

INFLUENCIA DE LA HIDRÁULICA EN DEPÓSITOS DE AGUA POTABLE EN LA ESTABILIDAD DEL CLORO RESIDUAL

1.- INTRODUCCIÓN:

La estabilidad del cloro residual en depósitos de almacenamiento de agua potable depende no solo de la precisión del sistema de dosificación, sino fundamentalmente del comportamiento hidráulico del volumen almacenado.

En depósitos de gran capacidad, la inyección directa de hipoclorito suele generar distribuciones heterogéneas de concentración debido a fenómenos de estratificación, dispersión hidráulica, zonas muertas y cortocircuitos de flujo. Estas condiciones provocan oscilaciones significativas en las lecturas de los analizadores de cloro, dificultando el control automático del proceso de desinfección. Es importante tener en cuenta este concepto: ***El analizador no mide el cloro que dosificamos, sino el cloro que consigue llegar hasta el punto de medida después de recorrer el depósito.***

La implantación de sistemas de recirculación continua permite mejorar la mezcla hidráulica, incrementar la uniformidad del residual y transformar el depósito en un sistema de comportamiento mucho más predecible.

2.- COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE UN DEPÓSITO CLORADO

Desde un punto de vista teórico, un depósito puede aproximarse a tres modelos hidráulicos básicos:

2.1.-MODELO IDEAL: Flujo Pistón (Plug Flow)

El flujo pistón es un modelo hidráulico ideal en el que toda el agua avanza de forma ordenada y sin mezclarse. En los depósitos reales este comportamiento no existe debido a las recirculaciones internas y zonas muertas. La función de la recirculación hidráulica no es crear un flujo pistón, sino homogeneizar el volumen almacenado para que la concentración de cloro sea uniforme y el residual medido en salida sea más estable y representativo.

2.2.- REACTOR COMPLETAMENTE MEZCLADO

En este modelo hidráulico, el depósito se comporta como un único volumen homogéneo, donde la concentración de cloro residual presenta una distribución prácticamente uniforme. Las aportaciones de agua y de reactivo son rápidamente incorporadas al conjunto del volumen, reduciendo los gradientes de concentración y mejorando la representatividad de las mediciones analíticas. Si bien ningún depósito real alcanza una mezcla perfecta, la recirculación hidráulica permite aproximarse significativamente a este comportamiento.

2.3.- FLUJO DISPERSO

Es el comportamiento hidráulico más habitual en los depósitos de almacenamiento reales, donde el agua no circula de forma uniforme ni presenta una mezcla completa del volumen.

Se caracteriza por la coexistencia de diferentes tiempos de residencia, corrientes internas de recirculación natural, fenómenos de estratificación, zonas de baja renovación y caminos preferenciales de circulación entre la entrada y la salida del depósito.

Como consecuencia, distintas masas de agua pueden presentar concentraciones de cloro residual significativamente diferentes en un mismo momento. Mientras algunas zonas reciben agua recientemente clorada, otras permanecen durante largos periodos con escasa renovación hidráulica.

Esta distribución heterogénea del desinfectante provoca que el analizador mida concentraciones variables en función de la masa de agua que alcance el punto de muestreo en cada instante, generando oscilaciones en la señal y dificultando la obtención de un residual de cloro estable y representativo del conjunto del volumen almacenado.

3.- FENÓMENOS QUE AFECTAN A LA DISTRIBUCIÓN DEL CLORO EN LOS DEPÓSITOS

Estratificación

La estratificación se produce cuando existen diferencias de temperatura, densidad o calidad del agua dentro del depósito que dificultan la mezcla natural entre las distintas capas. Como consecuencia, el volumen almacenado deja de comportarse como una masa homogénea y aparecen zonas con características físico-químicas diferenciadas.

En estas condiciones, la concentración de cloro residual puede variar significativamente entre la parte superior y el fondo del depósito, generando distribuciones no uniformes del desinfectante. Dado que el analizador únicamente mide el agua que alcanza el punto de salida, la lectura obtenida puede no ser representativa de la concentración media existente en el conjunto del volumen almacenado.

