

Planta experimental para el tratamiento
de los residuos de papelería y
concentración de salmueras:
conclusiones del proyecto RESALTTECH

Un artículo exclusivo de

Residuos 
profesional

Revista digital dedicada a la información, análisis
y debate en torno al sector de la gestión de residuos

Noticias_reportajes_opinión_vídeos_productos_agenda..., todo en:

www.residuosprofesional.com

Planta experimental para el tratamiento de los residuos de papelera y concentración de salmueras: conclusiones del proyecto RESALTTECH



Xavier Elias
Director de la Bolsa de
Subproductos de Cataluña

Santiago Sahuquillo Paul
TYPESA (Técnica y Proyectos, S.A.)

Resumen

El presente artículo es, de hecho, la segunda parte de la exposición del proyecto Life RESALTTECH, consistente en la generación de energía a partir de los residuos producidos en una papelera y con ella evaporar la salmuera resultante del sistema de membranas necesario para poder regenerar y reutilizar en el proceso de producción el agua efluente de la depuradora de la industria papelera.

El proyecto RESALTTECH está financiado por la Unión Europea a través del programa LIFE y ha sido realizado por un consorcio formado por cinco empresas: AIICA, centro tecnológico líder del proyecto; TECNOMA, ingeniería del grupo TYPESA responsable del diseño y de la construcción de la planta piloto; UIPSA, industria papelera donde se realizó el pilotaje; el Consell General de Cambres de Catalunya (CGCC), y la Agència Catalana de l'Aigua (ACA).

En la primera parte se describían las caracterizaciones de los residuos disponibles, a partir de los cuales se procedió a diseñar la planta piloto.

En esta segunda parte se describe la planta piloto ya construida justo a la puesta en marcha.

1. ANTECEDENTES

Al inicio del Proyecto Life+ RESALTTECH se publicó (en el número 125 de la revista RESIDUOS) la caracterización de los residuos de la papelera UIPSA así como las características del agua de proceso.

El proyecto RESALTTECH señala unos objetivos que son:

- Valorizar energéticamente los residuos de la industria papelera: tanto los residuos papeleros como el fango de la propia depuradora.
- Reutilizar el agua efluente de la depuradora de la papelera, en los procesos de fabricación de papel, mediante una ins-

talación de tratamiento terciario compuesta de procesos de filtración, ultrafiltración y ósmosis inversa.

- Evaporar el agua de rechazo de la planta de ósmosis inversa, aprovechando el calor generado en la valorización energética de los residuos, obteniendo vapor de agua que, condensado, se une al agua producto de la ósmosis inversa para su reutilización, y sal seca.
- Obtener un subproducto, la sal contenida en la salmuera, que puede utilizarse en otros procesos industriales como el curtido de la piel.

El presente artículo describe la línea de agua y de valorización energética de la planta piloto construida durante 2011.

2. DISEÑO DEL PROTOTIPO

La línea de agua del prototipo se diseñó para producir un caudal de agua en continuo, apta para ser reutilizada, de 3,2 m³/h, con una salinidad inferior a 100 mg/l, partiendo del agua efluente de la depuradora de la papelera, la cual tenía una salinidad media de 1.983 mg/l.

La línea de valorización energética se dimensionó para tratar en continuo un caudal másico de 50 kg/h de residuo del proceso de fabricación y de fango de la depuradora.

2.1. LA LINEA DE AGUA

El diagrama básico de bloques de la instalación para el tratamiento de agua es el representado en la **Figura 1**.

Descripción de la instalación

Las partes mas importantes de la instalación para la reutilización del agua de proceso son:

1. Pretratamiento:

- Depósito de agua de aporte.
- Equipo de dosificación de coagulante.
- Equipo de dosificación de floculante.
- Filtración sobre lecho de arena.
- Depósito de agua filtrada.
- Equipo de dosificación de ácido clorhídrico.
- Equipo de dosificación de hipoclorito sódico.
- Ultrafiltración.

2. Tratamiento por ósmosis inversa:

- Depósito de agua de aporte.
- Equipo de dosificación de reductor.
- Equipo de dosificación de antiincrustante.
- Filtración sobre cartuchos.
- Bombeo de alta presión.

