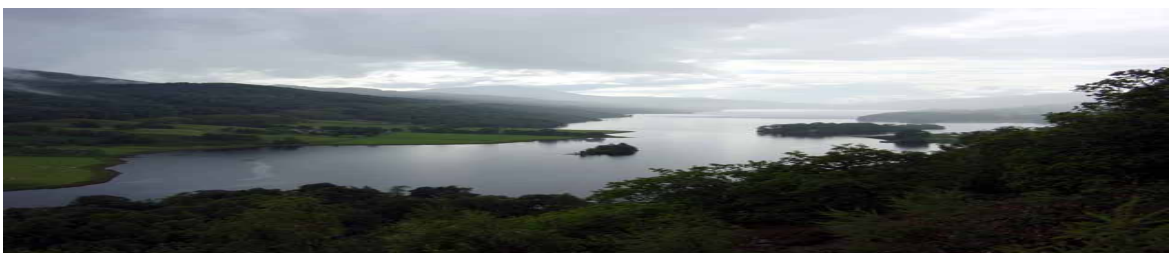




CLORACIÓN DE AGUA POTABLE





Índice

1.	Introducción	3
1.1	Agua de consumo humano	3
2.	Cloración	7
2.1.	El cloro y sus derivados	7
2.2.	Química del cloro	7
2.3.	Demanda de cloro	10
2.4.	Determinación de cloro	12
2.5.	Control de la cloración	13
2.6.	Equilibrio redox y cloro	15
2.7.	Protocolo de cloración	18
3.	Equipos de cloración	19
3.1.	Cloración en tanque con recirculación	20
3.2.	Cloración en línea	22
3.3.	Cloración en tanque sin recirculación	23



1. INTRODUCCIÓN

El agua potable es un bien necesario pero escaso. A pesar de que el agua es la sustancia más abundante y común en nuestro planeta -ya que cubre el 71% de su superficie- el 97.3% de ésta se encuentra contenida en los océanos. Del 2.7% restante, aproximadamente el 2.1% se halla en los casquetes polares y en glaciares y sólo el 0.61% es agua dulce líquida. De ésta última, alrededor del 0.60% se encuentra en acuíferos subterráneos, de difícil acceso mientras que sólo el 0.009% constituye agua dulce superficial (ríos y lagos). Aún más, solamente el 0.003% del total es agua dulce disponible para ser usada con fines domésticos. Es decir, si el total del agua de la Tierra fuera un recipiente de 100 litros, solamente media cucharadita de agua sería apta para consumo humano.

Origen del agua	Volumen del agua en kilómetros cúbicos	Porcentaje de agua total
Océanos	1,321,000,000	97.24%
Capas de hielo, Glaciares	29,200,000	2.14%
Agua subterránea	8,340,000	0.61%
Lagos de agua dulce	125,000	0.009%
Mares tierra adentro	104,000	0.008%
Humedad de la tierra	66,700	0.005%
Atmósfera	12,900	0.001%
Ríos	1,250	0.0001%
Volumen total de agua	1,360,000,000	100%

Fuente: Nace, Encuesta Geológica de los Estados Unidos, 1967 y El Ciclo Hidrológico (Panfleto), U.S. Geological Survey, 1984

De lo expuesto se extrae que el agua potable es un bien muy preciado y escaso y que se ha de consumir y administrar concienzudamente. Es primordial minimizar su gasto e intentar, en la medida de lo posible, reutilizarla adecuadamente.

1.1 Agua de consumo humano

El abastecimiento de agua a la población se puede realizar a partir de dos fuentes de características bien diferenciadas:

- Aguas superficiales: lagos, ríos, embalses,...Están expuestas al medioambiente y por tal causa son susceptibles de contaminación. Por este motivo es necesario un tratamiento exhaustivo antes de ser aptas para consumo humano. Éste suele realizarse por parte de las instituciones encargadas de la explotación de los recursos hídricos.
- Aguas subterráneas: pozos, manantiales,... Son fuentes de más difícil explotación, al no hallarse tan accesibles como las aguas

superficiales. Su origen es el agua superficial que por infiltración natural a través de diferentes capas terrestres pasa al acuífero. Este sistema de filtración natural permite la purificación del agua. No obstante, para considerarse potables han de cumplir ciertas características físicas, químicas y microbiológicas. Además, a largo plazo los acuíferos también se pueden contaminar y por ello, a menudo es necesario un tratamiento de esta agua (no tan intensivo como en el caso de las aguas superficiales).

Las fuentes de contaminación del agua pueden ser naturales (lluvia, materia vegetal en descomposición, erosión del suelo,...) o antropogénicas (actividad ganadera, subproductos de actividad industrial, aguas domésticas,...), pero ambas dan lugar a un agua que no cumple con los requisitos necesarios para asegurar su potabilidad.

Los procesos básicos de tratamiento de agua incluyen varias etapas: coagulación, floculación, separación de partículas (sedimentación/flotación), filtración y desinfección (cloración/ozonización). En muchas de estas etapas se realiza la incorporación de productos químicos al caudal de agua a tratar y es aquí donde I.T.C. S.L. puede ayudarles a su correcta dosificación y control con su amplia gama de bombas y accesorios.

En los casos de aguas cuya calidad se ha comprobado y se consideran aptas para ser susceptibles de consumo humano, como pueden ser muchas aguas subterráneas y aquéllas superficiales que cumplan las características incluidas en el Anexo II de la *Orden Ministerial de 11 de mayo de 1998 sobre características básicas de calidad que deben ser mantenidas en las corrientes de agua superficiales cuando sean destinadas a la producción de agua potable* para ser clasificadas como Tipo A1, su tratamiento previo al consumo humano consiste en un tratamiento físico simple (como podría ser la filtración) seguido de un proceso de desinfección. En el caso de Tipo A2, es necesario un tratamiento físico normal, tratamiento químico y desinfección. Para el Tipo A3 se requiere tratamientos físico y químico intensivos, afino y desinfección.

