

# Curso de Operario de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales

AGUASRESIDUALES.INFO



Asociación Española de Operadores  
Públicos de Abastecimiento y Saneamiento



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 afluente (efluente secundario) y agua regenerada, Tabla de valores límite. Cuándo parar la ERA
- Salinidad (conductividad) del afluente 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 (marzo 2024)

A) REQUISITOS DE CALIDAD DE LAS AGUAS REGENERADAS PARA EL USO INDUSTRIAL, EXCEPTO EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

**Tabla I-4.1.- Valor máximo admisible para uso industrial, excepto en la industria alimentaria**

Uso industrial, excepto en la industria alimentaria	<i>E. coli</i> (UFC/100 mL)	Turbidez (UNT)	SS (mg/L)	<i>Legionella spp.</i> (UFC/L)	Contaminantes
<b>Calidad I. A+</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Torres de refrigeración y condensadores evaporativos en agua de aporte a la torre.</li> </ul>	Ausencia	5	10	Ver observaciones	Ver observaciones
<b>Calidad I. C</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aguas de proceso: aquellas que están en contacto directo en algún momento con materias primas, materiales, productos intermedios o productos finales de un proceso industrial.</li> <li>• Aguas de limpieza: aguas destinadas a la limpieza de equipos, objetos, materiales, tuberías y superficies en áreas industriales, excepto en la empresa alimentaria.</li> <li>• Otros usos industriales.</li> </ul>	1.000	---	Conforme DARU	Ver observaciones	Ver observaciones



# CALIDAD DEL AGUA REGENERADA (II)

## B) REQUISITOS DE CALIDAD DEL AGUA REGENERADA PARA EL USO INDUSTRIAL ALIMENTARIO

**Tabla I-4.2.- Valor máximo admisible para uso industrial alimentario**

Uso industrial alimentario	<i>E. coli</i> (UFC/100 mL)	Turbidez (UNT)	SS (mg/L)	<i>Legionella</i> <i>spp.</i> (UFC/L)	Contaminantes
<b>Calidad Ia. A</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Aguas de limpieza: las destinadas a ese fin, distintas de las utilizadas en la limpieza de las superficies, objetos y materiales que puedan estar en contacto con los alimentos, y que no supongan una fuente de contaminación para los alimentos.</li> </ul>	10	5	10	Ver observaciones	Ver observaciones

Uso industrial alimentario	<i>E. coli</i> (UFC/100 mL)	Turbidez (UNT)	SS (mg/L)	<i>Legionella</i> <i>spp.</i> (UFC/L)	Contaminantes
<b>Calidad Ia. B o Ia. C</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Aguas de proceso: las utilizadas durante el proceso de fabricación de los alimentos, con fines de refrigeración, o producción de vapor o agua caliente, en circuito cerrado, y que no entran en contacto con los alimentos.</li> </ul>	100 ó 1.000	---	Conforme DARU	Ver observaciones	Ver observaciones

# CALIDAD DEL AGUA REGENERADA (III)

Tabla I-7.- Tratamiento indicativo asociado a las clases de calidad de las aguas regeneradas

Clase de calidad	Tratamiento indicativo
<b>A+, A</b>	Tratamiento secundario, filtración, ultrafiltración y desinfección
<b>B</b>	Tratamiento secundario, filtración y desinfección
<b>C, D</b>	Tratamiento secundario y desinfección

# 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 monocloramina. 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 ( $L/m^2 \cdot h$ ). 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)



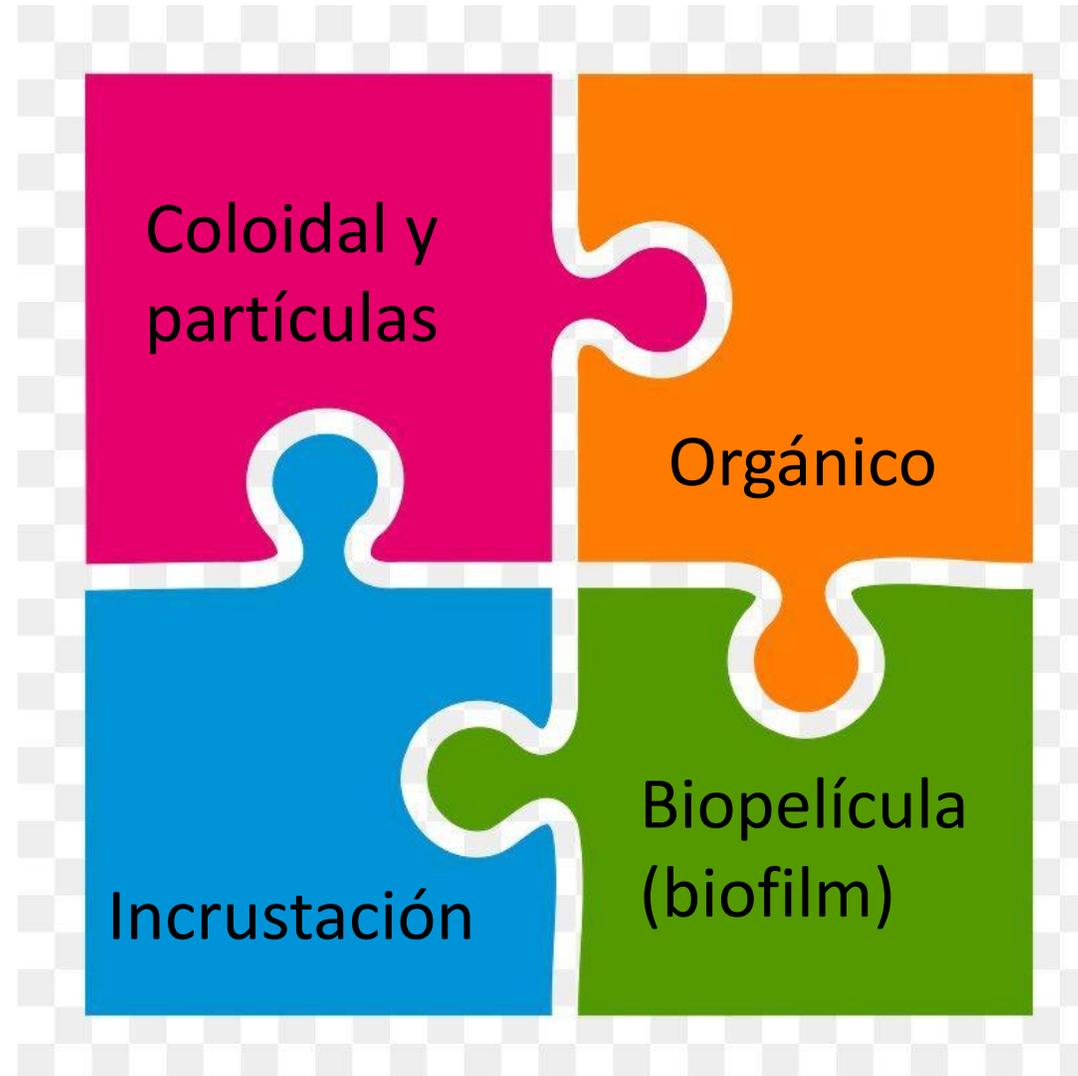
# NANOFILTRACIÓN Y ÓSMOSIS INVERSA

- 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 la 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