Zonas muertas

Las zonas muertas son rincones del depósito donde el agua apenas se mueve. Al renovarse muy lentamente, el cloro residual se va consumiendo con el tiempo sin recibir un aporte suficiente de desinfectante fresco. Como resultado, pueden aparecer áreas con menor concentración de cloro que el resto del depósito, dificultando la homogeneidad del tratamiento y afectando a la estabilidad de las mediciones realizadas en la salida.

Cortocircuitos hidráulicos

En ocasiones, el agua encuentra un recorrido más rápido entre la entrada y la salida del depósito, evitando gran parte del volumen almacenado. Es como si una parte del agua atravesara el depósito por una “autopista hidráulica”, mientras el resto permanece circulando lentamente por otras zonas.

Cuando esto ocurre, el agua dispone de menos tiempo para mezclarse y estabilizar su concentración de cloro residual. Como resultado, pueden aparecer diferencias de concentración dentro del depósito y variaciones en las lecturas del analizador, incluso cuando la dosificación de cloro permanece constante.

Dispersión de concentraciones

Cuando el cloro se inyecta directamente en el depósito, no se reparte de manera instantánea por toda el agua almacenada. Inicialmente se concentra alrededor del punto de dosificación, mientras que las zonas más alejadas reciben menores cantidades de desinfectante.

Es similar a añadir una gota de colorante en una piscina: cerca del punto de vertido el color es intenso, mientras que en el resto del volumen tarda tiempo en distribuirse. Durante ese proceso pueden coexistir diferentes concentraciones de cloro residual dentro del mismo depósito, generando mediciones variables y una menor uniformidad en la desinfección.

Consecuencias sobre la medida analítica

La concentración medida por el analizador no siempre refleja el valor medio de cloro residual presente en el volumen almacenado. En depósitos con fenómenos de estratificación, dispersión de concentraciones o cortocircuitos hidráulicos, la señal

analítica está condicionada por la masa de agua que alcanza el punto de muestreo en cada instante.

Por ello, la lectura puede verse afectada por cambios en los patrones de circulación internos, variaciones en la demanda de agua o desplazamientos de zonas con diferente concentración de desinfectante. Este comportamiento suele manifestarse mediante oscilaciones de la señal, picos transitorios, caídas inesperadas del residual y retardos en la respuesta del sistema frente a cambios de dosificación.

Desde el punto de vista operacional, es fundamental diferenciar entre un problema de dosificación y un problema hidráulico, ya que en numerosos casos la inestabilidad observada en el cloro residual tiene su origen en la distribución interna del agua y no en el equipo de medida o en el sistema de inyección.

Solución mediante recirculación continua

En lugar de inyectar el cloro directamente en el depósito, el hipoclorito se dosifica sobre una corriente de agua recirculada. Esta corriente recoge agua de la parte inferior del depósito y la devuelve a la zona superior después de la dosificación.

Gracias a este movimiento continuo, el cloro comienza a mezclarse antes de entrar nuevamente en el depósito, facilitando su distribución por todo el volumen almacenado. El resultado es una concentración más uniforme, una reducción de las zonas con exceso o déficit de desinfectante y una señal de cloro residual mucho más estable en el analizador.

Efecto sobre el tiempo de mezcla

La eficacia de un sistema de recirculación no depende únicamente de la cantidad de agua que se mueve, sino también del tiempo necesario para que dicha recirculación distribuya el cloro de forma homogénea por todo el volumen almacenado.

Para estimar este comportamiento se utiliza el concepto de **tiempo característico de mezcla (TCM)**, que representa el tiempo teórico necesario para recircular un volumen de agua equivalente al volumen total del depósito.