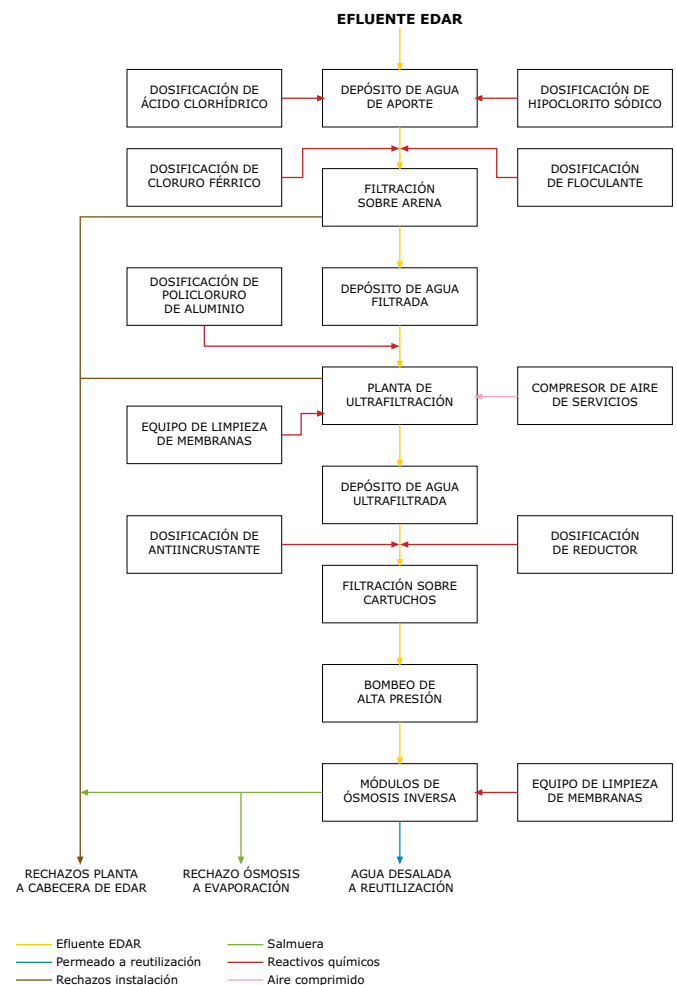
Depósito de agua de aporte

El agua de aporte, procedente de la salida de la EDAR de la papelera, se acumula en un depósito cilíndrico vertical de 1 m³ de capacidad. La función de este depósito es servir como pulmón para el tratamiento fisicoquímico y todos los procesos de los que consta la instalación.

El tanque está dotado de un agitador electromagnético cuya misión es evitar la deposición, en el fondo, de la materia en suspensión que pueda contener el agua de aporte y evitar de esta manera la cavitación de la bomba de envío a filtración.

El aporte de agua efluente de la EDAR al depósito, se realiza mediante una tubería procedente del bombeo de impul-

Figura 1. Diagrama de bloques de la línea de tratamiento de aguas



sión de agua depurada. En esta tubería se sitúa una válvula neumática, controlada por un juego de niveles instalados en el interior del tanque que regulan la apertura y cierre de la válvula para conseguir un nivel de agua constante en el depósito.

Del depósito de aporte, aspira una bomba encargada de enviar el agua a la filtración sobre arena y que parará en el caso de que se alcance nivel bajo en el depósito.

Dosificación de cloruro férrico

La misión del coagulante es la de desestabilizar las suspensiones coloidales, facilitando su aglomeración y haciendo que sean más fácilmente retenidas por el lecho de arena del filtro.

El equipo de dosificación está formado por un depósito construido en PAD, con un volumen de 250 litros y una bomba dosificadora de membrana que inyecta el reactivo en la tubería de aporte a filtración.

Dosificación de floculante

Está prevista la dosificación de un polielectrolito aniónico en el caso de que el empleo de un reactivo coagulante no sea suficiente por sí solo para producir una buena eliminación de coloides y de turbidez en el agua efluente de la filtración sobre arena.

El reactivo floculante actúa aglomerando los coloides desestabilizados y englobados en el coagulante, ya que tiene una carga eléctrica opuesta a la de los reactivos utilizados en el proceso de coagulación. Se trata de un reactivo líquido, previamente disuelto, ya que el escaso caudal de la planta de tratamiento no justifica la instalación de un equipo de preparación automática de reactivo. La dosis máxima de floculante aniónico es de 2 g/m^3 de producto puro.

Filtración sobre sílex

La filtración sobre lecho de arena silícica garantiza, en el caso de que no se dosifiquen reactivos químicos, una retención de las partículas y sólidos en suspensión por encima de los $100 \mu\text{m}$.

La tecnología empleada es la de filtración a contracorriente, con lavado en continuo del medio filtrante. En este tipo de filtros, el agua fluye de abajo arriba a través del lecho de arena filtrándose en este proceso y, abandonando el equipo mediante un vertedero de superficie. Al mismo tiempo, la arena que forma el lecho filtrante es succionada en continuo desde el fondo del filtro mediante una bomba tipo "mamut" hacia un lavador de arenas que se encuentra en la parte superior del filtro. Esto hace que el lecho tenga un movimiento permanente de arriba hacia abajo.

Figura 2. Filtración sobre arena



En el lavador, la arena es limpiada en contracorriente con agua filtrada limpia, cayendo una vez lavada sobre la superficie del lecho, volviendo a tomar parte en el proceso de filtración. El agua de lavado usada, junto con las impurezas extraídas, abandona el filtro por la parte superior del mismo vehiculándose hacia el drenaje de rechazos de la instalación.

La ventaja de la tecnología de filtración en contracorriente frente a la filtración convencional es que no se ha de parar el filtro cada vez que se requiera una limpieza del mismo. Esto es muy adecuado para el tratamiento terciario de aguas residuales donde, en el caso de instalar filtros de arena convencionales, la turbidez y el contenido en sólidos en suspensión del agua harían que las paradas para realizar operaciones de limpieza fueran bastante frecuentes, imposibilitando un funcionamiento en continuo de la instalación a menos que se contara con unidades de filtración en reserva.

La instalación cuenta con un filtro de funcionamiento en contracorriente con una superficie de filtración de $0,7 \text{ m}^2$, por lo que para un caudal de entrada de $4,5 \text{ m}^3/\text{h}$, la velocidad de filtración estará alrededor de $6,4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, que es adecuada para este tipo de aguas. La altura total del equipo es de 4 metros, y el volumen de arena de 2 m^3 .

Depósito de agua filtrada

El agua filtrada caerá por gravedad desde el filtro de sílex a un depósito cilíndrico vertical de 1 m^3 de capacidad. Este depósito servirá como pulmón para el funcionamiento de la planta de ultrafiltración.

