



PreZero CAM WtE AAI

ANEXO 01. DIMENSIONADO Y CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS

P727.00.C.X.001.0

Registro de revisión del documento

Revisión no	Fecha	Detalles de las revisiones	Preparado por	Revisado por
0	04/09/2026	Primera emisión	EM/EB	FS

AVISO LEGAL

© 2026 Recuperación de Energía SAU. Todos los derechos reservados.

Este documento y los documentos que lo acompañan contienen información confidencial y están destinados únicamente al uso del PreZero. Si usted no es uno de los destinatarios previstos, cualquier divulgación, copia, distribución o acción tomada basándose en el contenido de la información está estrictamente prohibida.

Salvo acuerdo expreso, cualquier reproducción del material de este documento deberá solicitarse y autorizarse por escrito a Recuperación de Energía SAU. La reproducción autorizada de material debe incluir todos los avisos de derechos de autor y propiedad de la misma forma y manera que el original y no debe ser modificada de ninguna manera. El reconocimiento de la fuente del material también debe incluirse en todas las referencias.

1. DIMENSIONADO DE LA PLANTA DE PRETRATAMIENTO	7
1.1. Tipología de residuos a tratar	7
1.2. Capacidad de tratamiento.....	7
1.3. Foso de almacenamiento de residuos	8
1.3.1. Número de puertas de descarga.....	9
1.3.2. Puente grúa y pulpo	12
1.4. Almacén de balas (material recuperado)	14
2. DIMENSIONADO DE LA PLANTA DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA	15
2.1. Tipología de residuos a tratar	15
2.2. Capacidad de tratamiento.....	15
2.3. Foso de almacenamiento de residuos.	16
2.3.1. Con apilamiento	17
2.3.2. Número de puertas de descarga.....	19
2.3.3. Puente grúa y pulpo	22
2.4. Foso de almacenamiento de escorias.....	24
2.4.1. Puente grúa y cuchara bivalva.....	24
2.5. Depósito de residuos líquidos	25
2.6. Combustión.....	26
2.6.1. Cálculo del aire de combustión.....	27
2.6.2. Cálculo de los gases de combustión	27
2.6.3. Energía útil de la combustión.....	28
2.6.4. Energía introducida en el horno	28
2.6.5. Energía transferida a los gases	29
2.6.6. Entalpía de los gases en horno	29
2.6.7. Entalpía de los gases a salida de caldera	29
2.6.8. Calor cedido por los gases en caldera.....	30
2.6.9. Producción de vapor.....	30
2.6.10. Cálculo de la generación eléctrica.....	31
2.6.11. Eficiencia global del ciclo.....	31
2.6.12. Producción de energía eléctrica mediante instalación fotovoltaica.....	32
2.6.13. Resumen de los parámetros del proceso de valorización	32
2.7. Depuración de gases	34
2.7.1. Consumo de hidróxido cálcico	34
2.7.2. Consumo de bicarbonato sódico	35
2.7.3. Consumo de carbón activo.....	36
2.7.4. Consumo de sosa cáustica por aplicación de scrubber.....	37

2.7.5. Consumo de amoníaco para reducción NOx (SCR)	38
2.7.6. Cálculo de la producción de cenizas.....	39
2.7.7. Dimensionado de silos de reactivos y residuos	42
2.8. Altura teórica de la chimenea.	44
2.8.1. Bases de diseño	44
2.8.2. Cálculo nº 1. Contaminantes partículas sólidas	45
2.8.3. Cálculo nº2. Contaminantes SO2.....	46
2.8.4. Cálculo nº3. Contaminantes Nox.....	46
2.8.5. Comprobación del mínimo de impulso vertical convectivo (según punto 2 del anexo II de la Orden de 18.10.76).....	47
3. CONSUMO DE AGUA.	49
3.1. Planta de Valorización Energética.....	49
3.1.1. Agua para enfriamiento de gases.	49
3.1.2. Agua para tratamiento de gases en el scrubber.....	49
3.1.3. Agua para apagado de escorias.....	51
3.1.4. Agua para reposición de purgas de caldera.	51
3.1.5. Acondicionamiento de cenizas.....	52
3.1.6. Resumen consumos Planta de valorización energética.	52
3.2. Agua para limpieza y baldeo.....	53
3.3. Agua para riego.....	54
3.4. Agua sanitaria.....	54
3.5. Agua de pluviales de cubiertas.....	54
3.6. Agua de pluviales de viales.....	56
4. CONSUMO DE GASOIL	57
4.1. Quemadores auxiliares de la Planta de Valorización Energética.	57
4.1.1. Para mantenimiento de condiciones óptimas de combustión	57
4.1.2. Para arranques y paradas.....	57
4.2. Suministro de energía de emergencia.....	58
4.3. Margen de seguridad	58
4.4. Resumen anual de consumos de gasoil	59
5. DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE AGUAS.	60
5.1. Depósito de Agua Potable.....	61
5.2. Depósitos de Aguas de Servicios.....	61
5.3. Depósitos de Aguas Usadas de Proceso.....	62
5.4. Depósito de Agua Contra Incendios.....	63
5.5. Depósito de pluviales de cubierta	64

5.6. Depósito de pluviales de viales	65
5.7. Dimensionamiento de la fosa séptica.....	67

Índice de figuras

Figura 1. Sección del foso de la TMB (llenado al nivel de descarga).....	9
Figura 2. Simulación operativa para el cálculo de bahías en foso de TMB.....	11
Figura 3. Sección del foso de la PVE (llenado al nivel de descarga).....	17
Figura 4. Representación del aumento de volumen en foso con apilamiento	18
Figura 5. Simulación operativa para el cálculo de bahías en foso	21

Índice de tablas

Tabla 1. Datos generales de la planta de pretratamiento	7
Tabla 2. Datos generales de la PVE.....	16
Tabla 3. Aire de combustión (por línea).....	27
Tabla 4. Gases de combustión (por línea)	28
Tabla 5. Energía útil de la combustión	28
Tabla 6. Energía introducida en el horno (por línea).....	29
Tabla 7. Energía transferida a los gases de combustión (por línea)	29
Tabla 8. Entalpía de los gases en el horno	29
Tabla 9. Entalpía de los gases a salida de caldera	30
Tabla 10. Calor cedido por los gases en caldera (por línea)	30
Tabla 11. Caudal agua de purgas y agua de alimentación.....	31
Tabla 12. Generación eléctrica.....	31
Tabla 13. Eficiencia global del ciclo.....	32
Tabla 14. Resumen de los parámetros de la valorización energética de los residuos	33
Tabla 15. Concentración de componentes ácidos en los gases de combustión	34
Tabla 16. Cantidades de HCl, HF y SO ₂ a captar por el hidróxido cálcico (por línea)	35
Tabla 17. Consumo de hidróxido cálcico (por línea).....	35
Tabla 18. Consumo de bicarbonato sódico (por línea).....	36
Tabla 19. Consumo de carbón activo (por línea).....	37
Tabla 20. Concentración de componentes ácidos en los gases de combustión después del filtro de mangas	37

Tabla 21. Cantidades de HCl, HF y SO ₂ a captar por la sosa cáustica (por línea).....	38
Tabla 22. Consumo de sosa cáustica (por línea)	38
Tabla 23. Consumo de amoníaco (por línea).....	39
Tabla 24. Producción de cenizas de caldera (por línea)	39
Tabla 25. Producción de cenizas volantes (por línea)	39
Tabla 26. Hidróxido cálcico no reaccionado (por línea)	40
Tabla 27. Bicarbonato sódico no reaccionado (por línea)	40
Tabla 28. Hidróxido de sodio no reaccionado (por línea)	41
Tabla 29. Producción total de cenizas.....	42
Tabla 30. Consumo de agua para enfriamiento de los gases de combustión.	49
Tabla 31. Consumo de agua para el tratamiento de gases en el scrubber.....	50
Tabla 32. Consumo de agua para el apagado de escorias.	51
Tabla 33. Consumo de agua para la reposición de purgas de caldera.	52
Tabla 34. Consumo de agua para el acondicionamiento de cenizas.....	52
Tabla 35. Consumo total de agua de la Planta de Valorización Energética.	53
Tabla 36. Resumen de los distintos consumos en agua para limpieza y baldeo	53
Tabla 37. P24 a partir de series	55
Tabla 38. Consumo anual estimado de gasoil	59
Tabla 39. Resultados del cálculo de dimensionado para depósito de cubiertas	65
Tabla 40. Volúmenes pésimos considerando períodos de parada para el depósito de cubiertas....	65
Tabla 41. Resultados del cálculo de dimensionado para depósito de viales	66

1. DIMENSIONADO DE LA PLANTA DE PRETRATAMIENTO

1.1. Tipología de residuos a tratar

La instalación de pretratamiento tratará fundamentalmente residuos industriales y comerciales asimilables a urbanos (RAU), fracción de residuos con baja fracción orgánica e inertes, y estando compuesta mayoritariamente por plásticos y papel-cartón.

Adicionalmente, en función de su composición, la planta podrá tratar rechazos procedentes de plantas de tratamiento de residuos municipales, que, pese a haber sido previamente clasificados, aún contienen materiales susceptibles de recuperación y una fracción combustible adecuada para su valorización energética posterior.

1.2. Capacidad de tratamiento

La capacidad de diseño de la planta de clasificación se establece en función del caudal volumétrico de entrada y de la densidad media del residuo, adoptándose para los cálculos una densidad de referencia de 0,35 t/m³, representativa del tipo de rechazo a tratar. En base a este criterio, la capacidad nominal de tratamiento de la instalación se ha fijado en 160.500 t/año, considerándose este valor como base para el dimensionamiento de los equipos y para el desarrollo de los cálculos incluidos en el presente anejo.

Aunque la instalación dispone de flexibilidad operativa para adaptarse a variaciones en la composición y densidad del residuo de entrada, todos los cálculos se han realizado considerando la capacidad nominal de diseño, por tratarse de la situación de referencia más representativa del régimen habitual de funcionamiento.

En base a lo descrito previamente, a continuación, se resumen los principales datos de diseño de la planta de pretratamiento y clasificación:

Parámetro	Valor
Residuos que tratar (capacidad nominal)	160.500 t/año
Capacidad de recuperación de material reciclable	11.000 t/año
Densidad de diseño del residuo	0,35 t/m ³
Régimen de funcionamiento	2 turnos de operación + 1 turno de mantenimiento (3.500 h/año)
Líneas de tratamiento	2

Tabla 1. Datos generales de la planta de pretratamiento

1.3. Foso de almacenamiento de residuos

El volumen del foso se dimensiona de modo que se puedan almacenar 2 días (al nivel hidráulico) de la capacidad de diseño de la planta con dos líneas de pretratamiento

- La capacidad de la planta con 2 líneas de pretratamiento es:
 - Capacidad horaria diseño 42,7 t/h
- Las densidades medias consideradas para el dimensionamiento del foso son:
 - Densidad promedio 0,35 t/m³
- La anchura del foso debe ser como mínimo el doble del diámetro de la cuchara empleada en el manejo de los residuos, más unos metros de margen.
- La profundidad se establece en 9,6 metros, teniendo en cuenta la capacidad de tratamiento, operabilidad anual, días de almacenamiento, densidad del residuo y dimensiones del foso.

Con esto se tiene que se debe tener un volumen mínimo de almacenamiento de:

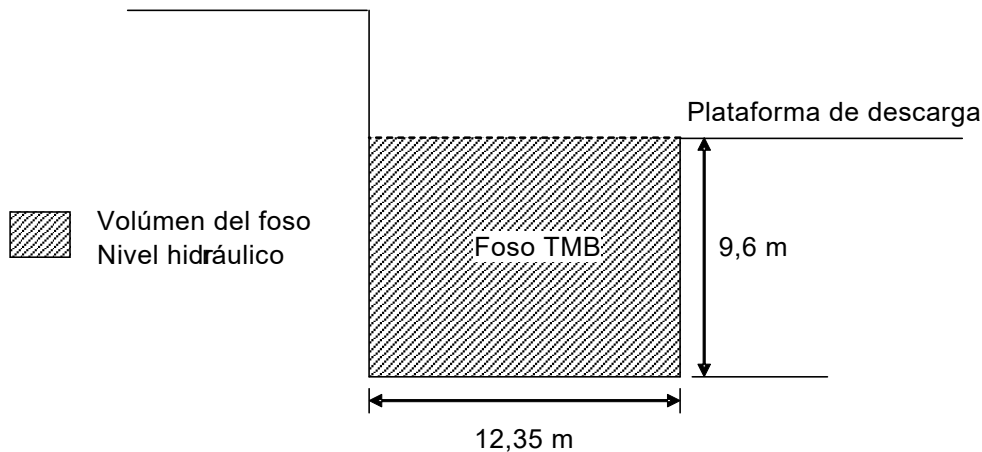
$$2 \text{ días} \times 24 \text{ h/día} \times 42,7 \text{ t/h} \times (1/0,35) \text{ m}^3/\text{t} = \mathbf{5.856 \text{ m}^3}$$

Las dimensiones del foso de residuos son:

- Longitud aprox.: 49,5 m
- Anchura: 12,35 m
- Profundidad: 9,6 m (desde la plataforma de descarga)

Con estas dimensiones el volumen real del foso al nivel hidráulico es de 5.869 m³.

La figura que se presenta a continuación muestra la sección del foso y en sombreado se puede ver el llenado del foso a nivel de descarga (9,6 m) siendo la altura nominal de llenado y ocupando 5.869 m³ de volumen. Con este volumen el foso está preparado para almacenar 2 días de la producción de diseño de la planta con dos líneas de pretratamiento.



Nota: El largo del foso es 49,5 m

Figura 1. Sección del foso de la TMB (llenado al nivel de descarga)

1.3.1. Número de puertas de descarga

El dimensionamiento del número de puertas de descarga del foso de residuos se ha realizado considerando las condiciones de funcionamiento en periodo punta, con el objetivo de garantizar una operativa fluida de los vehículos de aportación de residuos, evitando colas y tiempos de espera excesivos dentro de la instalación.

Hipótesis de partida

Para el periodo punta se han adoptado las siguientes hipótesis de diseño:

- Número de viajes en hora punta: 50 camiones/h
- Tiempo de operación por camión en el foso: 10 minutos/camión
- Frecuencia media de llegada: 1,83 camiones/min
- Intervalo medio entre llegadas: 1,20 min/camión

El tiempo total de operación por camión se desglosa en las siguientes fases:

- Pesaje de entrada: 1 minuto
- Acceso y posicionamiento en bahía: 1 minuto

- Descarga de residuos: 6 minutos
- Salida de bahía: 1 minuto
- Pesaje de salida: 1 minuto

El tiempo total de maniobra resultante es, por tanto, de 10 minutos por camión, equivalente a 0,17 h/camión.

A partir del tiempo de maniobra y del flujo de llegada en hora punta, el número teórico de bahías necesarias se calcula según la expresión:

$$N = Q * t = 50 * 0,17 = 8,5 \text{ bahías}$$

donde:

(Q) es el flujo de llegada (camiones/h),

(t) es el tiempo de maniobra por camión (h/camión).

Por tanto, el número de bahías necesarias para absorber el flujo de camiones en periodo punta es de 9 bahías.

Simulación de la operativa

El cálculo se ha apoyado en una simulación temporal de la llegada y descarga de camiones en periodo punta, representada en el diagrama de ocupación de bahías, en el que se visualiza la sucesión de operaciones de pesaje, acceso, descarga y salida para cada vehículo.

Dicha simulación permite verificar que el número de bahías proyectado es compatible con la capacidad de tratamiento prevista y con la operativa normal de la instalación.

