

# Curso de Operario de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales



Módulo 11. Procesos de regeneración de agua para uso industrial

Joan Sanz

*Antiguo director técnico de Veolia Water Technologies*

Miembro de la Junta Directiva de la Asociación Española de Reutilización Sostenible del Agua (ASERSA)

# SUMARIO

- CONSIDERACIONES PRELIMINARES
- USOS INDUSTRIALES
- CALIDAD DEL AGUA REGENERADA
- TIPOS DE REGENERACIÓN
- PROCESOS UNITARIOS DE REGENERACIÓN
- RESUMEN

# CONSIDERACIONES PRELIMINARES

- Cambio de mentalidad: de EDAR a ERA (similar a ETAP)
- Calidad del agua afluyente (efluente secundario) y agua regenerada, Tabla de valores límite. Cuándo parar la ERA
- Salinidad (conductividad) del afluyente a la ERA. Intrusión salina o marina
- Gestión del caudal del efluente secundario. Almacenamiento
- Uso industrial implica garantía de cantidad y calidad contractual. Fiabilidad de la ERA. Disponibilidad
- Huída de los valores medios. Percentiles 90 o 95. Operación 24 horas sin perder fiabilidad
- Coordinación con el laboratorio de análisis. Análisis de campo rutinarios



# CONSIDERACIONES PRELIMINARES

- La operación depende del diseño de la ERA y de los datos de partida
- Manual de la ERA. Carta de servicio (troubleshooting, investigación de anomalías, árboles de decisión, etc). Fichas de los procesos unitarios
- Empleo de listas de comprobaciones (check list)
- Formación específica sobre el proceso de la ERA: diseño, operación y mantenimiento
- SCADA: datos en tiempos real y tendencias. Uso de históricos. Cruzar datos con los resultados de análisis
- Sistemas expertos o predictivos. Empleo de algoritmos para toma de decisión



# CONSIDERACIONES PRELIMINARES

- Conocer la materia prima: Materia orgánica del efluente secundario (EfOM, effluent organic matter)
  - EfOM → NOM (materia orgánica natural) + SMP (Soluble microbial products) + SOC (synthetic organic compounds)
  - SOC: Entre otros: DBP (subproductos de desinfección), NDMA, EDC, Pesticidas, compuestos Farmacéuticos,...
  - EfOM → DOC (carbono orgánico disuelto) + POC (carbono orgánico particulado)
  - En EfOM tenemos fracciones eliminables por coagulación y floculación (por ejemplo sustancias húmicas, algunas proteínas, etc). Otras fracciones pueden eliminarse con UF (biopolímeros) y el resto solo por ósmosis inversa o nanofiltración. Componentes de la fracción SOC por adsorción sobre GAC y procesos AOP



# USOS INDUSTRIALES

- Usos comprometidos. Afectan directamente a la producción industrial o al producto final
  - Agua de caldera (media y alta presión): Agua desionizada
  - Agua de proceso (especificaciones propias de la producción)
  - Agua que se incorpora al producto final
- Usos no comprometidos.
  - Baldeo de calles
  - Riego de zonas verdes
  - Aguas de refrigeración. Torres de refrigeración (*atención a la Salud Pública*)
  - Aguas para limpiezas químicas (CIP “Cleaning in place”)
  - Aguas para trasiego, vehicular, etc.
  - Aguas sistemas antiincendios



# TIPOS DE REGENERACIÓN

- Regeneración Básica
  - Coagulación, floculación y decantación
  - Filtración en superficie, Filtración en profundidad, Filtración en continuo
  - Desinfección por luz UV
  - Desinfección química
- Regeneración Avanzada
  - Microfiltración, Ultrafiltración
  - Nanofiltración, Ósmosis inversa, Electrodialisis reversible
  - Oxidación avanzada (luz UV + peróxido de hidrógeno)
  - Adsorción sobre carbón activo (granular, en polvo, microgranular)
- Agua pura (desionizada)
  - Intercambio iónico, Desionización en continuo