Su cálculo puede aproximarse mediante la siguiente expresión:

$$\text{TCM} = V \text{ (volumen m}^3\text{)} / Q_r \text{ (caudal de recirculación m}^3\text{/h)}$$

Ejemplo:

Si consideramos un depósito de 1.200 m³ y un caudal de recirculación de 240 m³/h. obtendremos que.

$$\text{TMC} = 1.200 \text{ m}^3 / 240 \text{ m}^3/\text{h.} = 5 \text{ horas}$$

Esto significa que la bomba de recirculación necesita aproximadamente **5 horas para mover un volumen de agua equivalente al volumen total del depósito.**

Sin embargo, esto no implica que el depósito esté completamente homogeneizado después de esas 5 horas. Al igual que ocurre al remover un líquido en un recipiente, la mezcla es un proceso progresivo. Por lo tanto, la evolución de la homogeneización de forma aproximada será:

- Después de **1 tiempo de mezcla (5 horas)** se alcanza una homogeneización parcial significativa.
- Después de **2 tiempos de mezcla (10 horas)** la uniformidad aumenta considerablemente.
- Después de **3 tiempos de mezcla (15 horas)** se consigue una homogeneización superior al 95 %

Por tanto, en el caso analizado, tras unas 15 horas de funcionamiento continuo de la recirculación, el cloro residual estará distribuido de forma prácticamente uniforme en todo el depósito.

Este resultado pone de manifiesto que la recirculación no genera una mezcla instantánea, sino un proceso continuo de homogeneización. Cuanto mayor sea el caudal de recirculación respecto al volumen almacenado, menor será el tiempo necesario para alcanzar una distribución uniforme del desinfectante.

Como consecuencia, se reducen los gradientes de concentración, disminuyen las oscilaciones del analizador de cloro y el residual medido en salida pasa a ser mucho más representativo del conjunto del volumen almacenado.

4.- BENEFICIOS OPERATIVOS DE LA HOMOGENEIZACIÓN

La implantación de un sistema de recirculación continua no solo mejora la distribución del cloro residual dentro del depósito, sino que optimiza el comportamiento global de la instalación desde el punto de vista hidráulico, analítico y operacional.

4.1.- Beneficios hidráulicos

La recirculación genera un movimiento continuo del agua almacenada, favoreciendo una mezcla más uniforme en todo el volumen del depósito.

Como consecuencia:

- Se reducen las zonas muertas donde el agua permanece estancada durante largos periodos.
- Se minimizan los fenómenos de estratificación que provocan diferencias de concentración entre distintas capas del depósito.
- Disminuyen los gradientes de concentración de cloro residual.
- Se consigue una distribución más homogénea del desinfectante en todo el volumen almacenado.

El resultado es un depósito hidráulicamente más eficiente y con una mayor uniformidad en la calidad del agua almacenada.

4.2.- Beneficios analíticos

Cuando el cloro residual está distribuido de forma homogénea, el analizador mide una muestra mucho más representativa del conjunto del depósito.

Esto se traduce en:

- Mayor estabilidad de la señal de cloro residual.
- Reducción de picos y oscilaciones debidos a fenómenos hidráulicos.
- Menor variabilidad en las mediciones.
- Mayor fiabilidad y representatividad de los datos analíticos.

En estas condiciones, las lecturas reflejan con mayor precisión la concentración real de desinfectante disponible en el depósito.

4.3.- Beneficios en el control de la dosificación

Una medida estable permite que el sistema de regulación trabaje en condiciones mucho más favorables.

Como consecuencia:

- La respuesta de la dosificación es más precisa y predecible.
- Se reducen las correcciones innecesarias provocadas por señales inestables.
- Disminuye el riesgo de sobre cloración o infra cloración.
- Se optimiza el consumo de hipoclorito.
- Se mejora la continuidad del nivel de desinfección.

Todo ello permite operar la instalación con mayor eficiencia y menor coste de explotación.

4.4.- Beneficios sanitarios

La homogeneización del cloro residual garantiza que todo el volumen almacenado disponga de una protección desinfectante más uniforme.

Esto contribuye a:

- Reducir zonas con déficit de desinfectante.
- Mantener una barrera microbiológica más consistente.
- Mejorar la calidad sanitaria del agua almacenada.
- Incrementar la seguridad del suministro a la red de distribución.

CONCLUSIONES:

La recirculación hidráulica constituye una solución sencilla y altamente eficaz para mejorar la estabilidad del cloro residual en depósitos de almacenamiento. Más allá de favorecer la mezcla del desinfectante, permite transformar un sistema con concentraciones variables y mediciones inestables en una instalación más homogénea, controlable y eficiente.