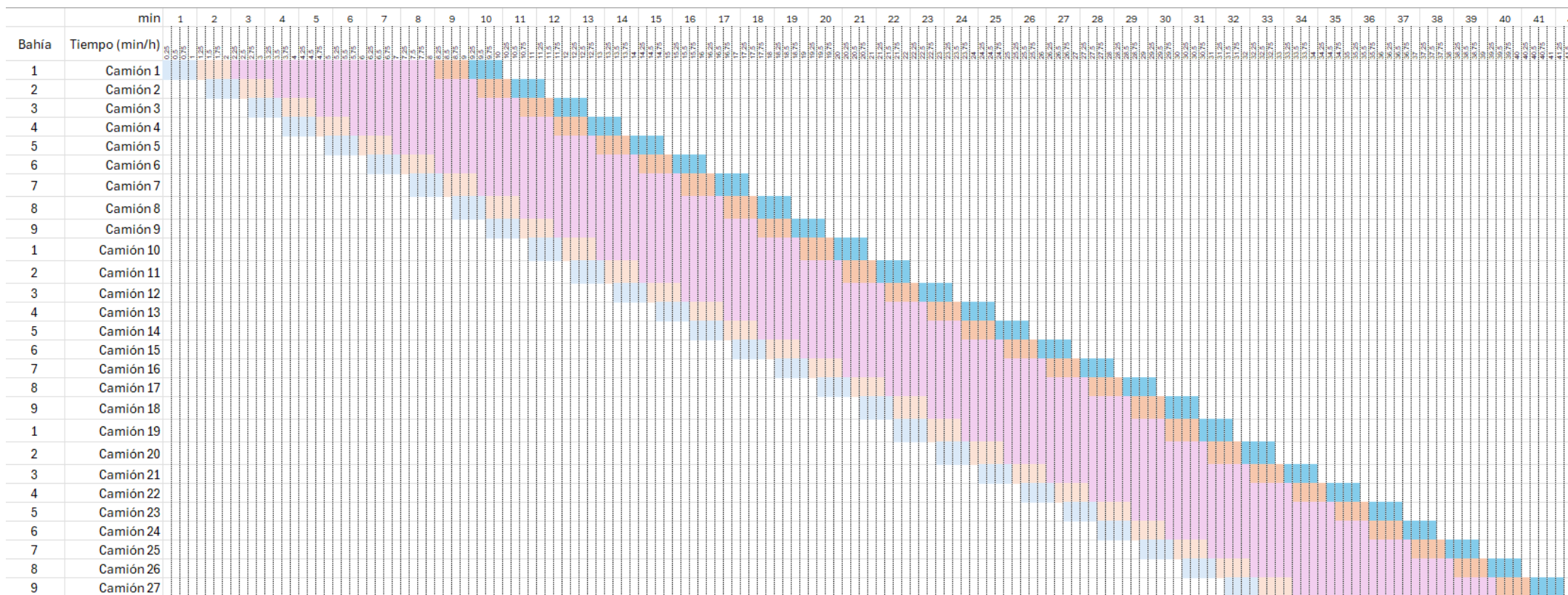


Figura 2. Simulación operativa para el cálculo de bahías en foso de TMB

1.3.2. Puente grúa y pulpo

El dimensionamiento del sistema de alimentación a los trómeles mediante puente grúa con pulpo se ha realizado a partir de las necesidades de tratamiento de la instalación, las características geométricas del foso de almacenamiento y la configuración de las líneas de tratamiento, verificando la capacidad del conjunto para garantizar el caudal de alimentación requerido en condiciones normales de operación.

Criterios geométricos para el cálculo de los movimientos

Para el cálculo de los tiempos de ciclo del puente grúa y del pulpo se han definido los recorridos de movimiento de acuerdo con los siguientes criterios geométricos, coherentes con el diseño de la instalación:

- Elevación: Se considera una altura de elevación equivalente a:
 - La mitad de la profundidad total del foso,
 - Más la cota vertical desde el trómel hasta la plataforma de descarga (7 m, según croquis),
 - Más un margen adicional de 1 m por encima del trómel.
- Traslación del puente grúa: Se adopta como recorrido la mitad de la distancia entre el trómel y el extremo más alejado del foso, representativa de una situación media de operación.
- Movimiento del carro: Se define como el ancho total del foso.

Cálculo de los tiempos de movimiento

A partir de los recorridos definidos y de las velocidades, aceleraciones y desaceleraciones características del equipo (basadas en instalaciones de referencia), se calculan los tiempos parciales de cada movimiento:

- Elevación: velocidad 60 m/min, con fases de aceleración, régimen y deceleración, resultando un tiempo total de 17,0 s.
- Traslación del puente: velocidad 60 m/min, resultando un tiempo total de 26 s.
- Movimiento del carro: velocidad 60 m/min, resultando un tiempo total de 17 s.

El movimiento del carro se considera simultáneo al de traslación del puente, adoptándose en el ciclo el mayor de ambos tiempos.

Ciclo de carga del pulpo

El ciclo completo de operación del pulpo incluye las siguientes fases:

1. Cierre de la cuchara para toma del residuo.

2. Elevación y desplazamiento hasta el trómel de alimentación.
3. Apertura del pulpo sobre el trómel.
4. Retorno del pulpo abierto a la posición inicial.
5. Pesada del residuo.

El tiempo total de ciclo obtenido es de 111,5 s, equivalente a aproximadamente 18 ciclos por hora, considerando además un tiempo de descanso operativo del gruista de 25 min/h, conforme a prácticas habituales de explotación.

Dimensionamiento del pulpo

A partir del número de ciclos por hora, la densidad del residuo y el factor de llenado de la cuchara, se obtiene la capacidad necesaria del pulpo:

- Factor de llenado de cuchara: 80 %
- Densidad del residuo en cuchara: 0,45 t/m³
- Capacidad de carga requerida: $\approx 47,1$ t/h
- Capacidad volumétrica necesaria del pulpo: $\approx 7,28$ m³

De acuerdo con estos resultados, se selecciona un pulpo de 8 m³ de capacidad, valor normalizado y adecuado para garantizar el caudal de alimentación requerido con margen suficiente.

El dimensionamiento de la cuchara abierta se basa en modelos comerciales de la marca Stemm, ampliamente implantados en instalaciones de características similares, garantizando su compatibilidad geométrica y estructural con el foso proyectado.

El pulpo podrá ser de tipo electrohidráulico o mecánico, siendo ambas soluciones técnicamente válidas para la capacidad calculada.

Verificación de la capacidad portante del puente grúa

La capacidad portante del puente grúa se verifica considerando el peso máximo suspendido:

- Peso del residuo en cuchara: 5,6 t
- Peso de la cuchara (modelo Bug): 4,3 t
- Peso de cables y accesorios: 0,7 t

Resultando un peso total suspendido de 10,6 t, valor compatible con la capacidad de diseño del puente grúa proyectado.

1.4. Almacén de balas (material recuperado)

El dimensionamiento del área de almacenamiento de materiales recuperados se ha realizado a partir de los flujos de entrada y recuperación previstos en el Centro de Tratamiento de Residuos "Jarama". Como se ha indicado previamente, de las aproximadamente 160.500 toneladas anuales de residuo industrial asimilable a urbano tratadas en la planta de pretratamiento, se estima una recuperación de en torno a 10.500 t/año de materiales valorizables, lo que representa aproximadamente un 7 % del total de entrada.

El almacenamiento se ha diseñado en forma de balas compactadas, con el objetivo de optimizar el espacio disponible y facilitar su manipulación y expedición. El área total destinada a este uso es de 945 m², con una altura interior de 15 m.

A efectos de dimensionamiento, se ha adoptado una bala tipo de dimensiones aproximadas 1,0 m × 1,0 m × 1,0 m, lo que supone un volumen unitario de 1 m³. Considerando una densidad media de almacenamiento de 0,5 t/m³, se obtiene una capacidad aproximada de 0,5 toneladas por bala.

Dado que no toda la superficie disponible puede destinarse a ocupación directa de material, al ser necesario mantener espacios de circulación, maniobra y seguridad, se ha considerado una ocupación útil del 65 % de la superficie total, lo que equivale a aproximadamente 614 m² de superficie neta de almacenamiento. Con una disposición en planta de las balas sobre su base de 1 m², y contemplando un apilado de hasta 3 alturas, **la capacidad máxima de almacenamiento del área asciende a unas 1.842 balas, equivalentes a aproximadamente 921 toneladas de material recuperado.**

En relación con la producción anual prevista, esta capacidad permite disponer de una **autonomía de almacenamiento de aproximadamente 32 días, equivalente a algo más de un mes de operación.** Este margen se considera adecuado para garantizar la flexibilidad operativa de la instalación, absorber posibles variaciones en la salida de materiales y asegurar una correcta gestión logística sin riesgo de saturación del sistema.

2. DIMENSIONADO DE LA PLANTA DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA

2.1. Tipología de residuos a tratar

La Planta de Valorización Energética (PVE) tratará rechazos de plantas de tratamiento de residuos recogidos selectivamente y una fracción de Residuos industriales Asimilables a Urbanos (RAU) que previamente, serán tratados en la planta de pretratamiento del Centro de Tratamiento de Residuos "Jarama".

2.2. Capacidad de tratamiento

En el capítulo "3. Capacidad de Producción" se define la capacidad nominal de tratamiento de la PVE, y se establece en 2 x 18,75 t/h (para un PCI de 10.250 kJ/kg).

Aunque la capacidad máxima de tratamiento se previene en 21,4 x 2 t/h, considerando un PCI medio de 9.000 kJ/kg debido a mayor incorporación de fracciones orgánicas e inertes, se desarrollarán todos los cálculos según la producción estimada de la instalación que es la misma que la capacidad nominal.

En base a lo descrito previamente, a continuación, se resumen los datos de diseño de la instalación propuesta:

Parámetro	Valor
Residuos a tratar (capacidad nominal)	300.000 t/año
PCI de diseño	2.448 kcal/kg (10.250 kJ/kg)
Régimen de funcionamiento	8.000 h/año
Operatividad máxima	8.760 h/año
Líneas de tratamiento	2
Capacidad mecánica nominal	2 x 18,75 t/hora = 37,5 t/hora
Capacidad térmica máxima en continuo	2 x 53,4 MWt = 106,8 MWt

Tabla 2. Datos generales de la PVE

2.3. Foso de almacenamiento de residuos.

El volumen del foso se dimensiona de modo que se puedan almacenar 5 días (al nivel hidráulico) de la capacidad de diseño de la planta con dos líneas de valorización energética.

- La capacidad de la planta con 2 líneas de combustión es:
 - Capacidad horaria diseño 37,5 t/h
- Las densidades medias consideradas para el dimensionamiento del foso son:
 - Densidad promedio 0,45 t/m³
- La anchura del foso debe ser como mínimo el doble del diámetro de la cuchara empleada en el manejo de los residuos, más unos metros de margen.
- La profundidad se establece en 10 metros, pero hace falta tener en cuenta que las compuertas de los camiones tienen una rampa a 45° con una altura de 1 metro, resultando en un foso de 11 metros desde la plataforma, siendo un óptimo para estos tamaños.

Con esto se tiene que se debe tener un volumen mínimo de almacenamiento de:

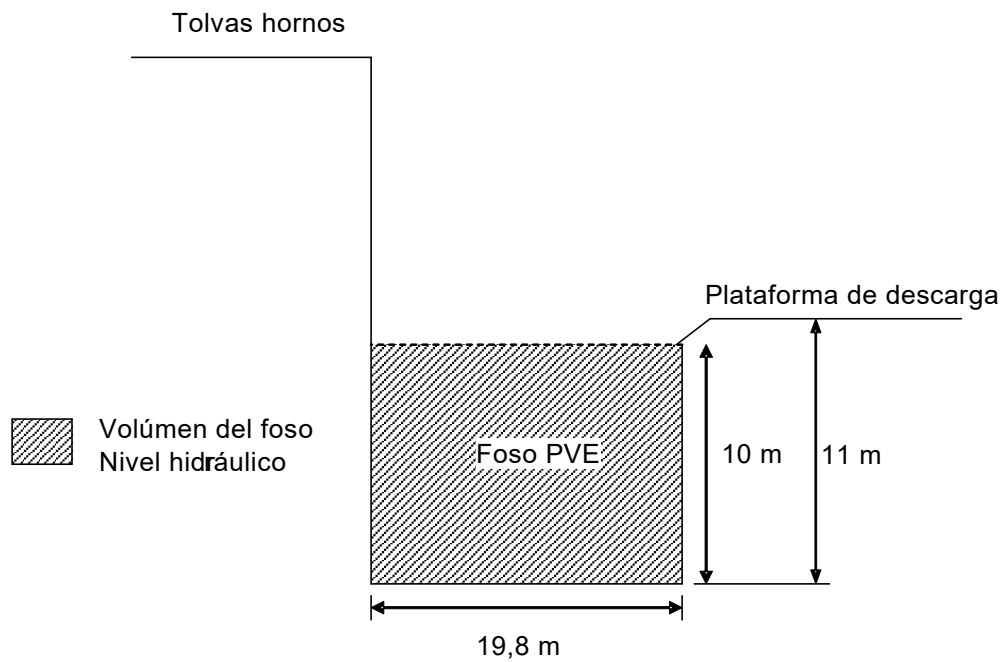
$$5 \text{ días} \times 24 \text{ h/día} \times 37,5 \text{ t/h} \times (1/0,45) \text{ m}^3/\text{t} = \mathbf{10.000 \text{ m}^3}$$

Las dimensiones del foso de residuos son:

- Longitud aprox.: 50,6 m
- Anchura: 19,8 m
- Profundidad: 11 m (desde la plataforma de descarga)

Con estas dimensiones el volumen real del foso al nivel hidráulico es de 11.020 m³.

La figura que se presenta a continuación muestra la sección del foso y en sombreado se puede ver el llenado del foso a nivel de descarga (10 m) siendo la altura nominal de llenado y ocupando 10.000 m³ de volumen. Con este volumen el foso está preparado para almacenar 5 días de la producción de diseño de la planta con dos líneas de valorización energética.



Nota: El largo del foso es 50,6 m

Figura 3. Sección del foso de la PVE (llenado al nivel de descarga).

2.3.1. Con apilamiento

Por apilamiento es posible aumentar la capacidad mencionada hasta un 75% respecto la capacidad nominal, esto se muestra en la figura siguiente.