# CALIDAD DEL AGUA REGENERADA

- Calidad del agua regenerada para usos industriales
  - Propuesta de nuevo Real Decreto de Reutilización de agua (noviembre 2023)

## ANEXO I. REQUISITOS MÍNIMOS PARA LOS DIFERENTES USOS Y DESTINOS DEL AGUA REGENERADA.

Se distinguen 4 clases de calidad de agua regenerada: A, B, C y D. La tabla siguiente recoge el valor máximo admisible (VMA) de los indicadores: Escherichia coli, turbidez y sólidos en suspensión (SS) para cada una de las clases de calidad.

Tabla I-1.- Clases de calidad de las aguas regeneradas

Clases de calidad	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)		
	Escherichia Coli (UFC/100 mL)	Turbidez (UNT)	Sólidos en suspensión (mg/L)
<b>A</b>	10	5	10
<b>B</b>	100	---	Conforme DARU
<b>C</b>	1.000	---	Conforme DARU
<b>D</b>	10.000	---	Conforme DARU
Conforme DARU: concentración del parámetro cumple con los requisitos de conformidad previstos en la Directiva del Consejo 91/271/CEE de 21 de mayo de 1991 sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.			

$$\text{DBO}_5 < 10 \text{ mgO}_2/\text{L}$$



# CALIDAD DEL AGUA REGENERADA (II)

- Propuesta de nuevo Real Decreto de Reutilización de agua (noviembre 2023)

## A) Requisitos de calidad del agua regenerada para el uso industrial

Tabla I-5.- Requisitos de calidad para el uso industrial

USOS INDUSTRIAL	CALIDAD	INDICADORES ADICIONALES	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE
<ul style="list-style-type: none"> <li>Torres de refrigeración y condensadores evaporativos en agua de aporte a la torre.</li> <li>Limpieza en la industria alimentaria</li> </ul>	Ausencia Escherichia Coli	Legionella spp.	Conforme al Real Decreto 487/2022 de 21 de junio
<ul style="list-style-type: none"> <li>Limpieza, excepto en la industria alimentaria.</li> <li>Refrigeración y producción de vapor en circuito cerrado en la industria alimentaria.</li> </ul>	C	Contaminantes	Ver apartado B). (iv) Requisitos generales
<ul style="list-style-type: none"> <li>Procesos industriales en la industria alimentaria</li> </ul>	B o C		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Procesos industriales, excepto en la industria alimentaria.</li> </ul>	D		

10

# CALIDAD DEL AGUA REGENERADA (IV)

- Calidad del agua regenerada para usos industriales
  - La especificación del industrial: limitaciones en conductividad, amonio, fósforo, COT, color, turbidez, sólidos en suspensión, DQO, DBO<sub>5</sub>, pH, dureza, alcalinidad, sulfatos, hierro, manganeso, aluminio, etc.
  - Especificaciones para agua pura (desionizada). Conductividades de 50-10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  hasta 0,2-0,1  $\mu\text{S}/\text{cm}$
  - Caso especial: industria alimentaria. Petición hasta calidad potable
  - Limitaciones emanadas de los servicios de Salud Pública (Sanidad) y especificadas en el informe vinculante que acompaña la concesión del uso

# FILTRACIÓN

- Procesos de Filtración superficial o en profundidad. En continuo o discontinuo
  - Objetivo: reducción de la turbidez/sólidos en suspensión, preparando el agua para su posterior desinfección. Ojo con el límite de cuantificación de sólidos en suspensión. Ocasionalmente reducción de fósforo por precipitación con sales de hierro o aluminio
  - Registro de pérdida de carga inicial (filtro limpio) y final (filtro colmatado). Ciclos de filtración. Volumen Unitario de Filtración (VUF)  $\text{m}^3/\text{m}^2$ . Necesidad de caudalímetro con contador
  - Turbidímetro a la salida (y entrada)
  - Posibilidad de coagulación en línea. Efecto de la distribución de tamaño de partícula (PSD)