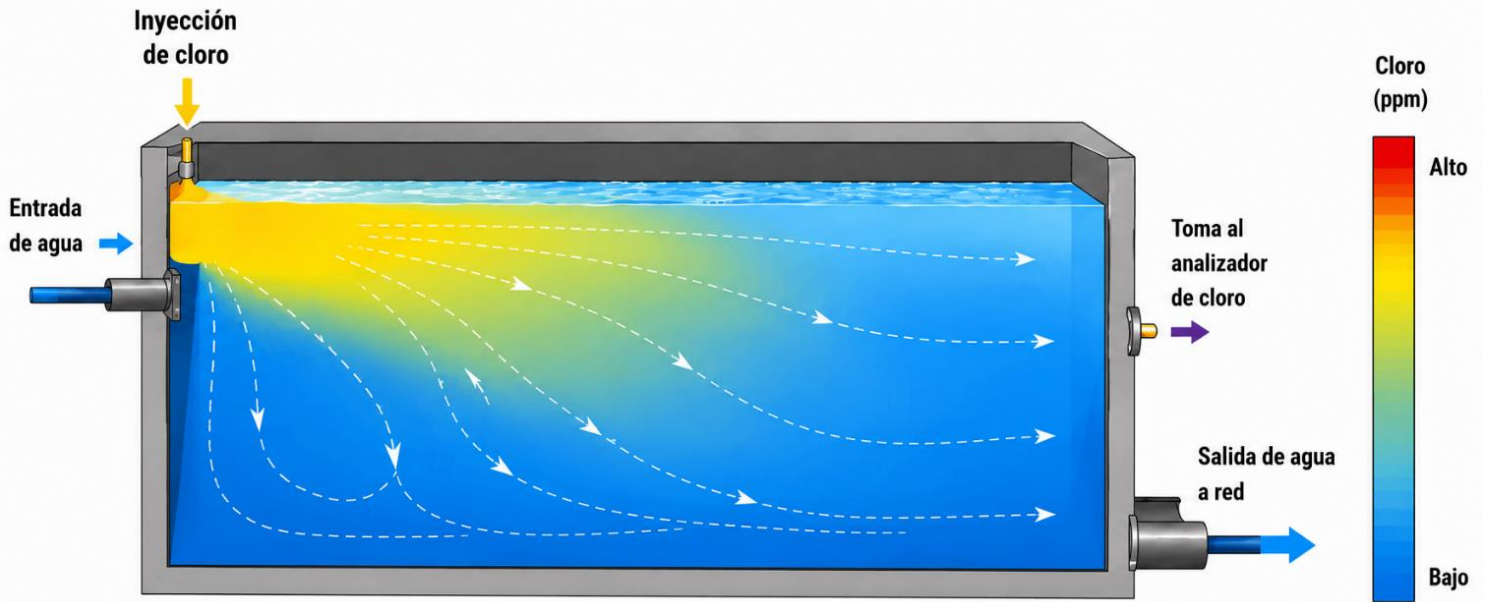
En definitiva, no se trata únicamente de dosificar cloro, sino de garantizar que dicho cloro se distribuya de forma uniforme por todo el volumen almacenado, asegurando que la concentración medida en salida sea realmente representativa del agua suministrada a la red.

La estabilidad del cloro residual en grandes depósitos depende principalmente de la calidad de la mezcla hidráulica y no exclusivamente de la precisión de la dosificación.