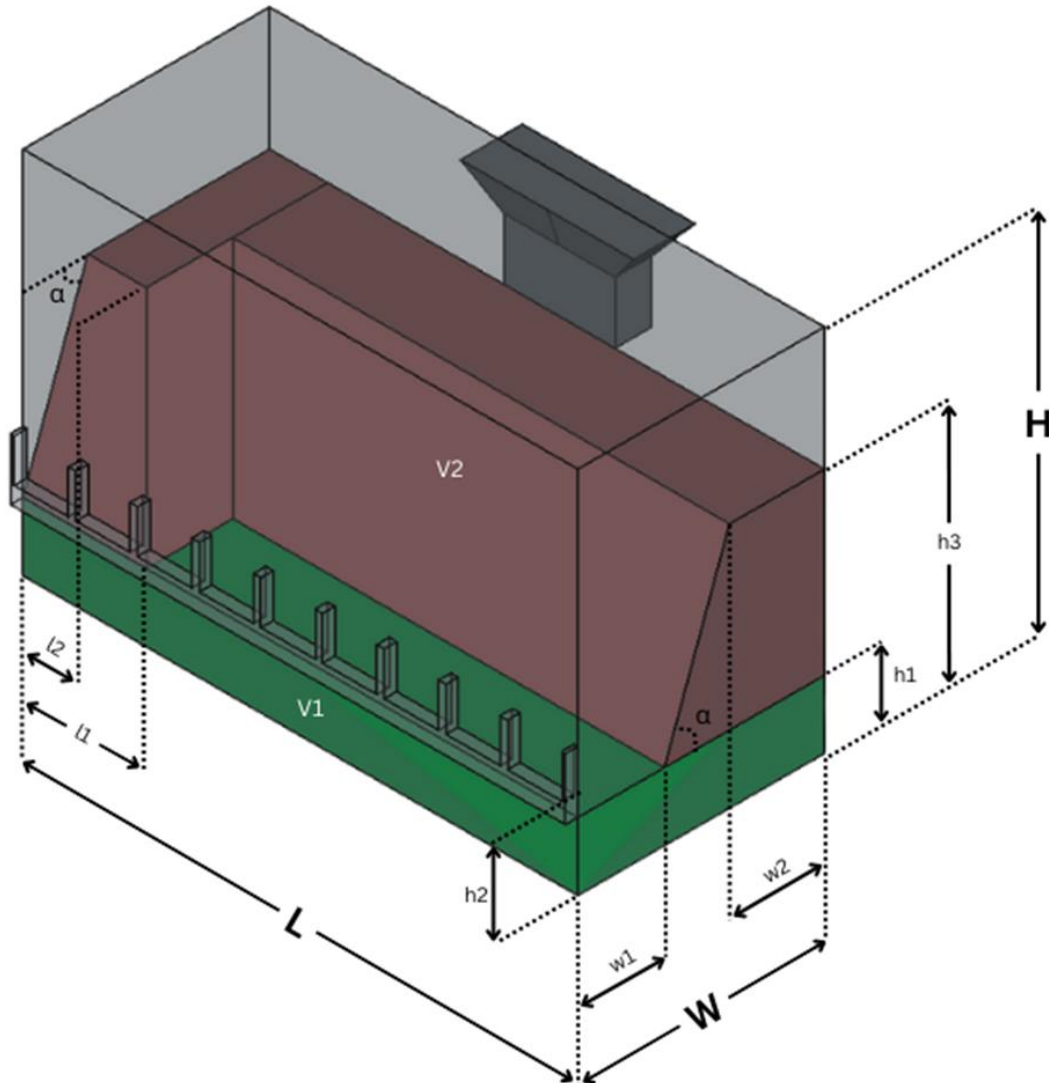


Figura 4. Representación del aumento de volumen en foso con apilamiento

Teniendo en cuenta las dimensiones anteriormente calculadas, asumimos que las distintas dimensiones del apilamiento son las siguientes:

$$w1 = 6,5 \text{ m}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

A partir de aquí, calculamos que el volumen de apilamiento ($v2$) es de 6.808 m^3 , aumentando en 3,4 días el almacenamiento disponible. Teniendo en cuenta que los residuos se apilan dejando una distancia de seguridad para el pulpo ($H - h3 = 7 \text{ m}$) para poder realizar el apilamiento de forma segura. El volumen disponible para almacenar residuos sería de $10.000 + 6.808 = 16.808 \text{ m}^3$.

Con estas dimensiones el foso estará preparado para almacenar 8,4 días de la producción de diseño de la planta con dos líneas de valorización energética.

2.3.2. Número de puertas de descarga

El dimensionamiento del número de puertas de descarga del foso de residuos se ha realizado considerando las condiciones de funcionamiento en periodo punta, con el objetivo de garantizar una operativa fluida de los vehículos de aportación de residuos, evitando colas y tiempos de espera excesivos dentro de la instalación.

Hipótesis de partida

Para el periodo punta se han adoptado las siguientes hipótesis de diseño:

- Número de viajes en hora punta: 58 camiones/h
- Tiempo de operación por camión en el foso: 10 minutos/camión
- Frecuencia media de llegada: 1,00 camiones/min
- Intervalo medio entre llegadas: 1 min/camión

El tiempo total de operación por camión se desglosa en las siguientes fases:

- Pesaje de entrada: 1 minuto
- Acceso y posicionamiento en bahía: 1 minuto
- Descarga de residuos: 6 minutos
- Salida de bahía: 1 minuto
- Pesaje de salida: 1 minuto

El tiempo total de maniobra resultante es, por tanto, de 10 minutos por camión, equivalente a 0,17 h/camión.

A partir del tiempo de maniobra y del flujo de llegada en hora punta, el número teórico de bahías necesarias se calcula según la expresión:

$$N = Q \cdot t = 58 \cdot 0,17 = 9,86 \text{ bahías}$$

donde:

(Q) es el flujo de llegada (camiones/h),

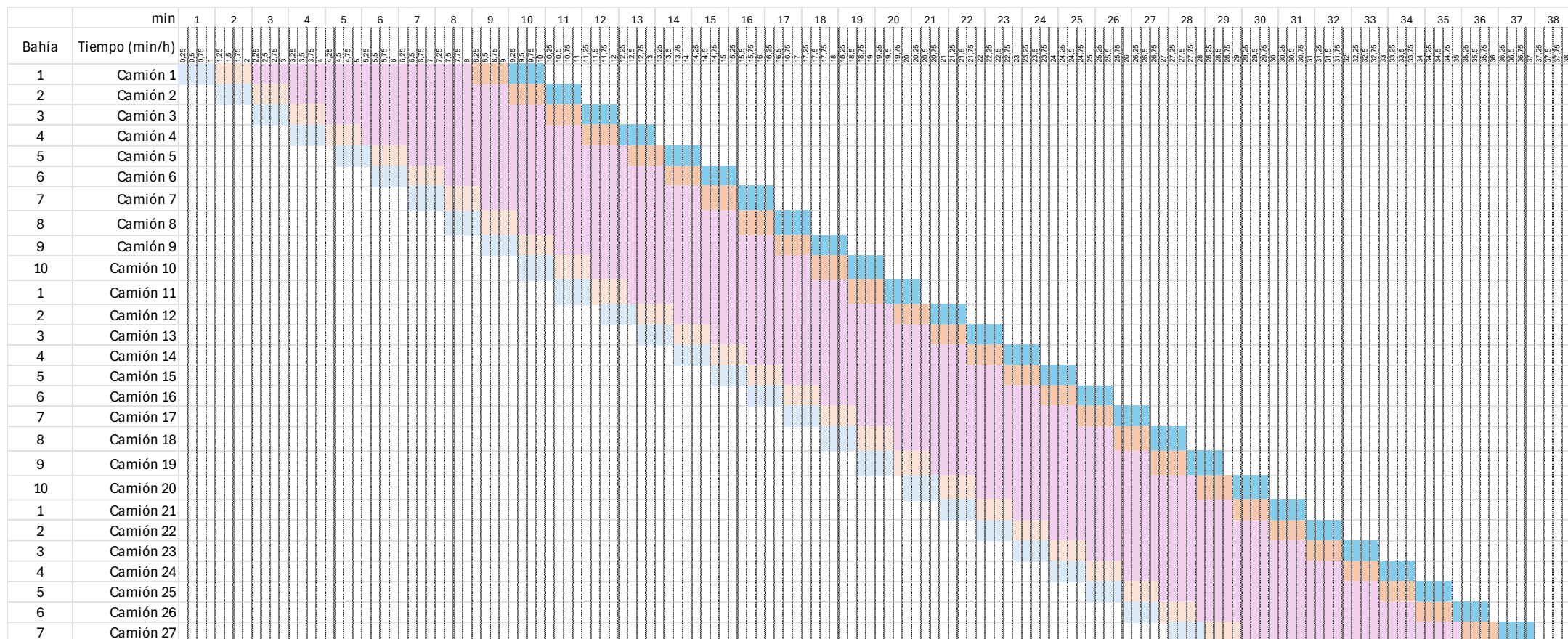
(t) es el tiempo de maniobra por camión (h/camión).

Por tanto, el número de bahías necesarias para absorber el flujo de camiones en periodo punta es de 10 bahías.

Simulación de la operativa

El cálculo se ha apoyado en una simulación temporal de la llegada y descarga de camiones en periodo punta, representada en el diagrama de ocupación de bahías, en el que se visualiza la sucesión de operaciones de pesaje, acceso, descarga y salida para cada vehículo.

Dicha simulación permite verificar que el número de bahías proyectado es compatible con la capacidad de tratamiento prevista y con la operativa normal de la instalación.



2.3.3. Puente grúa y pulpo

El dimensionamiento del sistema de alimentación a tolvas mediante puente grúa con pulpo se ha realizado a partir de las necesidades de tratamiento de la instalación, las características geométricas del foso de almacenamiento y la configuración de las líneas de tratamiento, verificando la capacidad del conjunto para garantizar el caudal de alimentación requerido en condiciones normales de operación.

Criterios geométricos para el cálculo de los movimientos

Para el cálculo de los tiempos de ciclo del puente grúa y del pulpo se han definido los recorridos de movimiento de acuerdo con los siguientes criterios geométricos, coherentes con el diseño del foso y las tolvas de alimentación:

- Elevación: Se considera una altura de elevación equivalente a:
 - La mitad de la profundidad total del foso,
 - Más la cota vertical desde la tolva hasta la plataforma de descarga (15 m, según croquis),
 - Más un margen adicional de 1 m por encima de la tolva.
- Traslación del puente grúa: Se adopta como recorrido la mitad de la distancia entre la tolva y el extremo más alejado del foso, representativa de una situación media de operación.
- Movimiento del carro: Se define como el ancho total del foso más la distancia al centro de la tolva.

Cálculo de los tiempos de movimiento

A partir de los recorridos definidos y de las velocidades, aceleraciones y desaceleraciones características del equipo (basadas en instalaciones de referencia), se calculan los tiempos parciales de cada movimiento:

- Elevación: velocidad 60 m/min, con fases de aceleración, régimen y deceleración, resultando un tiempo total de 25,0 s.
- Traslación del puente: velocidad 60 m/min, resultando un tiempo total de 27,3 s.
- Movimiento del carro: velocidad 60 m/min, resultando un tiempo total de 26,3 s.

El movimiento del carro se considera simultáneo al de traslación del puente, adoptándose en el ciclo el mayor de ambos tiempos.

Ciclo de carga del pulpo

El ciclo completo de operación del pulpo incluye las siguientes fases:

6. Cierre de la cuchara para toma del residuo.
7. Elevación y desplazamiento hasta la tolva.
8. Apertura del pulpo sobre la tolva.
9. Retorno del pulpo abierto a la posición inicial.
10. Pesada del residuo.

El tiempo total de ciclo obtenido es de 130,6 s, equivalente a aproximadamente 16 ciclos por hora, considerando además un tiempo de descanso operativo del gruista de 25 min/h, conforme a prácticas habituales de explotación.

Dimensionamiento del pulpo

A partir del número de ciclos por hora, la densidad del residuo y el factor de llenado de la cuchara, se obtiene la capacidad necesaria del pulpo:

- Factor de llenado de cuchara: 80 %
- Densidad del residuo en cuchara: 0,45 t/m³
- Capacidad de carga requerida: $\approx 39,4$ t/h
- Capacidad volumétrica necesaria del pulpo: $\approx 6,84$ m³

De acuerdo con estos resultados, se selecciona un pulpo de 7 m³ de capacidad, valor normalizado y adecuado para garantizar el caudal de alimentación requerido con margen suficiente.

El dimensionamiento de la cuchara abierta se basa en modelos comerciales de la marca Stemm, ampliamente implantados en instalaciones de características similares, garantizando su compatibilidad geométrica y estructural con el foso proyectado.

El pulpo podrá ser de tipo electrohidráulico o mecánico, siendo ambas soluciones técnicamente válidas para la capacidad calculada.

Verificación de la capacidad portante del puente grúa

La capacidad portante del puente grúa se verifica considerando el peso máximo suspendido:

- Peso del residuo en cuchara: 4,9 t
- Peso de la cuchara (modelo Blug): 3,5 t
- Peso de cables y accesorios: 0,7 t

Resultando un peso total suspendido de 9,1 t, valor compatible con la capacidad de diseño del puente grúa proyectado.

2.4. Foso de almacenamiento de escorias.

Se diseña con capacidad para dos líneas de combustión a máxima capacidad mecánica.

- Capacidad mecánica de diseño de la PVE (para un PCI de 2.448 kcal/kg) 2 x 18,75 t/h
- Ratio máxima de producción de escorias en BASE HÚMEDA 24%
- Capacidad de almacenamiento..... 5 días
- Densidad aparente 0,96 t/m³

Con esto se tiene que se debe tener un volumen de almacenamiento:

$$(2 \times 18,75 \text{ t/h} \times 0,24 \times 24 \text{ h/d} \times 5 \text{ días}) / 0,96 \text{ t/m}^3 = \mathbf{1.125 \text{ m}^3}$$

Las dimensiones del foso de escorias son:

- Longitud aprox.: 31 m
- Anchura: 5,2 m
- Profundidad: 7 m

Con estas dimensiones el volumen real del foso al nivel hidráulico es de 1.128 m³.

2.4.1. Puente grúa y cuchara bivalva

El dimensionamiento del sistema de manipulación del foso de escorias mediante puente grúa y cuchara se ha realizado aplicando los mismos criterios generales y metodología de cálculo descritos para el foso de residuos, adaptando los parámetros geométricos y operativos a las características específicas de este foso. En este caso, hay que considerar que el régimen de operación del gruista es de 1 turno por día (8 h), que teniendo en cuenta descansos y márgenes de seguridad, se quedaría en 6,5 h operativas al día. Por lo tanto, las escorias teóricas producidas por hora se tendrían que multiplicar por un factor de concentración diario de (24/6,5).

Movimientos y tiempos de ciclo

Los recorridos de elevación, traslación del puente y movimiento del carro se han determinado conforme a los mismos criterios geométricos definidos para el foso de residuos, si bien resultan valores sensiblemente inferiores debido al menor tamaño del foso y a la disposición de los camiones.

A partir de las velocidades y aceleraciones adoptadas, se obtienen los siguientes tiempos característicos:

- Elevación: 13,0 s
- Traslación del puente: 18,5 s
- Movimiento del carro: 11,65 s

Al igual que en el caso anterior, el movimiento del carro se considera simultáneo a la traslación del puente, adoptándose el mayor de ambos tiempos en el ciclo.

El tiempo total de ciclo resultante es de 89 s, lo que permite realizar aproximadamente 23 ciclos por hora, considerando igualmente los tiempos de descanso operativo.

Dimensionamiento de la cuchara

Con base en el tiempo de ciclo, la densidad de la escoria y un factor de llenado de cuchara del 80 %, se obtiene una capacidad volumétrica necesaria de la cuchara de aproximadamente 2,07 m³.

En consecuencia, se selecciona una cuchara de 3 m³, valor normalizado que proporciona un margen adecuado respecto a la capacidad mínima requerida.

Verificación de la capacidad portante del puente grúa

La verificación de la carga máxima suspendida del puente grúa arroja los siguientes valores:

- Peso de la escoria en cuchara: 2,1 t
- Peso de la cuchara: 1,7 t
- Peso de cables y accesorios: 0,7 t

Resultando un peso total suspendido de 4,5 t, compatible con la capacidad del puente grúa proyectado para el foso de escorias.

2.5. Depósito de residuos líquidos

Para el dimensionamiento del depósito de residuos líquidos se han considerado las corrientes generadas en la instalación susceptibles de ser gestionadas mediante valorización energética, evitando así la generación de vertidos líquidos.

Por un lado, el proceso de valorización de la fracción líquida (NP04) contempla la entrada de aproximadamente 11.288 t/año de residuos líquidos.