Del depósito aspira una bomba centrífuga vertical construida en fundición con el eje en acero inoxidable que es la encargada de enviar el agua a la planta de ultrafiltración. La bomba es capaz de dar un caudal de $7,7 \text{ m}^3/\text{h}$ a una altura de 1 kg/cm^2 , presión suficiente para vencer las pérdidas de carga producidas por las tuberías de entrada a las membranas de ultrafiltración.

En la tubería de impulsión existe un caudalímetro electromagnético y una válvula de regulación manual con el objeto de regular el caudal de entrada a la unidad de ultrafiltración.

Dosificación de hipoclorito sódico

El hipoclorito sódico se dosifica en el agua de entrada al equipo de ultrafiltración, con el fin de eliminar la contaminación microbiológica del agua y evitar el ensuciamiento de las membranas de ultrafiltración y, posteriormente, las

de ósmosis inversa, por la formación de una película biológica (biofilm) en su superficie.

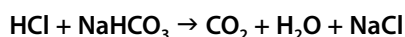
El cloro es el reactivo más utilizado para la desinfección del agua. Posee un poder oxidante remanente muy elevado, que favorece la destrucción de la materia orgánica. Su acción bactericida puede explicarse por la destrucción de las enzimas indispensables para la vida de los agentes patógenos.

La cantidad de hipoclorito sódico a dosificar es la necesaria para que a la salida de la unidad de ultrafiltración, la concentración de cloro libre esté alrededor de 0,5 mg/l. La dosificación máxima de hipoclorito sódico es de 5 g/m³ de producto puro.

Dosificación de ácido clorhídrico

Dado el alto contenido en alcalinidad en el agua efluente de la depuradora, existe el riesgo de que se produzca la precipitación de carbonatos de calcio y/o magnesio sobre la superficie tanto de las membranas de microfiltración como las membranas de ósmosis inversa.

Para evitar las incrustaciones de estas sales, se realiza una dosificación de ácido que disminuye el pH del agua de aporte, descomponiendo los carbonatos y bicarbonatos en dióxido de carbono. La reacción que tiene lugar es la siguiente:



El dióxido de carbono producido, como todos los gases, atraviesa las membranas, tanto las de ultrafiltración como las de ósmosis inversa, disuelto en el agua producto, provocando que ésta tenga un pH ácido.

Se ha escogido el ácido clorhídrico como reactivo para la acidificación del agua, ya que aunque tiene una menor concentración y un coste más elevado que el ácido sulfúrico, es mucho más fácil de manipular, por lo que lo se considera más adecuado dado el relativo bajo caudal de la planta de tratamiento.

Se dosifica ácido clorhídrico hasta que el pH alcance un valor de 6,4 unidades. Este valor es el máximo para que al concentrarse la salmuera en la planta de ósmosis inversa hasta el 80%, no se produzca la precipitación de carbonatos de calcio y magnesio sobre la superficie de las membranas. La dosis máxima de ácido clorhídrico a dosificar, según las analíticas del agua de aporte, está alrededor de los 400 g/m³ como producto puro.

Figura 3. Membranas de ultrafiltración



Equipo de ultrafiltración

El sistema de ultrafiltración está compuesto por dos unidades de módulos de membranas instalados de forma vertical en un bastidor que sirve de soporte del sistema. Cada módulo tiene una superficie unitaria de membrana de 55 m² y el conjunto de la planta se ha diseñado en base a un flujo de permeación estimado de 50 l m²/h.

La presión necesaria para que el agua atraviese las membranas se consigue a través de una bomba centrífuga de alimentación descargando el producto en el tanque de acumulación de permeado. Esta bomba está dotada de variador de frecuencia para conseguir un adecuado control del caudal, teniendo en cuenta una operación segura de las membranas de UF y la minimización del consumo energético. La filtración en las membranas se realiza de dentro a fuera, lo que significa que las sustancias se retienen en la superficie interior de las membranas de UF.

Para evitar la colmatación de las membranas durante los períodos de filtración en continuo, se realizan regularmente limpiezas hidráulicas y CEB's (Chemical Enhanced Backwash).

Depósito de aporte a planta de ósmosis inversa

El permeado de la unidad de ultrafiltración se acumula en un depósito cilíndrico vertical de 7,5 m³ de volumen. Este tanque sirve como pulmón para alimentar la planta de ósmosis inversa y para acumular el volumen suficiente de permeado de la unidad de ultrafiltración para efectuar los contralavados de la misma.

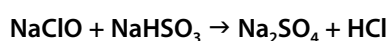
Del depósito, aspira una bomba centrífuga vertical construida en acero inoxidable que es la encargada de enviar el

agua a la planta de ósmosis inversa. La bomba es capaz de dar un caudal de 4 m³/h a una altura de 3 kg/cm², presión suficiente para vencer las pérdidas de carga producidas por las tuberías y por el filtro de cartuchos, aun cuando este esté colmatado (1,5 kg/cm² de pérdida de carga máxima estimada). El funcionamiento de la bomba está comandado por los niveles situados en el depósito.

En la tubería de impulsión, existe un caudalímetro tipo rotámetro y un manómetro con el objeto de regular el caudal de entrada a la unidad de ósmosis inversa y la presión de entrada al filtro de cartuchos.