# FILTRACIÓN (II)

- Procesos de Filtración superficial o en profundidad. En continuo o discontinuo
  - Vigilancia de la formación de bolas de fango (mud balls) o agregados de material filtrante y materia en suspensión que no se eliminan en los lavados
  - Observación del estado de la superficie del filtro antes del lavado, durante el contralavado y al inicio del ciclo de filtración. Detectar vías preferenciales, distribución heterogénea de la mezcla agua-aire, presencia de chorros, etc.
  - Estado de las mallas filtrantes en filtración superficial. Colmatación, coloración
  - Limpiezas químicas por bolas de fango y desagregación (ensayos previos en jar test). Desinfección de filtros. Limpieza químicas en filtración superficial



# COAGULACIÓN, FLOCULACIÓN, SEDIMENTACIÓN

- Procesos de Coagulación, floculación y sedimentación
  - Objetivo: reducción de la turbidez/sólidos en suspensión antes de la filtración. Reducción de la fracción de EfOM coagulable (sustancias húmicas, color, proteínas, etc). Aumento de la Transmitancia a 254 nm (cara a la óptima desinfección con luz UV)
  - Verificación periódica de las dosis de coagulante y floculante con el ensayo de jarras (jar test)
  - Evaluación visual de los flóculos formados. Comparar el resultado de la decantación con los valores de turbidez a salida del proceso
  - Selección de coagulante y floculante por jar test
  - Seguimiento de las concentraciones residuales de coagulante (hierro o aluminio)



# DESINFECCIÓN

- Desinfección: Luz UV, desinfección química (hipoclorito de sodio, cloraminación, ácido peracético/peróxido de hidrógeno)
  - Proceso crítico en el caso del objetivo de ausencia de E. coli o valores inferiores a 100 ufc/100mL
  - Necesidad de baja turbidez aguas arriba de la desinfección
  - Necesidad de valores de Transmitancia a 254 nm al menos superiores al 60%. Comparar con los valores de diseño del sistema de luz UV
  - Atención a las fases de arranque y paro
  - ¿Cloración o Cloraminación? En función de la concentración de amonio y la dosis de hipoclorito de sodio (o cloro) tendremos cloro residual libre o monoclорamina. Test para análisis adecuados a cada situación

# ANÁLISIS DEL AGUA

- Análisis de campo y en la ERA
  - Test con tiras indicadoras
  - Test con comparadores de color
  - Fotómetros de bolsillo
  - Multímetro portátil (pH, conductividad, potencial redox, oxígeno disuelto)
  - Turbidímetro portátil
  - Ensayo de jar test (si hay proceso de coagulación y floculación)
- Análisis en Laboratorio de la ERA
  - Además de lo anterior: espectrofotómetro de sobremesa, sistemas de filtración para sólidos en suspensión, balanza
  - Contacto con Laboratorio externo acreditado (ISO 17025) para otros parámetros



# MICROFILTRACIÓN Y ULTRAFILTRACIÓN

- Microfiltración y Ultrafiltración (procesos de separación por membrana)
  - Comparar el agua de alimentación real con los datos de diseño
  - Seguimiento de presión transmembrana (TMP), pérdida de carga y caudal específico ( $L/m^2.h$ ). Comparar con el diseño
  - Test de Integridad del Sistema
  - Indicadores de rendimiento: Turbidez, recuento de partículas, indicadores microbiológicos (E. coli, coliformes totales, aerobios totales, etc)
  - Frecuencia de los contralavados (BW backwash), de los lavados químicos CEB (o contralavado con reactivos químicos) y CIP
  - Reparación de membranas o sustitución (vida útil)