Adicionalmente, se considera la posible incorporación de los lixiviados generados en el foso de escorias, con una producción estimada de 3.180 m³/año, los cuales pueden ser igualmente valorizados mediante su inyección al sistema de combustión. No obstante, esta corriente tiene carácter opcional desde el punto de vista operativo, por lo que el dimensionamiento del depósito debe garantizar capacidad suficiente para su almacenamiento en caso de ser necesario, sin que ello condicione el funcionamiento ordinario del sistema.

A efectos de dimensionamiento, se considera un funcionamiento continuo de la instalación a lo largo del año. De este modo, el caudal medio diario asociado a los residuos líquidos del proceso NP04 es del orden de:

$$\frac{11.288}{365} \approx 31 \text{ m}^3/\text{día}$$

Por su parte, el caudal medio diario correspondiente a los lixiviados de escorias sería de:

$$\frac{3.180}{365} \approx 8,7 \text{ m}^3/\text{día}$$

Considerando ambas corrientes, se obtiene un caudal máximo potencial de aproximadamente 40 m³/día.

Para el dimensionamiento del depósito se adopta un criterio de autonomía suficiente que permita absorber variaciones en la generación de residuos, paradas operativas del sistema de inyección o situaciones puntuales de acumulación. En este sentido, se considera un tiempo de almacenamiento de 20–25 días. En base a lo anterior, el volumen requerido sería:

$$40 \text{ m}^3/\text{día} \times 25 \text{ días} = 1.000 \text{ m}^3$$

Por tanto, se adopta un volumen de diseño del depósito de residuos líquidos de 1.000 m³, que permite cubrir tanto la operación habitual del proceso NP04 como la posible incorporación de lixiviados de escorias, garantizando en todo momento la ausencia de vertidos líquidos y la correcta gestión de las corrientes generadas en la instalación.

2.6. Combustión.

El cálculo desarrollado a continuación se realiza para la capacidad nominal de la instalación (2 x 18,75 t/h) para un PCI de los residuos de 10.250 kJ/kg o 2.448 kcal/kg.

Consideraciones previas:

- El aire primario y el aire secundario se precalientan con extracciones de turbina, para pasar de los 20 °C (considerada como la temperatura media ambiente) a los 130 °C.
- Los parámetros del vapor sobrecalentado a salida de caldera (61,5 bar, 422 °C) se han seleccionado teniendo en cuenta la experiencia acumulada en este proceso durante muchos

años. Las relativamente bajas temperaturas del vapor reducen significativamente la corrosión en las cámaras radiantes de la caldera.

- Las condiciones del vapor a la salida de la turbina dependen de los parámetros de diseño fijados para el aerocondensador, y éstos a su vez de las condiciones atmosféricas. Los datos de climatología de la zona de estudio corroboran que se puede obtener una presión de condensación de 0,1 bar abs mediante el uso de un aerocondensador, incluso en las épocas más calurosas del año, excepto en las horas centrales del día con temperaturas de más de 26 °C.
- Las propiedades del aire ambiente son de 20 °C y un 70% de humedad relativa.

2.6.1. Cálculo del aire de combustión.

Para calcular el aire de combustión, es necesario establecer previamente el denominado "aire de combustión neutra", es decir, el aire necesario para la combustión estequiométrica de los residuos. El "aire de combustión neutra" se establece a partir de la correlación entre PCI y grado de humedad del residuo.

Sin embargo, en los hornos de residuos, a fin de conseguir una calidad de combustión adecuada a la vez que preserva al horno de sobrecalentamientos excesivos se trabajan con excesos de aire de combustión. En este caso, el exceso de aire de combustión se considera un 80% respecto al aire de combustión neutra.

La tabla siguiente resume los caudales de aire de combustión para ambos casos.

Parámetro	Uds	Valor
Capacidad de tratamiento	Kg/h	18.750
Aire de combustión neutra	Nm ³ /kg RSU	2,73
Caudal de aire de combustión neutra	Nm ³ /h	51.251
Caudal de aire de combustión con exceso de aire	Nm³/h	93.096

Tabla 3. Aire de combustión (por línea).

2.6.2. Cálculo de los gases de combustión

Al igual que para el aire de combustión, primero se establece el volumen de "gases de combustión neutra", es decir, el volumen de gases que produciría por la combustión estequiométrica de los residuos.

Los "gases de combustión neutra" se establecen a partir de la correlación entre PCI y grado de humedad del residuo. La tabla siguiente resume los caudales de gases de combustión.

Parámetro	Uds	Valor
Capacidad de tratamiento	Kg/h	18.750
Gases de combustión neutra	Nm ³ /kg RSU	3,514
Caudal gases de combustión neutra	Nm ³ /h	65.889
Caudal total gases de combustión con exceso de aire	Nm³/h	107.874

Tabla 4. Gases de combustión (por línea)

2.6.3. Energía útil de la combustión

No toda la energía contenida en los residuos se libera de forma útil en el horno, sino que existen determinadas pérdidas que se cuantifican a continuación:

1. Las pérdidas por radiación en el horno.

Las pérdidas por radiación son siempre inferiores al 1% del calor bruto ingresado con los residuos. Para el cálculo se toma un valor conservador de un 2%, con lo cual se tienen unas pérdidas indicadas en la tabla resumen.

2. Las pérdidas por inquemados (presencia de carbono en las escorias y cenizas).

Los valores de inquemados en las escorias y cenizas estarán siempre por debajo del 2%, con un poder calorífico medio de 8.000 kcal/kg. Para el cálculo se toma un valor conservador de un 2,8%, con lo cual se tienen unas pérdidas indicadas en la tabla resumen.

3. El calor contenido en las cenizas calientes arrastradas.

Se estima un arrastre de 5 gramos de cenizas calientes por Nm³ de gas de combustión, con un calor contenido en las cenizas de unos 150 kcal/kg, con lo cual se tienen unas pérdidas indicadas en la tabla resumen.

En resumen, la energía útil en ambos casos será de:

Parámetro	Uds	Valor
PCI	Kcal/kg	2.448
Pérdidas	Radiación	48,96
	Inquemados	68,54
	Cenizas calientes	4,31
Energía útil de la combustión	Kcal/kg	2.326,2

Tabla 5. Energía útil de la combustión

2.6.4. Energía introducida en el horno

Parámetro	Uds	Valor
Cantidad de residuos	t/h	18,75

PCI residuos	Kcal/kg	2.448
Energía total introducida en el horno	Gcal/h	45,9

Tabla 6. Energía introducida en el horno (por línea)

2.6.5. Energía transferida a los gases

La energía transferida a los gases es el calor útil de los residuos.

Parámetro	Uds	Valor
Cantidad de residuos	t/h	18,75
Calor útil de los residuos	Kcal/kg	2.326,2
Energía total transferida a los gases	Gcal/h	43,61

Tabla 7. Energía transferida a los gases de combustión (por línea)

2.6.6. Entalpía de los gases en horno

La entalpía de los gases de combustión en el horno se obtiene mediante el producto de la temperatura en el horno y el calor específico medio de los gases de combustión, ambos parámetros calculados a través de tabulación y balances energéticos en el horno. De éstos se obtiene:

Parámetro	Uds.	Valor
Temperatura adiabática en horno	°C	1.133
Calor específico medio gases	Kcal/Nm ³ /°C	0,383
Entalpía gases en horno	kcal/ Nm³	433,64

Tabla 8. Entalpía de los gases en el horno

2.6.7. Entalpía de los gases a salida de caldera

La temperatura media a salida de caldera es de 165 °C.

La entalpía de los gases a salida de caldera se obtiene mediante el producto de la temperatura de gases de salida y el calor específico medio de los gases a salida de caldera, calculado a través de tabulación y balances energéticos en el horno. De éstos se obtiene:

Parámetro	Uds.	Valor
Calor específico medio gases	Kcal/Nm ³ /°C	0,336

Temperatura	°C	165
Entalpía gases a salida de caldera	kcal/ Nm³	55,46

Tabla 9. Entalpía de los gases a salida de caldera

2.6.8. Calor cedido por los gases en caldera

El calor total cedido por los gases en caldera se calcula por el producto entre el caudal total de los gases de combustión por la diferencia entre las entalpías de los gases de combustión en horno y a salida de caldera:

Parámetro	Uds.	Valor
Caudal gases combustión	Nm ³ /h	107.874
Entalpía de gases en el horno	kcal/Nm ³	433,64
Entalpía gases salida caldera	kcal/Nm ³	55,46
Diferencia entre Entalpías	kcal/Nm ³	378,18
Energía transferida al vapor en caldera	kcal/h	40,8 x 10⁶

Tabla 10. Calor cedido por los gases en caldera (por línea)

2.6.9. Producción de vapor

Las condiciones del agua de alimentación, del vapor vivo generado y del vapor de extracción son las siguientes:

- Temperatura precalentamiento aire primario → 130 °C
- Temperatura precalentamiento aire secundario → 130 °C
- Temperatura salida de humos constante → 165 °C
- Temperatura agua caldera → 130 °C
- Entalpía agua caldera → 131,73 kcal/kg
- Temperatura vapor → 422 °C
- Presión vapor a salida caldera → 61,5 bar (a)
- Entalpía vapor salida caldera → 771,78 kcal/kg
- Presión vapor a entrada turbina → 60,5 bar (a)
- Entalpía vapor entrada turbina → 770,98 kcal/kg
- Caudal purgas → 1.400 kg/h
- Presión vapor extracción 1 turbina → 8,58 bar (a)
- Temperatura vapor extracción 1 turbina → 198,5 °C
- Entalpía del vapor extracción 1 turbina → 676,7 kcal/kg
- Presión vapor extracción 2 turbina → 4 bar (a)
- Temperatura vapor extracción 2 turbina → 143,6 °C
- Entalpía del vapor extracción 2 turbina → 645,05 kcal/kg

- Presión vapor extracción 3 turbina → 1,33 bar (a)
- Temperatura vapor extracción 3 turbina → 107,8 °C
- Entalpía del vapor extracción 3 turbina → 605,69 kcal/kg

Con estas condiciones de agua de alimentación, de purgas y de vapor, se tiene una producción de vapor de 116.750 kg/h.

La cantidad de agua aportada por purgas y la cantidad total de agua de alimentación de calderas es de:

Parámetro	Uds.	Valor
Caudal de purgas	kg/h	1.400
Caudal total de agua de alimentación	kg/h	120.500

Tabla 11. Caudal agua de purgas y agua de alimentación

2.6.10. Cálculo de la generación eléctrica

A continuación, se efectúan los cálculos de la producción de energía eléctrica para los dos puntos establecidos. La presión establecida a salida de turbina es de 0,1 bar. Para esta presión y vapor se tienen los siguientes parámetros:

- Presión vapor 0,1 bar
- Temperatura vapor 45,8 °C
- Título vapor 88,0 %
- Entalpía del vapor 548,6 kcal/kg

Con todo ello y suponiendo un rendimiento del turboalternador de un 96,8% se tiene que:

Parámetro	Uds.	Valor
Caudal de vapor a turbina	kg/h	116.328
Vapor a la extracción 1 (8,6 bar)	kg/h	5.684
Vapor a la extracción 2 (4 bar)	kg/h	7.031
Vapor a la extracción 3 (1,33 bar)	kg/h	10.148
Producción eléctrica	MW	27

Tabla 12. Generación eléctrica

2.6.11. Eficiencia global del ciclo

La eficiencia total del ciclo resultará del cociente entre la potencia eléctrica generada y la potencia térmica disponible en los residuos, es decir:

Parámetro	Uds.	Valor
Producción eléctrica	kW	26.951
Potencia térmica residuos	kW	106.771
Eficiencia global del ciclo	%	25,24

Tabla 13. Eficiencia global del ciclo

2.6.12. Producción de energía eléctrica mediante instalación fotovoltaica

Con el objetivo de mejorar el balance energético global de la instalación y reducir el consumo de energía externa, se prevé la implantación de un sistema de generación eléctrica mediante energía solar fotovoltaica.

La instalación se distribuirá en varias zonas dentro de la parcela. Por un lado, se dispondrán módulos fotovoltaicos sobre las cubiertas de los edificios, concretamente en la nave de pretratamiento de residuos y en la plataforma de descarga, con una superficie conjunta disponible de 11.465 m², considerando un grado de ocupación efectivo del 80%. Por otro lado, se contempla la instalación de estructuras tipo pérgola en las zonas de aparcamiento, que aportan una superficie adicional aproximada de 600 m².

Para el dimensionamiento de la instalación se ha considerado el empleo de módulos fotovoltaicos con una superficie unitaria de 2,53 m² y una potencia pico de 590 W por panel, lo que equivale a una densidad de potencia instalada de aproximadamente 232 W/m².

A partir de la superficie disponible, se obtiene una potencia instalada total del orden de 2,415 MWp, con una potencia efectiva estimada de 2,246 MWp. Para la estimación de la producción anual de energía se han tomado como referencia los datos de radiación solar correspondientes al entorno del municipio de Aranjuez, representativos de la ubicación del Centro de Tratamiento de Residuos "Jarama".

Considerando unas pérdidas globales del sistema del 14% (incluyendo pérdidas por temperatura, inversores, cableado, orientación e inclinación de los módulos), la producción anual estimada de energía eléctrica asciende a aproximadamente **3.200 MWh/año**.

Esta generación permitirá reducir parcialmente el consumo eléctrico de la instalación, mejorando su eficiencia energética global.

2.6.13. Resumen de los parámetros del proceso de valorización

La tabla mostrada a continuación indica los parámetros más característicos del proceso de valorización energética de los residuos para cada uno de los casos considerados.

Parámetro	Uds.	Valor
Capacidad de tratamiento de residuos	kg/h	18.750
PCI de los residuos	kcal/kg	2.448
Caudal de aire de combustión (por línea)	Nm ³ /h	93.096
Caudal de gases de combustión (por línea)	Nm ³ /h	107.874
Temperatura de precalentamiento del aire primario y secundario	°C	130
Temperatura de salida de los gases de combustión	°C	165
Temperatura agua de alimentación de la caldera	°C	130
Parámetros del vapor sobrecalentado salida caldera	°C/bar.	422/61,5
Producción bruta de vapor sobrecalentado (total)	kg/h	116.750
Condiciones del vapor de extracción 1	°C/bar.	198,5/8,6
Caudal total extracción 1 de vapor	kg/h	5.684
Condiciones del vapor de extracción 2	°C/bar.	143,6/4
Caudal total extracción 2 de vapor	kg/h	7.031
Condiciones del vapor de extracción 3	°C/bar.	107,8/1,33
Caudal total extracción 3 de vapor	kg/h	10.148
Condiciones del vapor a la salida de la turbina	°C/bar.	45,8/0,1
Caudal de vapor de escape	kg/h	93.465
Producción esperada de energía eléctrica	MWh/h	27
Eficiencia global del ciclo	%	25,24
Producción de energía fotovoltaica	MWh	3.200

Tabla 14. Resumen de los parámetros de la valorización energética de los residuos

2.7. Depuración de gases

2.7.1. Consumo de hidróxido cálcico

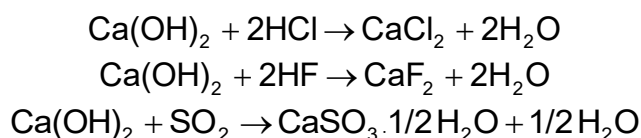
2.7.1.1. Composición de los gases a salida de caldera

Las premisas de cálculo para la determinación de la cantidad de hidróxido cálcico necesaria para neutralizar los gases ácidos en un reactor que utiliza un sistema seco son los siguientes:

Parámetro	Uds.	Valor
Caudal Gases Húmedos por línea (15,7% Humedad)	Nm ³ /h	107.874
Caudal Gases Secos por línea	Nm ³ /h	90.971
Concentración HCl (gas seco)	mg/Nm ³	840
Concentración HF (gas seco)	mg/Nm ³	12
Concentración SO ₂ (gas seco)	mg/Nm ³	463
Temperatura de gases	°C	165

Tabla 15. Concentración de componentes ácidos en los gases de combustión

Las reacciones de captación de los ácidos que tienen lugar son las siguientes:



El peso molecular de cada uno de los compuestos que intervienen en las reacciones son los siguientes:

– Ca(OH) ₂ :	74
– HCl:	36,5
– HF:	20
– SO ₂ :	64
– H ₂ O:	18
– CaCl ₂ ·2H ₂ O:	147
– CaF ₂ :	38
– CaSO ₃ ·1/2H ₂ O:	129

2.7.1.2. Consumo de hidróxido cálcico.

Las cantidades de HCl, HF y SO₂ a captar por el hidróxido cálcico (por línea) se fundamentan en reducir las concentraciones de cada contaminante, para reducirlas en un 90% cada una.