Dosificación de reductor

La misión de la dosificación de reductor, habitualmente bisulfito de sodio (NaHSO₃), es eliminar el cloro libre residual que queda en el agua efluente de la unidad de ultrafiltración, u otros oxidantes fuertes que puedan estar presentes en el agua de aporte, dado que las membranas de poliamida presentan una baja resistencia frente a ellos. La reacción que tiene lugar entre el cloro libre y el bisulfito sódico es la siguiente:



La dosis de metabisulfito sódico, varía en función de la cantidad de cloro libre presente en el agua de aporte a la planta de ósmosis inversa.

La cantidad de este reactivo será la necesaria para que el potencial de oxi/reducción del agua esté por debajo de 400 mV, ya que a partir de este valor se empiezan a detectar trazas de compuestos oxidantes en el agua.

Dosificación de antiincrustante

Con la composición del agua de aporte a la instalación es necesario añadir un reactivo antiincrustante, para evitar las precipitaciones en la superficie de las membranas, no sólo de carbonatos de calcio y/o magnesio, sino también de otras sales como el sulfato de bario o estroncio.

La adición de este reactivo contribuye a reducir la dosis de ácido clorhídrico, ya que su dosificación permite trabajar a valores del índice de Langelier (LSI) en la salmuera de hasta 1,8. El reactivo antiincrustante actúa distorsionando los cristales que puedan formarse de compuestos inorgánicos insolubles, evitando su precipitación y su crecimiento arrastrándose con el agua de rechazo. Se usa un antiincrustante orgánico, sin embargo el equipo puede dosificar otros reactivos *antifouling* especializados como el hexametafosfato (HMP).

Dada la analítica del agua, se calcula que la dosis máxima de reactivo a dosificar estará en torno a los 4 g/m³ de antiincrustante orgánico.

Filtro de cartuchos

Este es el último tratamiento que recibe el agua antes de pasar por las membranas de ósmosis inversa. Su misión consiste en evitar que entren en el sistema partículas discretas que pudieran dañar las membranas de ósmosis inversa.

Puesto que el agua ha pasado antes por un equipo de ultrafiltración, la misión de la filtración sobre cartuchos es la de prevenir cualquier fallo en esta unidad que haga que lleguen a la planta de ósmosis inversa aguas muy cargadas en materia en suspensión que puedan provocar el ensuciamiento de las membranas.

Control de la calidad del agua de aporte a ósmosis

En el colector de salida de los filtros de cartucho, se disponen los siguientes elementos de control analítico del proceso de la instalación:

- Conductímetro con indicación en panel de control.
- Termómetro de indicación local.
- Sonda de potencial de óxido reducción, con indicación en el panel de control que detiene la instalación en el caso de que se supere el valor de 400 mV, evitando que lleguen compuestos oxidantes a las membranas.
- PHmetro, con indicación en el panel de control, que también para la instalación, en el caso de que el valor del pH del agua de aporte a la planta esté por encima o por debajo de un rango de valores preestablecido.
- Caudalímetro tipo rotámetro de indicación local.
- Presostato con alarma de baja que para la instalación en el caso de que la presión de entrada a la bomba de alta presión sea inferior a 1 bar, para evitar la cavitación de la misma.

La instrumentación analítica se sitúa en una derivación de la tubería de proceso, a fin de garantizar un caudal laminar y constante que no afecte a la medición de los parámetros.

Bombeo de alta presión y módulos de ósmosis inversa

El proceso de desalinización por ósmosis inversa se basa en el paso de agua a través de una membrana semipermeable, rechazando las sales que contiene. Para llevar a cabo este proceso se debe vencer la presión osmótica de la disolución, que depende directamente del contenido en sales disueltas (TDS). Además, y para producir una cantidad determinada de agua, es preciso aplicar una sobrepresión.

Figura 4. Módulos de ósmosis inversa

El resultado de sumar la presión osmótica, la sobrepresión de producción y las pérdidas de carga de la instalación, es la presión de trabajo que debe proporcionar la bomba de alta presión.

La capa activa de las membranas está constituida por poliamida aromática soportada en una capa de polisulfona. Estas membranas están montadas en arrollamiento espiral sobre un tubo de PVC, donde se recoge el agua de producto.

Las membranas se disponen en conjuntos de seis unidades en serie dentro de una misma carcasa (contenedor). De esta manera, el agua bruta penetra por uno de los extremos del contenedor atravesando axialmente el primer elemento. El agua permeada pasa al colector central que ocupa el eje

El proceso de ósmosis inversa se basa en el paso de agua a través de una membrana semipermeable rechazando las sales que contiene.

geométrico de la carcasa por donde es recogida. El agua de rechazo pasa al siguiente elemento, donde se produce el mismo fenómeno y así sucesivamente hasta el sexto elemento. El agua de rechazo del sexto elemento se recoge en el otro extremo de la carcasa.

El rechazo de los contenedores de primera etapa se recoge en un colector que alimenta los contenedores de la segunda etapa, aprovechando la presión residual del agua. Los permeados de cada una de las etapas se extraen en colectores independientes, mezclándose posteriormente

en el colector general de agua producto. Las bombas son capaces de alcanzar 16 bar, para prever cualquier tipo de empeoramiento en las condiciones del agua de aporte.

El sistema está diseñado para una producción de 3,2 m³/h. a 15 °C. Debe tenerse en cuenta el efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las membranas, dado que existe una relación aproximada entre incremento o descenso de la temperatura del 3% producción/°C.