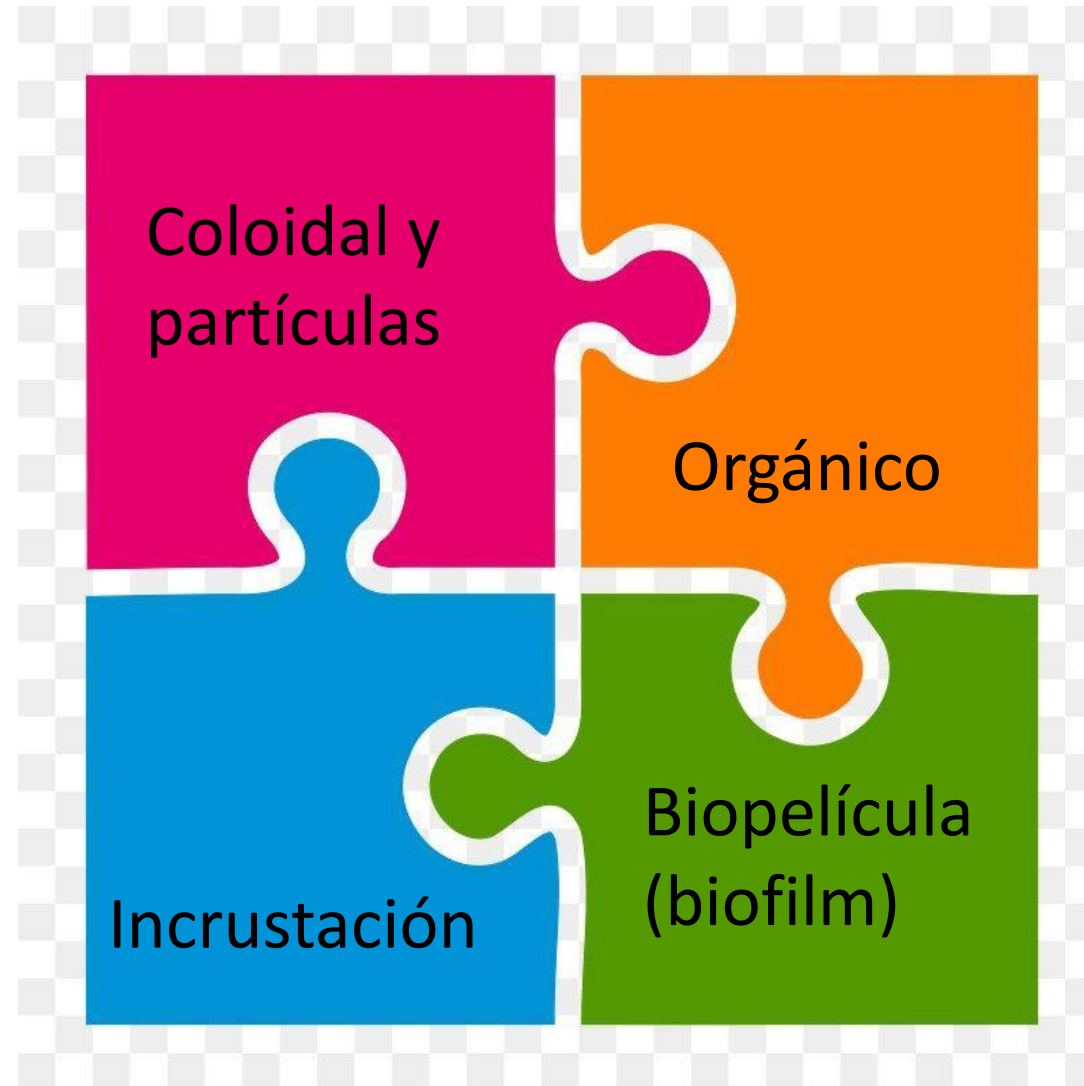
# NANOFILTRACIÓN Y ÓSMOSIS INVERSA

- Nanofiltración y Ósmosis inversa
  - Procesos de membrana que precisan aguas de alimentación de baja turbidez ( $<1$  NTU), baja concentración coloidal (índices de atascamiento  $SDI < 5$ ,  $MFI < 4$ ) y limitaciones en hierro, aluminio, fosfatos, COT,...
  - Necesidad de un pretratamiento adecuado al efluente secundario
  - Uso intensivo de los datos registrados en SCADA. Evolución de la pérdida de carga, presión de alimentación, caudal de producción, conductividad del permeado y la conversión. Seguimiento del consumo específico  $kWh/m^3$
  - Datos normalizados para la toma de decisiones
  - Uso intensivo del SCADA de la ERA (tendencias e históricos)