Parámetro	Uds.	Valor
Captación de HCl: 756 mg/Nm ³	kg/h HCl	68,8
Captación de HF: 10 mg/Nm ³	kg/h HF	0,9
Captación de SO ₂ : 417 mg/Nm ³	kg/h SO ₂	37,9

Tabla 16. Cantidades de HCl, HF y SO₂ a captar por el hidróxido cálcico (por línea)

El consumo estequiométrico de Ca(OH)₂ por kg de ácido captado son:

- HCl: $(1 \times 74) / (2 \times 36,5) = 1,014 \text{ kg Ca(OH)}_2/\text{kg HCl}$
- HF: $(1 \times 74) / (2 \times 20) = 1,850 \text{ kg Ca(OH)}_2/\text{kg HF}$
- SO₂: $(1 \times 74) / (1 \times 64) = 1,156 \text{ kg Ca(OH)}_2/\text{kg SO}_2$

Se considera un exceso de reactivo de 3.

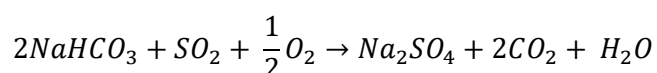
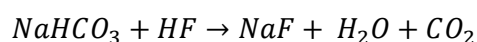
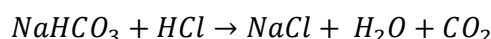
Con todo ello, los consumos por línea de Ca(OH)₂ con una pureza mínima del 90% serán:

Parámetro	Uds.	Valor
Consumo Ca(OH) ₂ para captación de HCl	kg/h	69,7
Consumo Ca(OH) ₂ para captación de HF	kg/h	1,7
Consumo Ca(OH) ₂ para captación de SO ₂	kg/h	43,9
Consumo Ca(OH)₂ estequiométrico	kg/h	115,3
Consumo Ca(OH)₂ Total	kg/h	346

Tabla 17. Consumo de hidróxido cálcico (por línea)

2.7.2. Consumo de bicarbonato sódico

Partiendo de que la composición de los gases a salida de caldera tiene las mismas características que las determinadas para el consumo de hidróxido cálcico, las reacciones de captación de los ácidos que tienen lugar son las siguientes:



El peso molecular de cada uno de los compuestos que intervienen en las reacciones son los siguientes:

– NaHCO ₃ :	84
– HCl:	36,46
– NaCl:	58,44
– HF:	20,01
– SO ₂ :	64,06
– H ₂ O:	18,02
– CO ₂ :	44,01
– NaF:	41,99
– O ₂ :	32
– Na ₂ SO ₄ :	142,04

Partiendo de que las cantidades de HCl, HF y SO₂ a captar por el bicarbonato sódico (por línea) quedan de igual manera que el apartado anterior, el consumo estequiométrico de NaHCO₃ por kg de ácido captado son:

- HCl: $(1 \times 84) / (1 \times 36,5) = 2,308 \text{ kg NaHCO}_3/\text{kg HCl}$
- HF: $(1 \times 84) / (1 \times 20) = 4,200 \text{ kg NaHCO}_3/\text{kg HF}$
- SO₂: $(2 \times 74) / (1 \times 64,1) = 2,621 \text{ kg NaHCO}_3/\text{kg SO}_2$

Se considera un exceso de reactivo de 1,5.

Con todo ello, los consumos por línea de NaHCO₃ con una pureza mínima del 90% serán:

Parámetro	Uds.	Valor
Consumo NaHCO ₃ para captación de HCl	kg/h	158,7
Consumo NaHCO ₃ para captación de HF	kg/h	4
Consumo NaHCO ₃ para captación de SO ₂	kg/h	99,4
Consumo NaHCO₃ estequiométrico	kg/h	262
Consumo NaHCO₃ Total	kg/h	395

Tabla 18. Consumo de bicarbonato sódico (por línea)

2.7.3. Consumo de carbón activo

Se estima una ratio de consumo de carbón activo para la eliminación de dioxinas y furanos de 0,4 kg por tonelada de residuo tratado en la PVE. Por lo tanto, se tiene que:

Parámetro	Uds.	Valor
Capacidad de tratamiento	t/h	18,75

Ratio consumo carbón activo	kg/t	0,4
Consumo carbón activo	kg/h	7,5

Tabla 19. Consumo de carbón activo (por línea)

2.7.4. Consumo de sosa cáustica por aplicación de scrubber

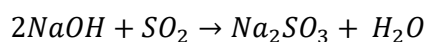
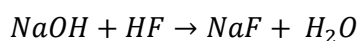
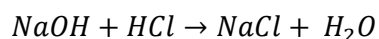
2.7.4.1. Composición de los gases a salida del filtro de mangas

Las premisas de cálculo para la determinación de la cantidad de hidróxido sódico necesario para neutralizar los gases ácidos en un scrubber son los siguientes:

Parámetro	Uds.	Valor
Caudal Gases Húmedos por línea (16,3% Humedad)	Nm ³ /h	108.700
Caudal Gases Secos por línea	Nm ³ /h	90.982
Concentración HCl (gas seco)	mg/Nm ³	84
Concentración HF (gas seco)	mg/Nm ³	1,2
Concentración SO ₂ (gas seco)	mg/Nm ³	46,3

Tabla 20. Concentración de componentes ácidos en los gases de combustión después del filtro de mangas

Las reacciones de captación de los ácidos que tienen lugar son las siguientes:



El peso molecular de cada uno de los compuestos que intervienen en las reacciones son los siguientes:

– NaOH:	40
– HCl:	36,5
– HF:	20
– SO ₂ :	64
– H ₂ O:	18
– NaCl:	58,4
– NaF:	42
– Na ₂ SO ₃ :	126

2.7.4.2. Consumo de Hidróxido de sodio (sosa cáustica)

Las cantidades de HCl, HF y SO₂ a captar por el hidróxido cálcico (por línea) se fundamentan en reducir las concentraciones de cada contaminante, para reducirlas del 90% hasta el límite bajo del rango de emisión de las MTDs:

Parámetro	Uds.	Valor
Captación de HCl: 82 mg/Nm ³	kg/h HCl	7,5
Captación de HF: 0,2 mg/Nm ³	kg/h HF	0,02
Captación de SO ₂ : 42 mg/Nm ³	kg/h SO ₂	3,8

Tabla 21. Cantidades de HCl, HF y SO₂ a captar por la sosa cáustica (por línea)

El consumo estequiométrico de NaOH por kg de ácido captado es:

- HCl: $(1 \times 40) / (2 \times 36,5) = 1,100 \text{ kg NaOH /kg HCl}$
- HF: $(1 \times 40) / (2 \times 20) = 2,000 \text{ kg NaOH /kg HF}$
- SO₂: $(1 \times 40) / (1 \times 64) = 1,250 \text{ kg NaOH /kg SO}_2$

Se considera un exceso de reactivo de 1,1.

Con todo ello, los consumos por línea de NaOH con una pureza mínima del 90% serán:

Parámetro	Uds.	Valor
Consumo NaOH para captación de HCl	kg/h	8,2
Consumo NaOH para captación de HF	kg/h	0,04
Consumo NaOH para captación de SO ₂	kg/h	4,8
Consumo NaOH estequiométrico	kg/h	13,1
Consumo NaOH Total	kg/h	14,4

Tabla 22. Consumo de sosa cáustica (por línea)

2.7.5. Consumo de amoníaco para reducción NO_x (SCR)

Se estima una ratio de consumo de amoníaco en disolución 25% para la reducción de los NO_x a través de una Reducción Catalítica Selectiva (SCR) de 3,2 kg por tonelada de residuo tratado en la PVE. Por lo tanto, se tiene que:

Parámetro	Uds.	Valor
Capacidad de tratamiento	t/h	18,75

Parámetro	Uds.	Valor
Ratio consumo amoníaco	Kg/t	3,2
Consumo amoníaco	Kg/h	60

Tabla 23. Consumo de amoníaco (por línea)

2.7.6. Cálculo de la producción de cenizas

Las cenizas se generan en:

- Cenizas del sistema horno-caldera (*boiler ash*)
- Cenizas volantes en el filtro de mangas (*fly ash*).
- Hidróxido cálcico y/o bicarbonato sódico no reaccionado.
- Sales generadas en la etapa de depuración de gases.

2.7.6.1. Cenizas de caldera

La producción esperada de cenizas producidas entre el horno y la caldera es de 2 g/Nm³ de gas húmedo de combustión. Con ello se tiene la siguiente producción de cenizas volantes por línea:

Parámetro	Uds.	Valor
Caudal Gases Húmedos por línea (15,7% Humedad)	Nm ³ /h	107.874
Ratio producción de cenizas	g/Nm ³	2
Producción de cenizas de caldera	kg/h	215,7

Tabla 24. Producción de cenizas de caldera (por línea)

2.7.6.2. Cenizas volantes

La recogida esperada de cenizas volantes en el filtro de mangas es de 3,02 g/Nm³ de gas húmedo de combustión. Con ello se tiene la siguiente producción de cenizas volantes por línea:

Parámetro	Uds.	Valor
Caudal Gases Húmedos por línea (15,7% Humedad)	Nm ³ /h	107.874
Ratio producción de cenizas	g/Nm ³	3,02
Producción de cenizas volantes	kg/h	325,8

Tabla 25. Producción de cenizas volantes (por línea)

2.7.6.3. Reactivo no reaccionado

Dependiendo del reactivo finalmente empleado como principal agente de neutralización de los gases ácidos —hidróxido cálcico o bicarbonato sódico—, el exceso de reactivo no reaccionado variará dentro del rango definido por los valores calculados para cada caso, los cuales se han determinado considerando un escenario de utilización exclusiva (100 %) de cada reactivo. Estos márgenes de diseño permiten garantizar el cumplimiento de los valores límite de emisión en condiciones operativas desfavorables.

2.7.6.3.1. Hidróxido cálcico no reaccionado

El peso del hidróxido cálcico no reaccionado es la diferencia entre el total consumido y el estequiométrico (ver apartado 2.6.1).

Parámetro	Uds.	Valor
Hidróxido cálcico consumido	kg/h	346
Hidróxido cálcico estequiométrico	kg/h	115,3
Hidróxido cálcico no reaccionado	kg/h	230,7

Tabla 26. Hidróxido cálcico no reaccionado (por línea)

2.7.6.3.2. Bicarbonato sódico no reaccionado

El peso del bicarbonato sódico no reaccionado es la diferencia entre el total consumido y el estequiométrico (ver apartado 2.6.2).

Parámetro	Uds.	Valor
Bicarbonato sódico consumido	kg/h	393
Bicarbonato sódico estequiométrico	kg/h	262
Bicarbonato sódico no reaccionado	kg/h	131

Tabla 27. Bicarbonato sódico no reaccionado (por línea)

2.7.6.3.3. Sosa cáustica no reaccionada

El peso del hidróxido de sodio no reaccionado es la diferencia entre el total consumido y el estequiométrico (ver apartado 2.6.4).

Parámetro	Uds.	Valor
Hidróxido de sodio consumido	kg/h	13,1
Hidróxido de sodio estequiométrico	kg/h	14,4

Hidróxido de sodio no reaccionado	kg/h	1,3
-----------------------------------	------	-----

Tabla 28. Hidróxido de sodio no reaccionado (por línea)

2.7.6.4. Producción de sales de diseño

A efectos del cálculo de las sales de diseño, aunque la reducción de emisiones se realiza en dos etapas —una principal con hidróxido cálcico y/o bicarbonato sódico ($\approx 90\%$) y una etapa final de ajuste con sosa cáustica hasta alcanzar el límite bajo—, se adoptará un criterio simplificado y conservador.

Para ello, se considerará que la totalidad de la eliminación necesaria hasta el valor límite se realiza exclusivamente mediante hidróxido cálcico, calculando las sales producidas como sales cálcicas.

Esta hipótesis permite situarse del lado seguro en la estimación de la producción de sales.

2.7.6.4.1. Sulfito cálcico hidratado ($\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)

Peso molecular $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ = 129

Peso molecular SO_2 = 64

$(129/64) (\text{g CaSO}_3/\text{g SO}_2) \times 0,458 \text{ g SO}_2/\text{Nm}^3 \text{ gas} \times \text{Caudal gases seco (Nm}^3/\text{h)} = \mathbf{84 \text{ kg/h}}$

2.7.6.4.2. Cloruro cálcico hidratado ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Peso molecular $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ = 147

Peso molecular HCl = 36,5

$(147/2 \times 36,5) (\text{g CaCl}_2/\text{g HCl}) \times 0,838 \text{ g HCl}/\text{Nm}^3 \text{ gas} \times \text{Caudal gases seco (Nm}^3/\text{h)} = \mathbf{153,5 \text{ kg/h}}$

2.7.6.4.3. Fluoruro cálcico (CaF_2)

Peso molecular CaF_2 = 38

Peso molecular HF = 20

$(38/2 \times 20) (\text{g CaF}_2/\text{g HF}) \times 0,011 \text{ g HF}/\text{Nm}^3 \text{ gas} \times \text{Caudal gases seco (Nm}^3/\text{h)} = \mathbf{0,9 \text{ kg/h}}$

2.7.6.5. Total cenizas

La cantidad total de cenizas generadas por línea queda como sigue:

Parámetro	Uds.	Valor
-----------	------	-------

Peso cenizas de caldera		Kg/h	215,7
Peso cenizas volantes		Kg/h	325,8
Peso hidróxido cálcico / bicarbonato sódico no reaccionado / sosa cáustica no reaccionada		Kg/h	232 – 133
Sales producidas	Peso total $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	Kg/h	84
	Peso total $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Kg/h	153,5
	Peso total CaF_2	Kg/h	0,9
Peso total cenizas (por línea)		Kg/h	1.020 – 920
Peso total cenizas		Kg/h	2.040 – 1.840

Tabla 29. Producción total de cenizas

2.7.7. Dimensionado de silos de reactivos y residuos

2.7.7.1. Dimensionado del silo de hidróxido cálcico

El hidróxido cálcico necesario para retener los ácidos contenidos en los gases de combustión se almacenará en un silo, cuyo dimensionado se realiza a continuación:

- Hidróxido cálcico consumido 2 x 346,0 kg/h
- Densidad Hidróxido Cálcico 350 - 500 kg/m³ (diseño 400 kg/m³)
- Días de acumulación mín. 7 días
- Sobredimensionado 10%

$$2 \times 346,0 \text{ kg/h} \times 24 \text{ h/d} \times 7 \text{ d} \times 1,1 / 400 \text{ kg/m}^3 = 320 \text{ m}^3$$

Se decide implantar un silo con una capacidad unitaria de 500 m³, con lo cual se tiene una capacidad de almacenamiento de 11 días.