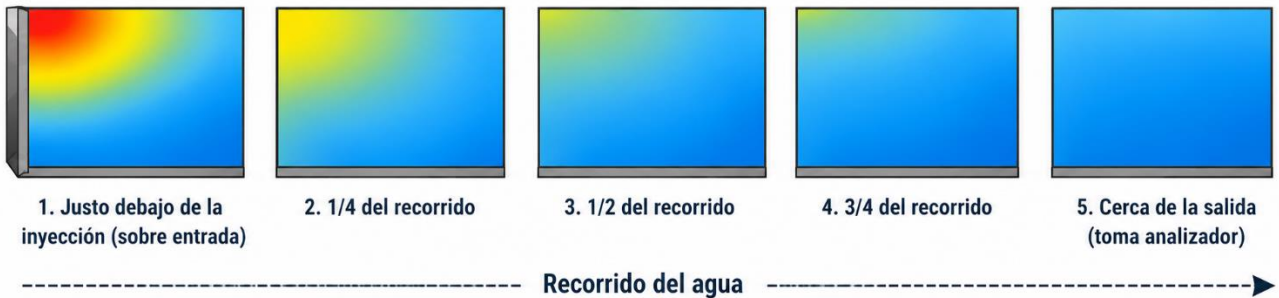
La incorporación de un sistema de recirculación con inyección de hipoclorito en la línea de retorno transforma el comportamiento hidráulico del depósito, reduciendo la dispersión de concentraciones y proporcionando una distribución mucho más uniforme del desinfectante.

Como resultado, se obtiene una señal analítica más estable, una mejora del control operacional y una mayor garantía sanitaria para el agua suministrada a la red.

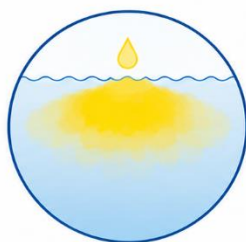
5.- MODELO DE FLUJO DEL CLORO EN UN DEPÓSITO SIN RECIRCULACIÓN



SECCIONES TRANSVERSALES (de izquierda a derecha)

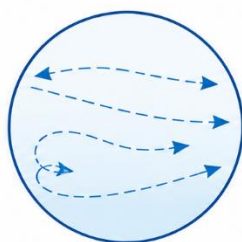


QUÉ SUCEDE



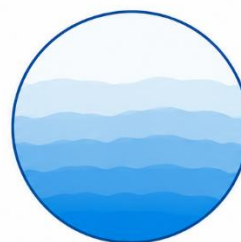
Cloro en la superficie

El cloro se queda primero en la capa superior cerca de la entrada.



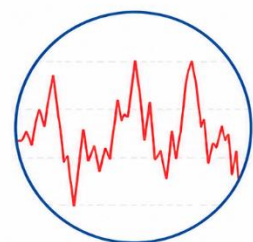
Mezcla lenta

Tarda mucho en bajar y distribuirse por todo el volumen.



Estratificación

Se generan capas con diferentes concentraciones (alta arriba, baja abajo y en el fondo).

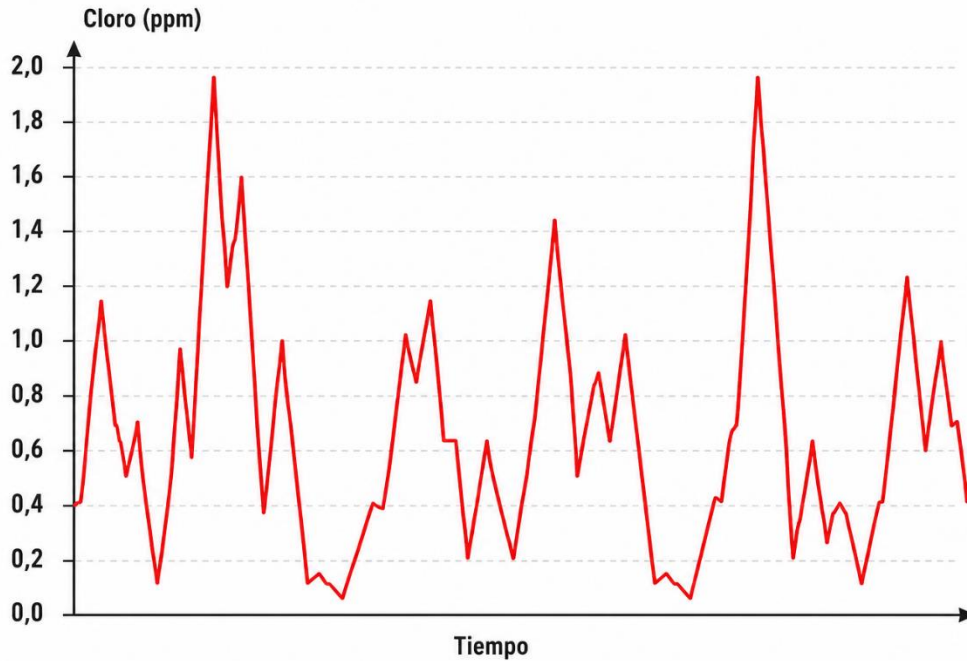


Señal muy inestable

El analizador recibe agua con cloro muy variable según el momento.