# NANOFILTRACIÓN Y ÓSMOSIS INVERSA (II)

Las cuatro causas habituales de ensuciamiento y pérdida de rendimiento en membranas de ósmosis inversa y nanofiltración



# NANOFILTRACIÓN Y ÓSMOSIS INVERSA (III)

- Nanofiltración y Ósmosis inversa
  - Investigación y Control de las causas de ensuciamiento de las membranas. Manuales de los fabricantes de membrana. Troubleshooting específicos
  - Selección del mejor programa de limpieza de membranas
  - Programación de las limpiezas químicas de las membranas (afectación a la productividad de la ERA)
  - Análisis en laboratorio de las soluciones de limpieza al final de su empleo
  - Necesidad de autopsias cuando los programas de limpiezas no dan los resultados esperados y no se puede identificar la causa principal
  - Modificación de alguno de los procesos del Pretratamiento



# NANOFILTRACIÓN Y ÓSMOSIS INVERSA (IV)

- Hibernación en sistemas de membranas: Paradas programadas



# NANOFILTRACIÓN Y ÓSMOSIS INVERSA (V)

- Hibernación en sistemas de membranas
  - Paradas por largo periodo fijo
    - *Paradas estacionales*
    - *Paradas programadas superiores a 6 meses*
  - Parada en espera
    - *Equipo de operación de la planta = "parque de bomberos"*
  - Parada por periodo indefinido
    - *Incertidumbre en la programación*
  - Paradas en seco (toda la planta)
  - Paradas en seco (solo pretratamiento)
  - Paradas con contrato de potencia reducida
    - *Por ejemplo: potencia disponible solo para pretratamiento*



# OXIDACIÓN AVANZADA

- Oxidación avanzada (AOP)
  - Objetivo: eliminación de compuestos orgánicos a nivel traza (nitrosaminas, 1,4-dioxano, subproductos de desinfección, etc)
  - Cuando pretendemos obtener agua regenerada de calidad equivalente a agua potable
  - Combinación de luz UV y peróxido de hidrógeno
  - Necesidad de análisis externos para evaluar el rendimiento

# DESIONIZACIÓN

- Agua pura (desionizada)
  - Sistemas de intercambio de iones por resinas posterior a un sistema de ósmosis inversa
  - Sistemas de desionización en continuo
  - Objetivo: obtener agua desionizada entre  $1 \mu\text{S}/\text{cm}$  y  $0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$
  - Plantas centralizadas o satélite próximas al industrial
  - Atención a la concentración de  $\text{CO}_2$  y carbono orgánico total (TOC) en el agua a desionizar. Si no eliminamos el  $\text{CO}_2$  causamos ciclos cortos en la resina aniónica o insuficiente calidad en la desionización en continuo. El TOC de alimentación debe estar por debajo del límite especificado para la cadena de intercambio iónico o el sistema de desionización en continuo



# RESUMEN

- La calidad del efluente secundario (agua depurada) de la EDAR nos va a marcar el nivel de exigencia en la operación de la ERA dedicada a la producción para usos industriales. Y el diseño adoptado debe ser fiel a la realidad del afluente a la ERA
- Debemos tener una tabla de valores límite para afluente a la ERA y para el agua regenerada a enviar al uso industrial
- La Operación de la ERA aumenta su complejidad al pasar de regeneración básica a avanzada y aún más para obtener agua pura
- Recomendable el uso intensivo de los datos del SCADA para el seguimiento de los procesos unitarios, sobre todo en la Regeneración Avanzada. Sistemas expertos/predictivos si es posible
- Soporte de análisis de campo, planta y laboratorio



# MUCHAS GRACIAS



**+ INFORMACIÓN**  
info@aeopas.org  
955 40 85 06