2.7.7.2. Dimensionado del silo de bicarbonato sódico

El bicarbonato sódico necesario para retener los ácidos contenidos en los gases de combustión se almacenará en un silo, cuyo dimensionado se realiza a continuación:

- Bicarbonato sódico consumido 2 x 395 kg/h
- Densidad Hidróxido Cálcico 500 - 1300 kg/m³ (diseño 900 kg/m³)
- Días de acumulación mín. 7 días

- Sobredimensionado 10%

$$2 \times 395 \text{ kg/h} \times 24 \text{ h/d} \times 7 \text{ d} \times 1,1 / 900 \text{ kg/m}^3 = 163 \text{ m}^3$$

Se decide implantar un silo con una capacidad unitaria de 300 m³, con lo cual se tiene una capacidad de almacenamiento de 13 días.

2.7.7.3. Dimensionado del silo de carbón activo

El carbón activo necesario para retener las dioxinas y furanos contenidos en los gases de combustión se almacenarán en un silo, cuyo dimensionado se realiza a continuación:

- Carbón activo consumido 2 x 7,5 kg/h
- Densidad carbón activo 480 kg/m³
- Días de acumulación mín. 7 días
- Sobredimensionado 10%

$$2 \times 7,5 \text{ kg/h} \times 24 \text{ h/d} \times 7 \text{ d} \times 1,1 / 480 \text{ kg/m}^3 = 5,8 \text{ m}^3$$

Se decide implantar un silo con una capacidad unitaria de 25 m³, con lo cual se tiene una capacidad de almacenamiento de 30 días.

2.7.7.4. Dimensionado del silo de hidróxido sódico (sosa cáustica)

El hidróxido sódico necesario para retener los ácidos contenidos en los gases de combustión se almacenará en un silo, cuyo dimensionado se realiza a continuación:

- Bicarbonato sódico consumido 2 x 14,4 kg/h
- Densidad Hidróxido Cálcico 1500 - 1530 kg/m³ (diseño 1520 kg/m³)
- Días de acumulación mín. 7 días
- Sobredimensionado 10%

$$2 \times 14,4 \text{ kg/h} \times 24 \text{ h/d} \times 7 \text{ d} \times 1,1 / 1520 \text{ kg/m}^3 = 3,5 \text{ m}^3$$

Se decide implantar un silo con una capacidad unitaria de 25 m³, con lo cual se tiene una capacidad de almacenamiento de 50 días.

2.7.7.5. Dimensionado del tanque de amoníaco

El amoníaco en disolución necesario para la reducción de los NO_x contenidos en los gases de combustión se almacenarán en un tanque pulmón, cuyo dimensionado se realiza a continuación:

- Amoníaco consumido 2 x 60 kg/h
- Densidad NH₄OH 900 kg/m³
- Días de acumulación mín. 7 días
- Sobredimensionado 10%

$$2 \times 60 \text{ kg/h} \times 24 \text{ h/d} \times 7 \text{ d} \times 1,1 / 900 \text{ kg/m}^3 = 24,7 \text{ m}^3$$

Se decide implantar dos tanques con una capacidad unitaria de 30 m³, con lo que se tiene una capacidad de almacenamiento en torno a 17 días.

2.7.7.6. Dimensionado del silo de cenizas

Las cenizas recogidas de caldera y del sistema de depuración de gases se almacenarán en un silo pulmón previo a la instalación de humectación y ensacado, cuyo dimensionado se realiza a continuación:

- Cenizas generadas 2 x 1,020 t/h
- Densidad cenizas entrada a silo 700 kg/m³
- Días de acumulación 7 días
- Sobredimensionado 10%

$$2 \times 1,020 \text{ t/h} \times 24 \text{ h/d} \times 7 \text{ d} \times 1,1 / 0,7 \text{ t/m}^3 = 539 \text{ m}^3$$

Se decide implantar dos silos con una capacidad unitaria de 400 m³, con lo que se tiene una capacidad de almacenamiento en torno a 10 días.

2.8. Altura teórica de la chimenea.

A continuación se calcula la altura de las chimeneas del Sistema de Depuración de Gases según la fórmula de cálculo del Anexo II de la Orden de 18 de octubre de 1976, sobre prevención y corrección de la contaminación atmosférica de origen industrial.

2.8.1. Bases de diseño

- | | |
|--|--|
| – Caudal de gases húmedos | 110.845 Nm ³ /h (por línea) |
| – Humedad de los gases | 17,9% en volumen |
| – Caudal de gases secos | 90.982 Nm ³ /h (por línea) |
| – Concentración de O ₂ en gases secos | 9,4% en volumen |
| – Temperatura de los gases en chimenea | 135 °C |
| – Emisión de partículas sólidas | 2 mg/Nm ³ |
| – Emisión de SO ₂ | 5 mg/Nm ³ |
| – Emisión de NO _x | 50 mg/Nm ³ |

Las emisiones son referidas a un 11% de O₂ y gas seco.

$$H = \sqrt{\frac{AxQxF}{CM} \sqrt[3]{\frac{n}{VxT}}}$$

Expresándose H en metros y siendo:

A: Parámetro que refleja las condiciones climatológicas del lugar y cuya estimación se explica en el punto 5 del anexo II de la Orden de 18 de Octubre de 1976. En función de la estabilidad térmica vertical media o distribución media de la temperatura, y de la humedad en las capas de la atmósfera.

Q: Caudal máximo de sustancias contaminantes, expresado en kg/h.

F: Coeficiente sin dimensiones relacionado con la velocidad de sedimentación de las impurezas de la atmósfera. Para el SO₂ y otros contaminantes gaseosos de igual tipo, cuya velocidad de sedimentación es prácticamente nula, se tomará F=1. En el caso de partículas sólidas o impurezas pesadas, se tomará F=2.

CM: Concentración máxima de contaminantes, a nivel del suelo, expresada en mg/Nm³ como media de veinticuatro horas. Se determina como diferencia entre el valor de referencia fijado en el anexo I del Decreto 833/1975 de 6 de Febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972 de 22 de Diciembre, de protección del ambiente atmosférico para situaciones admisibles, y el valor de la contaminación de fondo, que se determina en base a los datos de calidad del aire de la estación de Hernani.

n: Número de chimeneas, incluida la que es objeto de cálculo, situadas a una distancia horizontal inferior a 2 Ha del emplazamiento de la chimenea de referencia. Se toma n=3, correspondiente a las dos chimeneas de las líneas de valorización energética más la chimenea del grupo eléctrico.

V: Caudal de gases emitidos, expresados en m³/hora.

T: Diferencia entre la temperatura de los gases a la salida de la chimenea y la temperatura media anual del aire ambiente en el lugar considerado, expresada en °C.

A: $70 \times Ic = 70 \times 7,41 = 518,7$ (Ic en Toledo).

2.8.2. Cálculo nº 1. Contaminantes partículas sólidas

F: 2

T: $135 - 16 = 119$ °C

$$V = 110.845 * \frac{135 + 273}{273} = 165.659 \text{ m}^3/\text{h}$$

n: 3

Cantidad de partículas sólidas:

$$90.982 \text{ Nm}^3/\text{hora} \times ((21-11)/(21-9,4)) \times 2 \text{ mg/Nm}^3 = 0,157 \text{ kg/h}$$

CM: CMA – CF.

CMA: De acuerdo con el Real Decreto 1321/1992, es de 150 microgramos/m³.

CF: Es el valor de fondo para partículas sólidas, se ha tomado 22 microgramos/m³.

CM: 150 - 22 = 128 microgramos/m³ = 0,128 mg/m³

$$H = \sqrt{\frac{518,7 * 0,157 * 2^3}{0,128}} \sqrt{\frac{3}{165659 * 119}} = 2,6 \text{ m}$$

2.8.3. Cálculo nº2. Contaminantes SO₂

F: 1

T: 135 – 16 = 119 °C

$$V = 110.845 * \frac{135 + 273}{273} = 165.659 \text{ m}^3/\text{h}$$

n: 3

Cantidad de partículas sólidas:

$$90.982 \text{ Nm}^3/\text{hora} \times ((21-11)/(21-9,4)) \times 5 \text{ mg/Nm}^3 = 0,392 \text{ kg/h}$$

CM: CMA – CF.

CMA: De acuerdo con el Real Decreto 1321/1992, es de 250 microgramos/m³.

CF: Es el valor de fondo para partículas sólidas, se ha tomado 7 microgramos/m³.

CM: 250 - 7 = 243 microgramos/m³ = 0,243 mg/m³

$$H = \sqrt{\frac{518,7 * 0,392 * 2^3}{0,243}} \sqrt{\frac{3}{165659 * 119}} = 2,99 \text{ m}$$

2.8.4. Cálculo nº3. Contaminantes Nox

F: 1

T: 135 – 16 = 119 °C

$$V = 110.845 * \frac{135 + 273}{273} = 165.659 \text{ m}^3/\text{h}$$

n: 3

Cantidad de partículas sólidas:

$$90.982 \text{ Nm}^3/\text{hora} \times ((21-11)/(21-9,4)) \times 50 \text{ mg/Nm}^3 = 3,922 \text{ kg/h}$$

CM: CMA – CF.

CMA: De acuerdo con el Real Decreto 1321/1992, es de 200 microgramos/m³.

CF: Es el valor de fondo para partículas sólidas, se ha tomado 33 microgramos/m³.

CM: 200 - 33 = 167 microgramos/m³ = 0,167 mg/m³

$$H = \sqrt{\frac{518,7 * 3,922 * 2^3}{0,167}} \sqrt{\frac{3}{165659 * 119}} = 11,4 \text{ m}$$

2.8.5. Comprobación del mínimo de impulso vertical convectivo (según punto 2 del anexo II de la Orden de 18.10.76)

$$T > 188 \frac{V^2}{H^2} \sqrt{S}$$

Siendo:

T: Diferencia en °C entre la temperatura de salida de humos en la base de la chimenea y la temperatura media de las máximas del mes más cálido en el lugar.

V: Velocidad de salida de los gases en la boca de la chimenea, en metros/segundos.

H: Altura, en metros, que según la fórmula propuesta resulta para la chimenea.

S: Sección interior mínima de la boca de salida de la chimenea, expresada en metros cuadrados.

Vamos a suponer una velocidad de gases de 14,644 m/s y una sección mínima de paso de 3,142 m² correspondiente a 2 m de diámetro.

$$T = 135 - 34 = 101 \text{ °C}$$

De la desigualdad se obtiene:

$$H = \sqrt{\frac{188 * 14,644^2 * \sqrt{3,142}}{101}} = 26,6 \text{ m}$$

H = 26,6 m

De acuerdo con los datos expuestos, la altura de la chimenea debe ser mayor de 26,6 m. Aun así, a partir de los cálculos realizados en el estudio de dispersión de contaminantes (ver Anexo 07. Análisis de dispersión atmosférica en escenario de emisiones mínimas (MTDs)), hemos establecido una altura de 70 metros para la chimenea. Esta altura garantiza una correcta dispersión de todos los contaminantes y asegura que la concentración se mantenga por debajo del 5% respecto al límite legal más estricto, aplicable a partir de 2030.

3. CONSUMO DE AGUA.

3.1. Planta de Valorización Energética.

3.1.1. Agua para enfriamiento de gases.

La cantidad de agua añadida para el enfriamiento de los gases a la salida de la caldera desde 165°C (temperatura máxima de salida de gases de la caldera) a 145°C (temperatura de reacción de la depuración) se obtiene de resolver el siguiente balance energético.

$$\text{Calor necesario para enfriamiento de gases} = \text{Calor a aportar por el agua}$$

$$\text{Caudal gas (Nm}^3\text{/h)} \times (165 - 145) \text{ (}^\circ\text{C)} \times 0,3396 \text{ (kcal/Nm}^3 \text{ }^\circ\text{C)} = \text{Masa}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ (kg/h)} \times 512 + \text{Masa}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ (kg/h)} \times (145 - 15) \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Teniendo en cuenta que el caudal de gases húmedos totales por línea a salida de caldera es de 107.974 Nm³/h, nos permite obtener la siguiente tabla resumen con la cantidad de agua necesaria para el punto nominal:

Parámetro	Uds.	Valor nominal
Consumo por línea	kg/h	1.141
Caudal horario de agua a aportar	m ³ /h	2,28
Consumo diario total	m³/d	55
Consumo total anual	m³/a	18.300
Tipo de agua		Servicios

Tabla 30. Consumo de agua para enfriamiento de los gases de combustión.

3.1.2. Agua para tratamiento de gases en el scrubber

La cantidad de agua utilizada en el scrubber para poder neutralizar los gases ácidos y garantizar la emisión en el límite inferior del rango establecido en las MTDs se ha determinado a partir del balance térmico y de masas del sistema.

La cantidad de agua necesaria en el scrubber se ha determinado a partir del balance térmico del sistema, considerando el enfriamiento de la corriente gaseosa y la transferencia de calor al agua de lavado.

El caudal de agua se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{agua} = \frac{Q_{gas}}{\Delta h_{agua}}$$

donde el calor cedido por los gases viene dado por:

$$Q_{gas} = V_{gas} \cdot C_p \cdot (T_{entrada} - T_{salida})$$

Siendo:

- $V_{gas} = 108.700 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (caudal de gases tras el enfriamiento previo),
- $C_p = 0,263 \text{ kcal/Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ (calor específico del gas a 90 °C),
- $T_{entrada} = 90^\circ\text{C}$,
- $T_{salida} = 60^\circ\text{C}$,
- Δh_{agua} = diferencia de entalpías del agua entre 25 °C y 100 °C.

De esta forma, el caudal de agua requerido resulta del equilibrio entre el calor cedido por los gases al descender 30 °C y el calor absorbido por el agua al calentarse desde 25 °C hasta aproximadamente 100 °C, obteniéndose un valor del orden de **2,86 t/h por línea**. Dentro del propio funcionamiento del scrubber, se contempla una reutilización interna del circuito del orden del 5,5 %, lo que da lugar a un consumo neto de agua de aproximadamente 2,7 t/h por línea. A continuación, se muestra una tabla con el resumen con las cantidades de agua necesarias:

Parámetro	Uds.	Valor nominal
Consumo por línea	kg/h	2.704
Caudal horario de agua a aportar	m ³ /h	5,41
Consumo diario total	m³/d	130
Consumo total anual	m³/a	43.300
Tipo de agua	Servicios	

Tabla 31. Consumo de agua para el tratamiento de gases en el scrubber

Como consecuencia del proceso de humidificación, el caudal másico y volumétrico de los gases experimenta un ligero incremento tras el scrubber, alcanzando valores del orden de 110.845 Nm³/h por línea, con una humedad aproximada del 18 % en volumen (base húmeda).

3.1.3. Agua para apagado de escorias.

La producción máxima de escoria húmeda prevista es de un 24% en peso respecto a la capacidad nominal de los hornos (37,5 t/h para un PCI de 2.448 kcal/kg). Una vez enfriada se espera que contenga un aprox. 20% de humedad. Las cantidades de agua necesarias para el enfriamiento y contenida en las escorias húmedas de las dos líneas se determinan como sigue:

Parámetro		Uds.	Valor nominal
Residuos		t/h	37,5
Porcentaje de escorias secas		%	19,2
Caudal escorias secas		t/h	7,2
Porcentaje de escorias húmedas		%	24
Caudal escorias húmedas		t/h	9
Contenido de agua en escorias		%	20
Caudal de agua en escorias		t/h	1,8
Temperatura de escorias	Inicial	°C	500
	Final	°C	50
Agua necesaria para refrigeración		t/h	1,05
Agua total para escorias		m³/h	3,05
Consumo anual		m³/a	24.500
Consumo medio diario		m³/d	67
Tipo de agua			Usadas

Tabla 32. Consumo de agua para el apagado de escorias.