5.1 COMPORTAMIENTO DEL RESIDUAL DE CLORO EN ESTAS CONDICIONES

SEÑAL DEL ANALIZADOR EN SALIDA



CONSECUENCIAS

- **Residual de cloro poco fiable:** La señal medida no representa con precisión la concentración real de cloro disponible en el volumen de agua.
- **Riesgo de subcloración en partes del depósito:** Zonas con baja concentración de cloro residual, lo que compromete la efectividad de la desinfección.
- **Sobrecloración en la zona cercana a la inyección:** Concentraciones excesivas de cloro en el área próxima a la entrada, generando desperdicio de reactivo, posibles subproductos y corrosión.
- **Mayor dificultad para controlar el proceso:** La alta variabilidad de la señal dificulta el ajuste y la estabilidad del control automático.
- **Tiempo de contacto no uniforme:** Distribución heterogénea del cloro y del tiempo de permanencia, afectando la cinética de desinfección y la inactivación de microorganismos.

6.- MODELO DE FLUJO DEL CLORO EN UN DEPÓSITO CON RECIRCULACIÓN

El cloro se inyecta en la línea de recirculación, antes de entrar al depósito.
La mezcla es rápida y homogénea en todo el volumen.



SECCIONES TRANSVERSALES (de izquierda a derecha)



QUÉ SUCEDE



Recirculación continua
El agua circula constantemente por todo el depósito.



Cloro inyectado en la línea de recirculación
Se dosifica antes de retornar al depósito.



Mezcla rápida y homogénea
El cloro se distribuye por todo el volumen de forma uniforme.

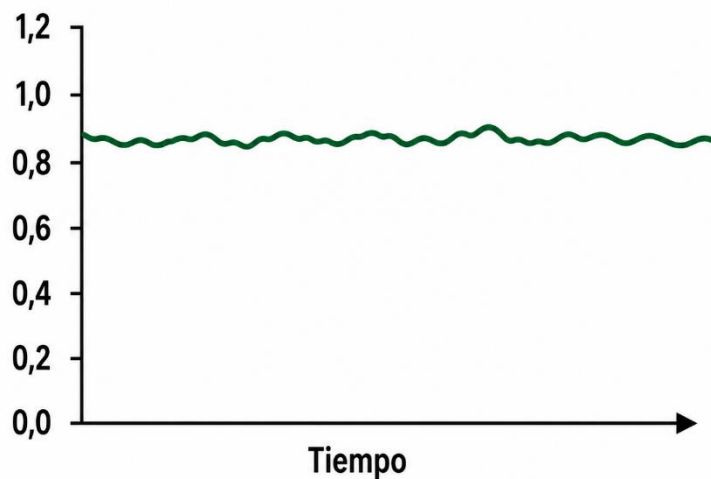


Residual estable en salida
El analizador recibe agua con cloro uniforme.

6.1 COMPORTAMIENTO DEL RESIDUAL DE CLORO EN ESTAS CONDICIONES

SEÑAL DEL ANALIZADOR EN SALIDA (A RED)

Cloro (ppm)



SEÑAL ESTABLE

- Residual uniforme y estable
- Sin picos ni caídas bruscas
- Mezcla rápida y homogénea
- Mejor control y seguridad

BENEFICIOS

- ✓ Residual de cloro uniforme y estable.
- ✓ Menor riesgo de sobrecloración o zonas sin cloro.
- ✓ Mejor control del proceso de desinfección.
- ✓ Mayor seguridad para la calidad del agua.
- ✓ Menor consumo de cloro.