Equipo de limpieza química de membranas

Pese a las protecciones indicadas en el pretratamiento, las membranas de ósmosis inversa sufren ensuciamientos que obligan a su limpieza química con una frecuencia aproximada de 3-4 veces por año. La frecuencia de los lavados depende de la naturaleza del agua. Como valor promedio puede decirse que es preciso lavar las membranas una vez cada cuatro meses. El lavado es sencillo y su duración de 4-6 horas, si se efectúa una limpieza secuencial completa.

Para lavar las membranas se prepara en una cuba una serie de reactivos (detergentes, ácido cítrico, NaOH, EDTA, etc.), en función de la naturaleza del ensuciamiento y de las membranas instaladas, recirculándose durante un tiempo determinado la solución de limpieza preparada para arrancar la suciedad depositada sobre las membranas.

El equipo de limpieza está formado por un depósito con un volumen de 500 litros del que aspira una bomba electromagnética, capaz de vehicular un caudal de 8 m³/h a una presión de 4 bar.

La bomba envía la solución de limpieza hacia los módulos de ósmosis inversa, haciéndola pasar previamente por un filtro de cartuchos de características similares al instalado antes de la bomba de baja presión, para retener la suciedad arrancada de la superficie de las membranas de ósmosis inversa y evitar que vuelvan al sistema.

Antes y después del filtro de cartuchos, se colocan sendos manómetros para controlar el grado de colmatación de los cartuchos, y en la tubería de impulsión de la bomba existe un caudalímetro tipo rotámetro para controlar el caudal de lavado.

2.2. LA LINEA DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA

Los residuos a valorizar energéticamente proceden de dos fuentes:

- Residuos de papelera procedentes del hidropulper.
- Fangos de la EDAR del agua de proceso de la industria.

La línea de valorización energética de los residuos de fabricación de papel y de los fangos de la EDAR de UIPSA, está compuesta por los siguientes equipos:

1. Pretratamiento de los residuos:

- Triturador.
- Secador rotativo.

2. Combustión:

- Horno rotativo.
- Cámara de postcombustión.

3. Tratamiento de gases.

- Dosificación de bicarbonato sódico.
- Ciclón.

4. Tratamiento de la salmuera.

- Atomizador.

Descripción de la instalación

En los apartados siguientes se describen las principales partes de la planta piloto para la valorización energética.

Trituración de los residuos

Dado el tamaño y el elevado contenido en metales de los residuos del proceso de fabricación de pasta de papel, se

Figura 5. Diagrama de bloques de la línea de valorización energética

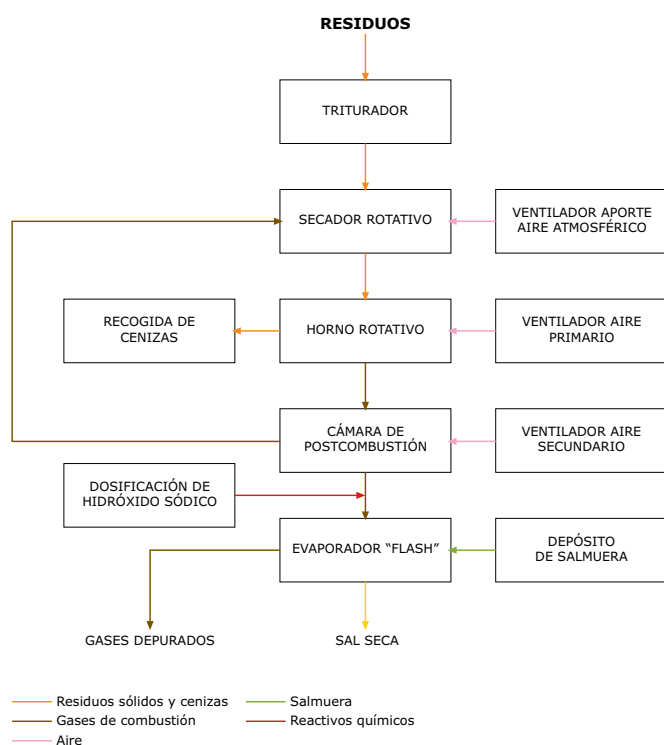


Figura 6. Sistema dosificador de residuos papeleros



hace necesaria una preselección y una posterior trituración de los mismos para homogeneizarlos y evitar daños en los equipos de transporte y de combustión.

En primer lugar, los residuos, previamente seleccionados, se cargan en un equipo de trituración que reduce el tamaño de los mismos hasta un valor medio de 25 mm.

La carga se efectúa de manera manual mediante un big-bag de 1 m³ de capacidad que se sitúa en un armazón metálico sobre una tolva rectangular con unas dimensiones de 600x400 mm y una capacidad aproximada de 800 litros.

Los residuos triturados caen en la tolva de alimentación al equipo de secado, parándose automáticamente el funcionamiento de la trituradora si esta tolva está llena. El triturador tiene una capacidad máxima de tratamiento de 50 kg/h y está accionado por un motor con una potencia instalada de 2 kW.

Secador rotativo

Tanto los residuos de fabricación de la pasta de papel como los fangos de la depuradora de UIPSA tienen un alto contenido en humedad. Así, para los residuos, su contenido en agua se estima alrededor del 40%, y en los fangos de depuradora su humedad puede llegar al 70%.

El mecanismo del secado es por convección. Así, dentro del secador se hace circular, sobre la superficie de los residuos, una corriente de gases calientes en sentido opuesto a la circulación de los mismos, de manera que el gas transmita calor al sólido, provoque la evaporación del agua contenida en el mismo y lo arrastre en la corriente de gases.