3.1.4. Agua para reposición de purgas de caldera.

Se consideran unas purgas totales de 1,1% del caudal de vapor de entrada. La instalación de desmineralización tiene un consumo esperado de regeneración del 35%. Los consumos de agua para cada uno de los casos considerados son:

Parámetro	Uds.	Valor nominal
Consumo agua calderas	t/h	1,107
Consumo de regeneración	t/h	0,39
Consumo total horario	m ³ /h	1,49
Consumo anual	m³/a	12.000
Consumo medio diario	m³/d	33
Tipo de agua		Potable

Tabla 33. Consumo de agua para la reposición de purgas de caldera.

3.1.5. Acondicionamiento de cenizas.

La cantidad de agua necesaria para la humectación y compactado de las cenizas se estima en hasta un 15% respecto al peso de las cenizas resultantes del horno-caldera más el residuo resultante de la depuración de gases. De acuerdo al régimen de operación de la planta, los consumos de agua para cada uno de los casos considerados son:

Parámetro	Uds.	Valor nominal
Producción cenizas	t/a	996
Porcentaje de agua para humectación	%	15
Consumo horario de agua	m ³ /h	0,298
Consumo anual	m³/a	2.400
Consumo medio diario	m³/d	7
Tipo de agua		Usadas

Tabla 34. Consumo de agua para el acondicionamiento de cenizas.

3.1.6. Resumen consumos Planta de valorización energética.

Parámetro	Uds.	Valor Nominal
Enfriamiento de gases	m ³ /a	18.300
Scrubber	m ³ /a	43.300
Apagado de escorias	m ³ /a	24.500
Reposición purga de calderas	m ³ /a	12.000
Humectación de cenizas	m ³ /a	2.400
Total	m³/a	100.500

Tabla 35. Consumo total de agua de la Planta de Valorización Energética.

3.2. Agua para limpieza y baldeo.

Para el agua de limpieza y baldeo se han considerado los siguientes ratios con hidrolimpiadora.

- Rendimiento limpieza: 480 m²/h
- Caudal máximo hidrolimpiadora: 1 m³/h

A los efectos de dimensionado se han considerado los mismos rendimientos para baldeos manuales con manguera. En función de la frecuencia de limpieza de las distintas zonas, se obtiene:

	Frecuencia (días/sem)	Superf. (m ²)	Consumo (m ³ /día)	Consumo (m ³ /año)
- Zonas de naves				
Plataforma de descarga	7	5.010	10,4	3.800
Almacenamiento de reactivos	1	1.583	3,3	200
Área maquinaria PVE	1	8.512	17,7	950
Área maquinaria TMB	1	4.480	9,3	200
Oficinas/Taller/Almacén	1	1.848	3,9	250
- Zonas de viales				
Pavimentos	1	7.175	14,9	800
Viales	1	9.176	19,1	900
- Total (valores redondeados)			78,7	7.400

Tabla 36. Resumen de los distintos consumos en agua para limpieza y baldeo

3.3. Agua para riego.

Para el riego de zonas ajardinadas se estima un consumo de 1,5 litros/m²/día.

La superficie ajardinada es de aproximadamente 6.845 m² y se riega 1 vez/cada 15 días.

Por lo tanto, se consumirán **300 m³/año** de agua para riego.

3.4. Agua sanitaria.

Para el cálculo del consumo de agua sanitaria se ha considerado un ratio de consumo individual de 200 litros por persona y día, valor habitual en instalaciones industriales con uso de vestuarios y duchas.

Inicialmente, para la Planta de Valorización Energética (PVE), se estimó una plantilla de 44 personas. Con la incorporación de la planta de pretratamiento de residuos (150.000 t/año), que operará en dos turnos diarios con un turno adicional de reserva, se incrementa la dotación de personal hasta un total estimado de 60 trabajadores adscritos al conjunto de la instalación.

Considerando que cada trabajador realiza aproximadamente 1.800 horas anuales, el consumo anual de agua sanitaria resulta:

$$60 \text{ personas} \times 0,2 \text{ m}^3/\text{día} \times 165 \text{ días equivalentes/año}$$

lo que supone un consumo anual aproximado de: **2.700 m³/año**

Este valor se adopta a efectos de dimensionamiento de las instalaciones de abastecimiento y saneamiento. A diferencia de las otras corrientes de consumo de agua, el agua sanitaria es la única que no tiene un reaprovechamiento o evaporación, y se gestiona a través de una fosa séptica.

3.5. Agua de pluviales de cubiertas

Partiendo de que el área de captación proviene de los edificios de administración, de pretratamiento, plataforma de descarga, foso de residuos de la PVE, y edificio de horno-caldera y tratamiento de gases, tenemos un área de captación equivalente a 22.452 m².

Con objeto de caracterizar el régimen de precipitaciones extremas en el ámbito de estudio, se ha realizado un análisis a partir de las series diarias de precipitación disponibles en las estaciones consideradas de Aranjuez, Ocaña, Arganda del Rey y Tielmes.

A partir de dichas series, se han obtenido los valores máximos anuales de precipitación, construyendo una serie de extremos que recoge, para cada año, el episodio de lluvia diaria de mayor

magnitud registrado. Esta serie constituye la base para el análisis estadístico de precipitaciones máximas.

Como resultado de este análisis, se han obtenido los valores de precipitación máxima diaria P24 correspondientes a distintos periodos de retorno, que se resumen en la tabla siguiente:

T	P₂₄
2	36,96
10	56,92
50	77,20
100	86,96
200	97,36
500	111,40

Tabla 37. P24 a partir de series

Más tarde, Con el fin de contrastar los resultados obtenidos a partir del análisis de las series locales, se ha realizado una comparación con publicaciones oficiales de referencia sobre precipitaciones máximas en España, en particular con el documento "Máximas lluvias diarias en la España peninsular".

De la comparación se observa que, en general, los valores procedentes de la publicación oficial son superiores a los obtenidos a partir de los datos locales, especialmente para periodos de retorno elevados. Dado que el objetivo del presente estudio es el dimensionamiento de un sistema de almacenamiento con criterio de vertido cero, y por tanto con necesidad de garantizar un comportamiento robusto frente a episodios de lluvia intensa, se ha considerado más adecuado adoptar como referencia los valores procedentes de la publicación oficial.

Una vez definidos los valores de precipitación máxima diaria a partir de la publicación oficial, se ha realizado una estimación del volumen de escorrentía asociado a un evento extremo de lluvia, tomando como referencia un periodo de retorno de 100 años, en este caso es de 86,96 mm.

A partir de este valor, el volumen de agua captado en las cubiertas, y teniendo en cuenta una captación del 100% es de:

$$V_{100} = \frac{86,96}{1000} \cdot 22.452 = \mathbf{1.953 \, m^3}$$

Con carácter adicional, y a efectos de evaluar un escenario aún más desfavorable desde el punto de vista hidrológico, se ha considerado un evento extremo correspondiente a un periodo de retorno de 500 años, representativo de la máxima acumulación potencial de agua en condiciones excepcionales.

Bajo esta hipótesis, el volumen total de aguas pluviales captadas en cubiertas ascendería aproximadamente a 2.500 m³, lo que refuerza la robustez del dimensionamiento adoptado y la

capacidad del sistema para gestionar episodios de precipitación extraordinaria sin generar vertidos al exterior.

3.6. Agua de pluviales de viales

A la hora de realizar el cálculo de pluviales de viales, el procedimiento es el mismo que el anterior, simplemente modificando el área de captación, que en este caso es de 19.121 m².

Por su parte, las superficies correspondientes a viales, zonas de circulación y áreas pavimentadas exteriores se han considerado igualmente como superficies generadoras de escorrentía, si bien con un coeficiente de escorrentía ligeramente inferior (0,9), con el objeto de reflejar pérdidas asociadas a irregularidades superficiales, retenciones y otros fenómenos propios de este tipo de superficies.

Por lo tanto, tenemos que el área equivalente, aplicando el coeficiente de escorrentía, pasa a ser de 17.208,9 m². A partir de este valor, el volumen de agua captado en los viales es de:

$$V_{100} = \frac{86,96}{1000} \cdot 17208,9 = \mathbf{1.497 \text{ m}^3}$$

De forma análoga, para el caso de las aguas pluviales procedentes de viales, se ha considerado un escenario conservador que permite evaluar la capacidad del sistema frente a episodios de precipitación significativa. Bajo estas condiciones, el volumen de escorrentía recogido en estas superficies, teniendo en cuenta su carácter potencialmente contaminado y la necesidad de tratamiento previo, asciende aproximadamente a 1.920 m³ anuales.

Este valor se ha tenido en cuenta en el dimensionamiento del sistema de almacenamiento y tratamiento, garantizando una gestión adecuada de estas aguas y evitando cualquier vertido incontrolado al entorno.

4. CONSUMO DE GASOIL

4.1. Quemadores auxiliares de la Planta de Valorización Energética.

4.1.1. Para mantenimiento de condiciones óptimas de combustión

– Residuos a incinerar (nominal).....	37,5 t/h
– PCI de los residuos	2.448 kcal/kg
– PCI del gasoil.....	10.200 kcal/kg
– Densidad del gasoil.....	0,85 kg/litro
– % MCR	60%
– Horas seguidas de funcionamiento quemadores.....	24 h

Por tanto, la cantidad de gasoil consumida por los quemadores auxiliares se calcula como sigue:

$$37,5 \text{ t/h} \times 2.448 \text{ kcal/kg} \times 60\% \times 1.000 \text{ kg/t} = 55.080.000 \text{ kcal/h}$$

$$55.080.000 \text{ kcal/h} / 10.200 \text{ kcal/kg} = 5.400 \text{ kg/h}$$

$$5.400 \text{ kg/h} \times 24 \text{ h} = 129.600 \text{ kg} = \mathbf{152.471 \text{ litros}}$$

4.1.2. Para arranques y paradas

En caso de situación de emergencia, se quiere disponer de un depósito de gasoil con autonomía suficiente para no tener que repostarlo durante una parada y un arranque consecutivo de la PVE.

La cantidad de gasoil necesaria en esta situación se calcula a continuación:

– Residuos a incinerar (nominal).....	37,5 t/h
– PCI de los residuos	2.448 kcal/kg
– Duración parada.....	6 horas
– Duración arranque.....	12 horas
– % MCR parada.....	30%
– % MCR arranque	55%
– PCI del gasoil.....	10.200 kcal/kg
– Densidad del gasoil.....	0,85 kg/litro

Por tanto, la cantidad de gasoil que consumirían los quemadores auxiliares durante una parada y un arranque consecutivos sería:

$$37,5 \text{ t/h} \times 2.448 \text{ kcal/kg} \times 30\% \times 6 \text{ h} = 165.240.000 \text{ kcal}$$

$$37,5 \text{ t/h} \times 2.448 \text{ kcal/kg} \times 55\% \times 12 \text{ h} = 605.880.000 \text{ kcal}$$

$$(165.240.000 \text{ kcal} + 605.880.000 \text{ kcal}) / 10.200 \text{ kcal/kg} = 75.600 \text{ kg}$$

$$75.600 \text{ kg} / 0,85 \text{ kg/litro} = \mathbf{88.942 \text{ litros}}$$

4.2. Suministro de energía de emergencia.

En caso de cero eléctrico en la PVE, el sistema de suministro de energía de emergencia deberá alimentar, en situación de parada de dos líneas, como mínimo los ventiladores de tiro inducido, las bombas de agua de alimentación de caldera, el sistema de alimentación ininterrumpida y el alumbrado de emergencia. Se considera que con un motogenerador este suministro queda cubierto.

A efectos de cálculo del consumo de gasóleo, se considera un tiempo estimado de funcionamiento del sistema de suministro de energía de emergencia de 6 horas por episodio de emergencia, hasta alcanzar la situación de parada segura, y un número estimado de 2 paradas/año por fallo de red. Adicionalmente, se prevé la realización de pruebas mensuales de funcionamiento de 30 minutos, lo que supone un tiempo adicional de 6 horas/año.

Por tanto, el tiempo total anual de funcionamiento considerado es:

– Duración por parada de emergencia	6 horas
– Número de paradas de emergencia al año.....	2
– Tiempo anual por emergencias.....	12h /año
– Tiempo anual de pruebas periódicas.....	6 h/año
– Tiempo total anual de funcionamiento.....	18 h/año
– Potencia instalada en planta	3.780 kW

Por tanto, la cantidad de gasoil que se consumiría para el suministro de energía de emergencia sería:

$$\begin{aligned}
 &3.780 \text{ kW/h} \times 18 \text{ h/año} = 68.040 \text{ kWh/año} \\
 &68.040 \text{ kW} \times 3.600 \text{ kJ/kW} / 4.1868 \text{ kJ/kcal} = 58.503.870 \text{ kcal} \\
 &58.503.870 \text{ kcal} / 10.200 \text{ kcal/kg} = 5.736 \text{ kg} \\
 &5.736 \text{ kg} / 0,85 \text{ kg/litro} = \mathbf{6.748 \text{ litros}}
 \end{aligned}$$

4.3. Margen de seguridad

Adicionalmente, al consumo total estimado se le ha incorporado un margen del **5%**, con el fin de contemplar posibles variaciones operativas no recogidas explícitamente en los cálculos teóricos. Este incremento permite absorber desviaciones derivadas de condiciones transitorias de funcionamiento, ajustes en la operación, consumos auxiliares de carácter puntual y eventuales necesidades adicionales durante la explotación de la planta. De este modo, se garantiza un dimensionamiento más conservador y robusto del sistema, alineado con criterios de seguridad y continuidad operativa.

Esto se traduce en un consumo de **12.296 litros**.

4.4. Resumen anual de consumos de gasoil

Parámetro	Uds.	Valor Diseño
Quemadores auxiliares para mantenimiento de condiciones óptimas de combustión	litros	152.471
Quemadores auxiliares para arranques y paradas	litros	88.492
Suministro de energía de emergencia	litros	6.748
Margen de seguridad (5%)	litros	12.296
Consumo total (valor redondeado)	litros	260.000

Tabla 38. Consumo anual estimado de gasoil

Para el almacenamiento de gasóleo se prevé la instalación de dos depósitos de 100.000 litros, pese a que el consumo anual estimado es de 260.000 litros.

Esta configuración garantiza una autonomía suficiente, aporta redundancia operativa —permitiendo realizar tareas de mantenimiento en uno de los tanques sin afectar al suministro— y mejora la seguridad y la gestión logística del combustible. Asimismo, facilita la aplicación de las medidas de contención y protección exigidas por la normativa vigente.

De este modo, la solución de dos depósitos ofrece mayor fiabilidad y flexibilidad que un único tanque de gran volumen, manteniendo al mismo tiempo un margen adecuado de almacenamiento para la operación continuada de la instalación.

5. DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE AGUAS.

La instalación dispone de una red de almacenamiento compuesta por cinco depósitos y una fosa séptica, dimensionados en función de los distintos circuitos hidráulicos de la planta y de los usos asociados a cada uno de ellos. Esta configuración permite optimizar la gestión del recurso hídrico, favorecer su reutilización y garantizar el suministro en condiciones de seguridad.

