es del 100%, existirá un flujo de energía que principalmente se perderá en forma de calor en los casos de escape de la misma, además del calor perdido en las escorias generadas y perdidas por aislamiento aunque estas últimas no se tomaran en consideración por ser relativamente bajas respecto a la de los gases de salida. Bajo estos principios, se estiman unos gases de salidas con las siguientes propiedades:

Tabla 45: Análisis de los Gases de escape.

Análisis de los Gases de escape	
flujos energéticos entrada salida	
Energía de entrada al horno	
Flujo de Energía del CDR	30.630,9 kJ/s
Flujo de Energía recirculada del precalentador	7.563,5 kJ/s
total	38.194,4 kJ/s
Flujo de Energía vapor de agua de caldera	35.448,4 kJ/s
Gases de escape	
Energía perdida en conjunto horno-caldera	2.746,0 kJ/s
pérdida de rendimiento en caldera	9,0%
Volumen de gases de emisión	62.382,7 Nm₃ de gases/h
Temperatura	190,0 °C
energía térmica perdida	2,7 MWt

Esta energía perdida térmica puede aprovecharse para diferentes procesos como secado, calefacción, evaporación de lixiviados, etc.

2.7.2. Turbogenerador

El turbogenerador está compuesto del conjunto turbina de vapor + generador eléctrico, en él se transforma la energía mecánica del vapor a presión en energía eléctrica.

Las moléculas de vapor sobrecalentado entran en la turbina a alta presión chocando con los álabes de la misma haciéndola girar a altas revoluciones. El paso del vapor a lo largo de la turbina conlleva la transferencia de energía dando como resultado un vapor a muy baja presión y temperatura y el movimiento de giro inducido al generador eléctrico.

Durante el paso del vapor a través de la turbina suelen realizarse diferentes extracciones del mismo para obtener energía para otros procesos anexos al sistema. En este proyecto se estiman necesarias únicamente 2 extracciones destinadas a los propios procesos del sistema de agua-vapor de la planta de valorización.

- a. Extracción 1: Destinada al aporte de energía del precalentador de agua de caldera.
- b. Extracción 2: Destinada al desgasificador para mantener las condiciones de todos los flujos que pasan por él.

Finalmente el resto del vapor no extraído en los pasos intermedios completa su paso por la turbina saliendo a baja presión de la misma destinándose a los equipos de condensación de vapor.

El rendimiento termomecánico del conjunto suele situarse en torno al 25%, es decir, de la cantidad total de energía que entra en la turbina, el 25% llega a transformarse en energía eléctrica, el resto son pérdidas debido a las extracciones, pérdida por el movimiento de componentes y mayoritariamente la pérdida energética en la en el vapor de salida a baja presión. Dicho rendimiento en realidad es bastante elevado ya que la mayoría de energía contenida en el vapor de salida corresponde al cambio de fase llevado a cabo en la caldera y sistemas de condensación de vapor (aerocondensadores). Por lo que sin contar con la energía contenida con el vapor debido al cambio de fase, el conjunto turbogenerador obtiene unos rendimientos del entorno del 90%.

Tabla 46: Datos del turbogenerador.

Turbogenerador		
Extracción 1 precalentador		
T ^a	178,76	°C
P	8	bar
h ^o	2.789,4	kJ/kg
Extracción 2 desaireador		
T ^a	127,41	°C
P	2,5	bar
h ^o	2.716,5	kJ/kg
Salida vapor		
T ^a	64,96	°C
P	0,25	bar
h ^o	2.367,8	kJ/kg
Rendimiento turbogenerador	90%	

2.7.3. Sistema agua-vapor

El sistema agua vapor está formado por una serie de equipos y canalizaciones con la finalidad de mantener en correcto funcionamiento los procesos de reposición, purgas y calidad del agua de caldera.

A continuación se detallan las condiciones de trabajo de algunos de los equipos del sistema agua-vapor de descritos en la memoria descriptiva.

a. Equipos

I. Calderín

Tabla 47: Datos básicos del Calderin.

Purgas calderín	1%
condiciones de purga	
T ^a	280 °C
P	60 bar
h ^o	1.236 kJ/kg

II. Tanque flash

Tabla 48: Datos básicos del tanque flash.

Tanque flash		
agua		65%
	T ^a	104 °C
	P	1,2 bar
	h ^o	439,3 kJ/kg
vapor		35%
	T ^a	104 °C
	P	1,2 bar
	h ^o	2.683,1 kJ/kg

III. Desaireador

Tabla 49: Datos básicos del desaireador.

Desaireador		
Perdidas		0,5%
	T ^a	104 °C
	P	1,2 bar
	h ^o	439,3 kJ/kg

IV. Precalentador

Tabla 50: Datos básicos del precalentador.

Precalentador		
Agua alimentación		
	T ^a	104 °C
	P	60 bar
	h ^o	444 kJ/kg
Agua a desaireador		
	T ^a	129 °C
	P	8 bar
	h ^o	542,38 kJ/kg
Agua alimentación a horno		
	T ^a	160 °C
	P	60 bar
	h ^o	678,12 kJ/kg

V. Aerocondensador

Tabla 51: Datos básicos del sistema de aerocondensación.

Aerocondensador		
Salida		
T ^a	64,96	°C
P	0,25	bar
h ^o	271,93	kJ/kg

2.7.4. Sistema de lavado de gases

En la memoria descriptiva del presente proyecto se describe un sistema de lavado de gases de la una instalación de estas características.

A priori, con los datos que se disponen actualmente no podría estimarse la cantidad de contaminantes que generaran los gases de combustión, tales como dioxinas, furanos, NO_x... ello dependerá del porcentaje de materiales que entren en la incineración, susceptibles de producir sustancias contaminantes.

La mayor o menor cantidad de estos materiales supondrá un mayor o menor consumo de reactivos en el proceso (Urea o amoníaco, carbón activo, sosa). Independientemente de ello si se ha estimado el volumen de gases que se generaran y por tanto la base de partida para el dimensionamiento de los diferentes sistemas de tratamiento, como filtro de mangas, scrubber.

El flujo de gases a tratar sería el siguiente:

Tabla 52: Propiedades de los gases de escape.

Propiedades de los gases de escape		
Volumen de los gases de combustión	62.383	Nm ₃ de gases/h
	17,3	Nm ₃ de gases/s
Temperatura de Gases de combustión	190	°C