Los residuos del proceso de producción de pasta de papel y los fangos biológicos entran al secador rotativo de forma independiente. Así, los residuos procedentes del equipo de trituración se descargan sobre una tolva rectangular, desde donde un transportador del tipo tornillo sinfín introduce el material en el secador rotativo. El motor del transportador, está dotado de un variador de velocidad para ajustar la cadencia de entrada de los residuos al equipo de secado.

Por su parte, los fangos biológicos se introducen en la tolva de alimentación de manera manual. Asimismo, en el fondo de la tolva hay un tornillo sinfín que introduce los fangos en el equipo de secado. La carga de los fangos puede regularse mediante un variador de velocidad que actúa sobre el motor del tornillo sinfín.

La temperatura prevista de secado es de 80 °C, aunque el sistema permite la regulación a otras temperaturas si así lo requiere el proceso. El calentamiento se realiza mediante gases provenientes de la cámara de postcombustión debidamente diluidos.

Se consigue la temperatura de trabajo de 80 °C mediante un ventilador a la entrada de la corriente de gases, cuyo funcionamiento está controlado por una sonda de temperatura situada en el interior del equipo. El motor del ventilador está accionado por un variador de velocidad y aspira conjuntamente gases procedentes de la cámara de postcombustión y aire ambiente.

Asimismo, si el programa de control de la planta detecta que la tolva de carga del horno rotativo está llena, se detiene la alimentación al equipo de secado. El equipo va provisto de una sonda de humedad situada en la salida del producto seco. Los residuos secos de salida del equipo caen en la tolva de alimentación al horno rotativo.

Los gases de escape del secador se evacúan mediante una chimenea cilíndrica situada en el lado de la alimentación.

El equipo de secado tiene geometría cilíndrica con una longitud total de 3.000 mm y 500 mm de diámetro exterior. Está construido en acero dulce tratado, soportado por una estructura a base de perfiles de acero laminado en frío protegida con pintura epoxídica para evitar la corrosión.

El aislamiento del equipo se realiza mediante fibras minerales y cerámicas de baja masa térmica dispuestas en estratos con un espesor total de 5 cm.

El movimiento rotativo del secador se consigue mediante

un motor de 1 kW de potencia instalada, situado en el eje del equipo, en el lado contrario al de la alimentación de los residuos. Este motor proporciona al secador una velocidad de giro, regulable por variador de velocidad, entre 2 y 5 rpm. Para facilitar el movimiento de los sólidos dentro del equipo el secador tiene una inclinación hacia el lado de la salida del producto seco del 5%.

Cámara de combustión

Los residuos deshidratados en el secador caen en la tolva de alimentación al horno rotativo.

Los residuos acumulados en la tolva alimentan, a su vez, a un transportador del tipo tornillo sinfín que introduce el material en la cámara de combustión. El motor de accionamiento del transportador está dotado de un variador de velocidad para ajustar la cadencia de entrada de material al horno rotativo.

En el régimen normal de trabajo, la temperatura en el interior del horno se mantiene entre 850 y 900 °C. Además, trabajando por debajo de 900 °C se evita la formación de óxidos de nitrógeno (NOx.)

La combustión de los residuos se inicia mediante el calentamiento de los mismos por medio de un quemador, situado en el lado opuesto al de la alimentación de la mezcla de residuos y fangos. La potencia del quemador es suficiente

Los gases producidos necesitan una depuración térmica que se realiza en cumplimiento de la normativa sobre incineración de residuos.

para mantener de forma indefinida una temperatura en el interior del horno de 1.100 °C, incluso sin aporte de materias a incinerar o con cargas de materiales de hasta 40 kg/h cuyo PCI sea inferior a 1.000 kcal/kg.

El quemador usa como combustible gasóleo y tiene una potencia de 100.000 kcal/h. Para activar y mantener la combustión, se dispone de dos caudales de aire: primario y secundario-terciario. El aire primario entra por debajo del quemador, refrigerando éste a través de su perfil acanalado, activando y mejorando la combustión.

El aire secundario o de recombustión, es distribuido por toberas en todo el contorno del hogar, aportando oxígeno a la combustión y recombustionando los gases de destilación del residuo y las partículas sólidas en suspensión.

Asimismo, el caudal de aire secundario protege las paredes del hogar evitando la adherencia a las mismas de productos fundentes.

El aire terciario, insuflado por las correspondientes toberas, se incorpora en el conducto de salida de la cámara de combustión, centrifugando los gases y reteniendo las partículas, dando tiempo a su combustión final.

Las cenizas producidas durante la combustión de los residuos se acumulan sobre un recipiente de forma rectangular extraíble incluso con el equipo en funcionamiento. La capacidad de almacenamiento de cenizas es de, aproximadamente, 50 kg.

El horno tiene una geometría cilíndrica con unas dimensiones de 2.500 mm de longitud cilíndrica, 3.500 mm de longitud total y 600 mm de diámetro interior, con un volumen útil de 700 litros.

La cámara de combustión está construida con hormigones refractarios de alta resistencia mecánica. El aislamiento térmico del horno se consigue mediante fibras minerales y cerámicas de baja masa térmica y gran poder aislante dispuestas en estratos.

El movimiento rotativo de la cámara de combustión se consigue mediante un motor de 3 kW de potencia instalada, situado en el eje del equipo, en el lado contrario de la alimentación de los residuos. Este motor proporciona al horno una velocidad de giro, regulable por variador de velocidad, entre 2 y 5 rpm. Para facilitar el movimiento de los sólidos dentro del equipo, el horno tiene una inclinación hacia el lado contrario a la alimentación del 5%.