Los elementos que conforman esta red son los siguientes:

- Depósito de agua potable: Se abastece desde la red de suministro y proporciona agua para los consumos sanitarios, así como para la reposición de pérdidas en el ciclo agua-vapor, principalmente asociadas a purgas de caldera.
- Depósito de agua contra incendios: Alimentado igualmente desde la red de agua potable, garantiza el caudal y la autonomía requeridos para los sistemas de protección contra incendios de la instalación.
- Depósito de aguas de servicios: Se alimenta prioritariamente de aguas pluviales procedentes de cubiertas y escorrentías. En caso necesario, puede complementarse con agua de red. Se destina a usos auxiliares como limpieza, baldeo, riego y determinados procesos de enfriamiento.
- Depósito de pluviales de cubiertas: Recoge las aguas de lluvia procedentes de superficies no contaminadas. Dado que estas aguas no entran en contacto con zonas de tránsito o focos potenciales de contaminación (tras paso por sistemas de desbaste), se consideran aptas para su reutilización directa en servicios internos, reduciendo así el consumo de agua potable.
- Depósito de aguas usadas de proceso: Recibe aportes de la red interna de aguas de proceso, incluyendo purgas de caldera, aguas de limpieza y lixiviados del sistema de apagado de escorias. Su función principal es el suministro de agua para el apagado de escorias y la humectación de cenizas.
- Depósito de pluviales de viales: Recoge las aguas de escorrentía de zonas de tránsito, que pueden arrastrar sólidos o hidrocarburos. Por ello, este flujo es tratado previamente mediante sistemas de decantación y separación de hidrocarburos antes de su almacenamiento. En caso de excedentes, se prevén interconexiones hidráulicas con otros depósitos del sistema, garantizando una gestión controlada de los alivios.
- Fosa séptica: Destinada a la recogida de aguas residuales sanitarias (aguas grises y negras) generadas en vestuarios y aseos. Su gestión se realizará mediante retirada periódica por gestor autorizado.

5.1. Depósito de Agua Potable.

Los consumos de agua potable son:

- Reposición purgas caldera 33 m³/día
- Agua sanitaria 7 m³/día
- Total 40 m³/día

Para el sobredimensionado del depósito de agua potable, y a fin de disponer de una capacidad suficiente para poder abastecer a otros puntos de la instalación con déficit de agua de servicios (p.e. durante el arranque desde cero de las instalaciones) se ha previsto adicionalmente los siguientes consumidores con agua de red:

- Enfriamiento gases de combustión 169 m³/día
- Total 209 m³/día

Para el dimensionamiento del depósito de agua potable se considera un volumen de resguardo de 5 días, con lo que se tiene que:

$$209 \text{ m}^3/\text{día} \times 5 \text{ días} = \mathbf{1045 \text{ m}^3}$$

Se escoge un **depósito de agua potable de 1100 m³**.

5.2. Depósitos de Aguas de Servicios.

Los consumos de agua potable son:

- Baldeos 20 m³/día
- Riego 1 m³/día
- Enfriamiento gases de combustión 169 m³/día
- Total 190 m³/día

Para el sobredimensionado del depósito de agua de servicios, y a fin de disponer de una capacidad suficiente para poder abastecer a otros puntos de la instalación con déficit de agua usadas o de proceso, se ha previsto adicionalmente los siguientes consumidores con agua de red:

- Apagado de escorias 67 m³/día
- Total 257 m³/día

Para el dimensionamiento del depósito de agua potable se considera un volumen de resguardo de 5 días, con lo que se tiene que:

$$257 \text{ m}^3/\text{día} \times 5 \text{ días} = \mathbf{1285 \text{ m}^3}$$

Se escoge un **depósito de agua de servicios de 1.350 m³**.

5.3. Depósitos de Aguas Usadas de Proceso.

El depósito de aguas usadas de proceso se dimensiona considerando tanto las demandas internas de consumo como las aportaciones generadas dentro del propio proceso, garantizando así un volumen suficiente para la correcta operación y gestión hidráulica de la planta.

Por un lado, los consumos asociados al uso de estas aguas son los siguientes:

- Apagado de escorias: 67 m³/día
- Humectación de cenizas: 7 m³/día
- Total consumos: 74 m³/día

Para estos usos, se considera un margen adicional del 25% con objeto de absorber posibles aportaciones adicionales, como reboses desde el depósito de aguas de servicios o variaciones operativas:

$$74 \text{ m}^3/\text{día} \times 1,25 = 92,5 \text{ m}^3/\text{día}$$

Adoptando un tiempo de almacenamiento de 5 días, el volumen requerido sería:

$$92,5 \text{ m}^3/\text{día} \times 5 \text{ días} = 462,5 \text{ m}^3$$

Por otro lado, las aportaciones de aguas al depósito procedentes del proceso son:

- Limpieza y baldeo: 20 m³/día
- Purgas de calderas y planta desmineralizadora: 33 m³/día
- Lixiviados de escorias: 9 m³/día
- Total aportaciones: 62 m³/día

Considerando en este caso un tiempo de retención de 7 días, se obtiene un volumen necesario de:

$$62 \text{ m}^3/\text{día} \times 7 \text{ días} = 434 \text{ m}^3$$

Por tanto, el dimensionamiento del depósito debe satisfacer simultáneamente ambas condiciones (consumo y generación), resultando como caso más desfavorable el primero de ellos, con un volumen requerido de 462,5 m³.

En consecuencia, se adopta un volumen de diseño de **500 m³**, que permite cubrir adecuadamente ambas situaciones, proporcionando además un margen adicional de seguridad frente a variaciones operativas, acumulaciones puntuales o condiciones excepcionales de funcionamiento.

5.4. Depósito de Agua Contra Incendios.

Caudal

Se contempla el caso más desfavorable: las instalaciones de mayor demanda funcionando simultáneamente.

– Rociadores.....	336 m ³ /h
– Cortinas de agua	83 m ³ /h
– Columna Hidrantes Exteriores (CHE)	120 m ³ /h
– Bocas de incendio equipadas (BIEs)	24 m ³ /h
– Monitores de agua	616 m ³ /h

Caudal necesario 1.533 m³/h

Reserva de agua

El tiempo de autonomía necesario, considerando que las instalaciones de mayor demanda podrían funcionar de manera simultánea, será el correspondiente al sistema con mayor tiempo de autonomía, que en este caso es de 90 minutos (Instalación de columna de hidrantes exteriores — CHE).

A continuación, se detallan los sistemas de protección activa previstos y sus características de caudal y autonomía:

– Rociadores.....	504 m ³ /h
– Cortinas de agua	124 m ³ /h
– Columna Hidrantes Exteriores (CHE)	180 m ³ /h
– Bocas de incendio equipadas (BIEs)	24 m ³ /h
– Monitores de agua	925 m ³ /h

Volumen necesario 2.362 m³/h

En el RSCIEI, el caudal necesario, o caudal del abastecimiento, es la suma del caudal requerido para los rociadores (o agua pulverizada o espuma), más el 50% del requerido para los hidrantes ($Q_{total} = Q_{rociadores} + 0,5 Q_{hidrantes}$). En todo caso, el valor calculado de Q_{total} deberá ser igual o mayor que $Q_{hidrantes}$.

En el caso que nos ocupa se debe tener en cuenta también el caudal de las cortinas de agua y los monitores en su totalidad. Por consiguiente, el caudal necesario es de 1.095 m³/h. El caudal de sobrecarga, que se dimensiona por seguridad como un 40% más del caudal nominal, siendo el

resultado de este: 1.533 m³/h. Esto se traduce en un volumen de 2.362 m³ teniendo en cuenta un 15% de coeficiente divergencia hidráulica y 25% de volumen no aprovechable. Finalmente se adopta un **depósito con un volumen de 2.500 m³ de capacidad**.

5.5. Depósito de pluviales de cubierta

El dimensionamiento del depósito de almacenamiento de aguas pluviales de cubierta se ha realizado mediante un enfoque basado en el balance hídrico a escala diaria, con el objetivo de reproducir de forma realista el comportamiento del sistema frente a la variabilidad temporal de las precipitaciones y su interacción con la demanda del proceso. Este enfoque supone una mejora significativa frente a los métodos tradicionales basados en eventos de lluvia aislados, ya que permite considerar no solo la magnitud de las precipitaciones, sino también su distribución temporal, la sucesión de episodios lluviosos y periodos secos, así como situaciones operativas desfavorables.

Para ello, se ha utilizado una serie temporal continua de precipitación a escala diaria, correspondiente a varios años hidrológicos completos, lo que garantiza la representatividad de los resultados. A partir de dicha serie, se han calculado las aportaciones de escorrentía generadas en la parcela mediante la aplicación de la superficie equivalente de captación, obteniendo así una serie de volúmenes diarios de entrada al sistema. Estas aportaciones se han confrontado con la demanda de agua del proceso, considerada constante e igual a 190,07 m³/día, valor representativo de las condiciones normales de operación.

El balance hídrico diario se ha formulado como la diferencia entre las entradas y las salidas del sistema, de acuerdo con la expresión:

$$Balance_d = Entrada_d - Demanda$$

donde $Entrada_d$ representa el volumen de escorrentía generado en el día d , y la demanda corresponde al consumo diario del proceso. A partir de este balance, se ha obtenido la evolución del volumen almacenado en el depósito mediante acumulación temporal, imponiendo la condición física de no negatividad, según la siguiente formulación:

$$V_d = \max(0, V_{d-1} + Balance_d)$$

Esta expresión permite reproducir el comportamiento real del sistema, de modo que el depósito se llena cuando las aportaciones superan la demanda y se vacía cuando ocurre la situación contraria, sin que en ningún caso pueda existir un volumen almacenado negativo. El análisis se ha estructurado por años hidrológicos, determinándose para cada uno de ellos el volumen máximo almacenado, el cual representa la capacidad necesaria del depósito para garantizar el funcionamiento sin vertidos en dicho periodo. El volumen de diseño se obtiene, por tanto, como el máximo de los volúmenes alcanzados en el conjunto de los años analizados.

Adicionalmente, con el fin de evaluar la sensibilidad del sistema frente a posibles variaciones en el régimen de precipitaciones, se han considerado escenarios de incremento de las aportaciones del 10% y del 20%, manteniendo constante la demanda del proceso. Los resultados obtenidos muestran un incremento progresivo del volumen necesario de almacenamiento:

Escenario	Volumen de cálculo (m³)	Volumen adoptado (m³)
Datos históricos	3107,5	3.250
Incremento +10%	3.439,8	3.500
Incremento +20%	3766,4	3.800

Tabla 39. Resultados del cálculo de dimensionado para depósito de cubiertas

A la vista de estos resultados, se ha seleccionado como criterio de diseño el escenario correspondiente al incremento del 20%, al considerarse representativo de una situación conservadora y coherente con posibles cambios futuros en el régimen de precipitaciones.

Asimismo, se han analizado escenarios de parada del proceso en los que no existe consumo de agua, lo que implica que la totalidad de las aportaciones de escorrentía se acumulan en el depósito. En estas condiciones, el balance hídrico queda reducido a la propia entrada de agua, según la expresión $Balance_d = Entrada_d$, lo que conduce a situaciones especialmente desfavorables desde el punto de vista del almacenamiento. Se han considerado periodos de parada de un mes y tres meses de duración, obteniéndose volúmenes máximos almacenados de:

Períodos de parada	Volumen de cálculo (m³)	Volumen adoptado (m³)
1 mes	4733,1	4.750
3 meses	8.961,6	9.000

Tabla 40. Volúmenes pésimos considerando periodos de parada para el depósito de cubiertas

En base a todo lo anterior, el volumen de diseño del depósito se ha fijado en **9.000 m³**, correspondiente al escenario más desfavorable analizado, que combina un incremento del 20% en las precipitaciones con una parada prolongada del proceso de tres meses. Este valor garantiza la capacidad del sistema para operar bajo el criterio de vertido cero tanto en condiciones normales como en situaciones excepcionales, incorporando además un margen de seguridad frente a la incertidumbre asociada a la evolución futura del régimen de precipitaciones.

5.6. Depósito de pluviales de viales

El dimensionamiento del depósito de almacenamiento de aguas pluviales procedentes de viales se ha realizado siguiendo la misma metodología de balance hídrico descrita en el apartador anterior, basado en el análisis de series temporales de precipitación y en la evaluación de la evolución del volumen almacenado a escala diaria.

En este caso, las aportaciones de escorrentía se han obtenido a partir de la superficie de viales considerada, resultando una serie temporal de volúmenes diarios de entrada al sistema. Estas

aportaciones se han confrontado con la demanda de agua asociada a [USO: por ejemplo, riego, limpieza, etc.], considerada constante durante el periodo de análisis.

El balance hídrico diario se ha planteado conforme a la expresión:

$$Balance_d = Entrada_d - Demanda$$

y el volumen almacenado se ha obtenido mediante acumulación temporal:

$$V_d = \max(0, V_{d-1} + Balance_d)$$

A partir de esta formulación, se ha determinado el volumen máximo almacenado a lo largo del periodo de estudio, que define la capacidad necesaria del depósito para garantizar el funcionamiento del sistema sin vertidos.

Para el escenario base, correspondiente a las condiciones actuales, se obtiene un volumen máximo de:

$$V_{base} = 1.497 \text{ m}^3$$

Asimismo, se han considerado escenarios de incremento de las aportaciones con el fin de evaluar la sensibilidad del sistema frente a posibles variaciones en el régimen de precipitaciones. En particular, se han analizado incrementos del 10% y del 20%, obteniéndose los siguientes resultados:

Escenario	Volumen de cálculo (m³)	Volumen adoptado (m³)
Datos históricos	2382,8	2.500
Incremento +10%	2637,6	2.750
Incremento +20%	2888	3.000

Tabla 41. Resultados del cálculo de dimensionado para depósito de viales

De acuerdo con el criterio adoptado en el conjunto del estudio, se selecciona como volumen de referencia el correspondiente al escenario más desfavorable.

Adicionalmente, se han analizado escenarios de parada del sistema, en los que no existe consumo y la totalidad de las aportaciones se acumulan en el depósito. Para un periodo de parada de 3 meses, se obtiene un volumen máximo de:

$$V_{parada} = 6.871 \text{ m}^3$$

En base a los resultados obtenidos, el volumen de diseño del depósito de pluviales de viales se fija en:

$$V_{diseño} = 7.000 \text{ m}^3$$

Este valor garantiza la capacidad del sistema para absorber las aportaciones generadas en condiciones desfavorables, manteniendo el criterio de vertido cero.

5.7. Dimensionamiento de la fosa séptica

El dimensionamiento de la fosa séptica se ha realizado a partir del consumo anual de agua estimado para los usos sanitarios de la instalación, garantizando una capacidad de almacenamiento suficiente que permita una adecuada gestión de los efluentes y una frecuencia razonable de vaciado por gestor autorizado.

Calculando un consumo anual de **2.700 m³/año**, correspondiente a los usos sanitarios del personal de la planta, se adopta un tiempo de retención de **25 días**, valor que permite asegurar un correcto funcionamiento del sistema y una adecuada decantación de sólidos.

En primer lugar, se calcula el caudal medio diario:

$$Q_{diario} = \frac{2.700 \text{ m}^3/\text{año}}{365 \text{ días}} = 7,40 \text{ m}^3/\text{día}$$

A continuación, se determina el volumen necesario de almacenamiento para un periodo de 25 días:

$$V = Q_{diario} \times 25 = 7,40 \text{ m}^3/\text{día} \times 25 \text{ días} = 185,0 \text{ m}^3$$

Por tanto, el volumen útil mínimo requerido para la fosa séptica es de **185 m³**.

A este volumen se le podrá añadir un margen adicional de seguridad (del orden del 10–20%) para considerar posibles puntas de consumo, acumulación de lodos y garantizar una mayor flexibilidad operativa. En consecuencia, se recomienda un volumen total de diseño de **200 m³**.

Este dimensionamiento asegura una autonomía suficiente del sistema, permitiendo espaciar las operaciones de vaciado y mantenimiento, y garantizando al mismo tiempo el correcto tratamiento primario de las aguas residuales generadas en la instalación.