Cámara de postcombustión

Los gases producidos en la incineración de residuos necesitan una depuración térmica que se realiza en cumplimiento del Real Decreto 653/2003, que transpone la Directiva Europea 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de diciembre de 2000, relativa a la incineración de residuos.

El principio de funcionamiento de la cámara de postcombustión se basa en el craqueo de los hidrocarburos de cadena larga que todavía pueden permanecer en los gases.

Los gases generados en la combustión de los residuos, conjuntamente con el aire introducido en el horno, pasan, mediante una tubería situada en el lado de la alimentación de los residuos en el horno, a la cámara de postcombustión, donde permanecen un mínimo 2 segundos a una tempe-

Figura 7. Horno rotatorio [parte inferior] y cámara de postcombustión



ratura que permita destruir los compuestos orgánicos que puedan estar presentes en los gases. La temperatura de funcionamiento de esta cámara se mantiene en un margen de entre 850 y 900 °C.

No obstante lo indicado en el párrafo anterior, si los residuos incinerados en la cámara de combustión tuvieran un contenido de más del 1% de sustancias halogenadas, expresadas en cloro, la temperatura debería elevarse hasta un mínimo de 1.100 °C.

En la cámara de postcombustión, en el lado opuesto al de la entrada de los gases, se sitúa un ventilador cuyo funcionamiento está gobernado por un controlador que actúa en función de la señal que proporciona una sonda de medición en continuo de oxígeno, situada en la tubería de entrada de gases de la cámara.

En la salida de gases de la cámara de postcombustión y directamente embridada a la misma, existe un tramo de unión, con protección interna de refractario, donde se incorporan unas toberas de refrigeración. Este conducto posee la sección de salida adecuada para evacuar correctamente los gases al sistema de depuración de gases.

En la tubería de salida de gases de la cámara de postcombustión existen medidores registradores de hidrocarburos totales, partículas y opacidad. Si cualquiera de los valores medidos sobrepasa los aceptables, se detiene automáticamente el proceso de incineración.

La cámara de postcombustión tiene una geometría cilín-

drica, con unas dimensiones similares a la cámara de combustión. Así, tiene una longitud cilíndrica de 2.500 mm, una longitud total de 3.500 mm y 900 mm de diámetro exterior, con un diámetro interior de 600 mm, lo que supone un volumen útil de 700 litros.

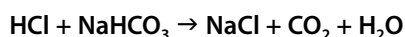
La cámara de postcombustión está construida con hormigones refractarios de alta resistencia mecánica. El aislamiento se realiza mediante fibras minerales y cerámicas de baja masa térmica y gran poder aislante dispuestas en estratos.

El conjunto horno – cámara de postcombustión está soportado por una estructura metálica, a partir de chapas y perfiles de acero laminado, recubiertos de una capa de pintura epoxídica para evitar su corrosión.

Dosificación de bicarbonato sódico

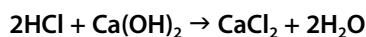
Debido principalmente a la presencia de cloro en una proporción cercana al 0,5% en los residuos del proceso de fabricación de pasta de papel, en el proceso de combustión se generan gases ácidos (ácido clorhídrico, HCl). El límite de emisión de estos gases a la atmósfera es de 10 mg/Nm³.

Para eliminar el ácido clorhídrico se realiza una dosificación por vía seca de un reactivo básico en polvo (bicarbonato sódico) para que reaccione con el gas y lo neutralice, siendo retirado el reactivo posteriormente mediante un dispositivo para la eliminación de partículas. La reacción de neutralización que tiene lugar entre el ácido clorhídrico y el bicarbonato sódico es la siguiente:



Los gases han de estar en contacto con el bicarbonato sódico durante dos segundos a temperaturas mayores de 140 °C para conseguir la neutralización completa. El tiempo de retención necesario se consigue situando una cámara de contacto del reactivo con el gas en la tubería de salida de gases de la cámara de postcombustión.

Por encima de los 300 °C, la reacción del bicarbonato sódico con los gases ácidos no es tan efectiva, por lo que se deberá dosificar una cantidad mayor de este reactivo o dosificar otros productos alcalinos como el hidróxido sódico. En este caso, la reacción que tiene lugar es la siguiente:



El equipo de dosificación está formado por un depósito de almacenamiento del bicarbonato sódico, una bomba de

tornillo excéntrico que impulsa el reactivo y un ventilador que dispersa el reactivo en la tubería antes de la cámara de mezcla.

Ciclón

Para la eliminación de las partículas y de las cenizas volantes que puedan arrastrar los gases de salida de la cámara de postcombustión, así como de las sales generadas en el proceso de eliminación de ácido clorhídrico, hay instalado después de la cámara de reacción de los gases con el bicarbonato sódico, un separador de partículas tipo ciclón. El ciclón elimina eficazmente partículas por encima de los 5 µm de diámetro. Las partículas de un tamaño menor, quedarán retenidas en el equipo de atomización del rechazo de la planta de ósmosis inversa, ya que son arrastradas por el agua antes de que se produzca su evaporación.

Equipo de atomización

El equipo de evaporación, tiene por objeto obtener la sal seca contenida en el agua de rechazo de la planta de ósmosis inversa. Para ello se aprovecha el calor de los gases depurados provenientes del proceso de combustión de residuos.

El proceso de atomización consiste en poner en contacto íntimo el agua de rechazo en forma de gotas, del menor diámetro posible, con los gases de salida de la cámara de postcombustión. En este momento se produce la evaporación súbita de la salmuera y la precipitación de las sales contenidas en la misma.

Para ello, el agua del rechazo de la planta de ósmosis inversa se acumula en un depósito desde donde es bombeada hasta la cámara de evaporación, difundiéndose en el

Figura 8. Conjunto atomizador



mismo mediante dos boquillas pulverizadoras. Cada una de estas boquillas está situada en una línea independiente de la otra y aisladas mediante electroválvulas. Esta cámara está calentada por los gases depurados procedentes del horno de combustión de residuos. El agua se evapora de forma instantánea saliendo en forma de vapor por la chimenea del equipo, quedando las sales retenidas en el fondo de la cámara.

Esta tecnología de tratamiento permite una mejora sustancial de la gestión de residuos y disminuye su disposición en vertedero en un 85%.

Existe un quemador de gasóleo en la cámara de evaporación por si el calor aportado por los gases no fuera suficiente, ya que parte de los gases se desvían hacia el secador rotativo, para producir la evaporación de la salmuera.

En la tubería de salida del vapor, existe un filtro para evitar la salida de sólidos junto con el vapor de agua. Las sales se recogen en un depósito situado en el fondo de la cámara de evaporación, el cual tiene una capacidad de acumulación del orden de 50 kg de sal seca.

3. CONCLUSIONES Y RESULTADOS

La instalación descrita quedó lista para su puesta en marcha a primeros de 2012 y estuvo en funcionamiento varios meses.

Cabe comentar que la puesta en marcha y optimización fue difícil dado el gran número de tecnologías y equipos presente en el piloto.

Los resultados obtenidos durante la experimentación se pueden resumir en:

- El efluente del tratamiento terciario posee mejor calidad, por su baja salinidad, que el agua utilizada actualmente en los procesos de la fabricación, pudiendo reducir la dureza en los circuitos.
- El coste variable del agua tratada en este pilotaje es inferior 0,6 €/m³. La recuperación obtenida en la ósmosis inversa es del 72%.
- El tratamiento de los residuos con esta tecnología permite una mejora sustancial de su gestión y disminuye su disposición, en volumen, hacia vertedero controlado en un 85%.
- Es fundamental considerar el pretratamiento del residuo (separación de impropios y trituración).
- El proceso de la planta piloto es perfectamente extrapola-

ble a una instalación de tamaño industrial, puesto que se han utilizado tecnologías existentes en el mercado (ultrafiltración, ósmosis inversa, horno rotativo, evaporador flash.).

- El coste de explotación en una instalación de tamaño industrial será sensiblemente inferior al obtenido en el piloto debido a factores de escala.

Respecto a las mejoras ambientales conseguidas, se pueden citar:

- Se consigue una regeneración del agua efluente de la depuradora, con la consiguiente reducción de consumo de agua potable para fabricación y de aguas residuales generadas. Importante **REDUCCIÓN del estrés hídrico** a nivel industrial.
- Se consigue reducir en un 80-85% el volumen de residuo a transportar a vertedero, así como la valorización energética de un residuo. Fuente **ALTERNATIVA** de energía.
- Valorización de un flujo residual, como es la salmuera de la planta de ósmosis inversa, obteniéndose un subproducto (sal) que puede ser empleada en otras aplicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Directiva del Consejo 99/31/CE, de 26 abril 1999, relativa a la disposición de residuos ("Directiva de vertederos").
- Elias, X. *COMPARACIÓN DE SISTEMAS DE CONVERSIÓN ENERGÉTICO DE FANGOS DE EDAR*. Ed. Elsevier Revista TECNOLOGÍA DEL AGUA. nº. 256 (Enero 2005).
- Elias, X. *LA CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS INTEGRANTES DEL PROYECTO LIFE: RESALTTECH*. Revista RESIDUOS. nº. 125 (Octubre 2011).
- Elias, X. *LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS: UNA ALTERNATIVA COMPATIBLE CON EL PROTOCOLO DE KYOTO*. Revista RESIDUOS. nº. 80 (Noviembre 2004).
- Elias, X. *POSIBILIDADES DE LA PIRÓLISIS EN EL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS*. Revista RESIDUOS. nº. 68 (Noviembre 2002).
- Elias, X. *RECICLAJE DE RESIDUOS INDUSTRIALES* (2ª edición). Ed. Díaz de Santos. Madrid (2009).
- Elias, X. *SECADO Y TRATAMIENTO DE FANGOS DE EDAR*. Ed. Elsevier. Revista TECNOLOGÍA DEL AGUA (Julio 2002).
- Elias, X. *TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS*. Ed. Díaz de Santos. Madrid (2005).
- EUROPEAN COMMISSION, DG ENV. (2001). *Pollutants in urban waste water and sewage sludge*.
- *Informe Sostenibilidad. Actualización 2010*. Fuente: Aspapel.
- *Memoria Sostenibilidad Aspapel*. Marzo 2008.
- Niessen, W.R. *COMBUSTION AND INCINERATION PROCESSES*. Marcel Dekker, Inc. New York (1995).
- Rodríguez, I. *LOS RESIDUOS PELIGROSOS: CARACTERIZACIÓN, TRATAMIENTO Y GESTIÓN*. Editorial Síntesis (1999).