ANEXO II

Parámetro	Unidad	Tipo A1	Tipo A2	Tipo A3
pH	-	(6.5-8.5)	(5.5-9.0)	(5.5-9.0)
Color	Escala Pt	20	100	200
Sólidos en suspensión	mg/l	(25)	-	200
Temperatura	°C	25	25	-
Conductividad (20°C)	μS/cm	(1000)	(1000)	25
Nitratos (*)	mg/l NO ₃ ⁻	50	50	(1000)
Fluoruros	mg/l F	1.5	(1.7)	50
Hierro disuelto	mg/l Fe	0.3	2	(1.7)
Manganeso	mg/l Mn	(0.05)	(0.1)	(1)
Cobre	mg/l Cu	0.05	(0.05)	(1)
Zinc	mg/l Zn	3	5	(1)
Boro	mg/l B	(1)	(1)	5
Arsénico	mg/l As	0.05	0.05	(1)
Cadmio	mg/l Cd	0.005	0.005	0.1
Cromo total	mg/l Cr	0.05	0.05	0.005
Plomo	mg/l Pb	0.05	0.05	0.05
Selenio	mg/l Se	0.01	0.01	0.05
Mercurio	mg/l Hg	0.001	0.001	0.01
Bario	mg/l Ba	0.1	1	0.001
Cianuros	mg/l CN ⁻	0.05	0.05	1
Sulfatos (**)	mg/l SO ₄ ²⁻	250	250	0.05
Cloruros (**)	mg/l Cl	(200)	(200)	250
Detergentes	mg/l	(0.2)	(0.2)	(200)
	laurilsulfato			(0.5)
Fosfatos (*)	mg/l P ₂ O ₅	(0.4)	(0.7)	
Fenoles	mg/l fenol	0.001	0.005	(0.7)
Hidrocarburos disueltos o emulsionados (tras extracción en éter de petróleo)	mg/l	0.05	0.2	0.1
PAH	mg/l	0.0002	0.0002	0.001
Plaguicidas totales	mg/l	0.001	0.0025	0.005
DQO	mg/l O ₂	-	-	(30)
Oxígeno disuelto	% saturación	(70)	(50)	(30)
DBO5	mg/l O ₂	(3)	(5)	(7)
Nitrógeno Kjeldahl	mg/l N	(1)	(2)	(3)
Amoniaco	mg/l NH ₄ ⁺	(0.05)	1.5	4
Sustancias extraíbles con cloroformo	mg/l seco	(0.1)	(0.2)	(0.5)
Coliformes totales (37°C)	u/100ml	(50)	(5000)	(50000)
Coliformes fecales	u/100ml	(20)	(2000)	(20000)
Estreptococos fecales	u/100ml	(20)	(1000)	(10000)
Salmonellas	-	Ausente en 5 l	Ausente en 1l	-

(*) En lagos poco profundos de lenta renovación

(**) Salvo que no existan aguas más aptas para el consumo

Las cifras entre paréntesis se tomarán como valores indicativos deseables con carácter provisional

De todos los tratamientos citados anteriormente, en este documento nos centraremos en la desinfección. En este proceso se intenta destruir o inactivar los organismos patógenos presentes en el agua, principalmente bacterias, virus y protozoos. Estos organismos, en el caso de aguas de Tipo A2 o Tipo A3, son eliminados en gran parte durante las operaciones de tratamiento físico-químico, pero éstas no son suficientes para asegurar una inocuidad total del agua.

Los tratamientos de desinfección pueden ser físicos (radiación gamma, rayos X, radiación ultravioleta, esterilización térmica,...) o químicos (metales pesados, ácidos o bases, halógenos, ozono, permanganato,...) siendo estos últimos los más habituales. De entre los reactivos químicos, el cloro y sus compuestos derivados son los agentes desinfectantes más utilizados a nivel mundial y por ello los estudiaremos de forma más detallada.

Los valores de cloro residual están regulados por muchos organismos y dependen del uso final del agua. Así pues, para aguas potables, se recomienda que el cloro libre residual esté entre 0.5 y 1 ppm, mientras que en el caso de piscinas y balnearios, debe mantenerse entre 1.5-3.0 ppm. No obstante, estos valores son generales y cada organismo competente ha determinado los suyos propios. Así, la Generalitat de Catalunya especifica que el valor de cloro residual ha de estar entre 0.2 y 0.6 ppm en todos los puntos de la red de suministro.



2. CLORACIÓN

2.1 El cloro y sus derivados

El uso del cloro como agente desinfectante empezó a principios del siglo XX y pasó a completar el proceso de filtración, que ya era ampliamente utilizado.

Los productos de la familia del cloro más habituales para realizar la desinfección del agua son: cloro gaseoso, hipoclorito sódico, hipoclorito cálcico.

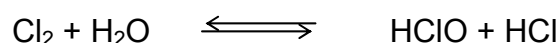
El cloro (Cl_2) es un gas tóxico, más denso que el aire, de color verde amarillento. Es un producto muy oxidante que reacciona con muchísimos compuestos. En presencia de humedad es extremadamente corrosivo y por ello los conductos y los materiales en contacto con él han de ser de aleaciones especiales. El vapor de cloro es irritante por inhalación y puede causar heridas graves en caso de exposición a altas concentraciones. El manejo de cloro se ha de realizar pues, por parte de personal especializado y son necesarios sistemas de control y de alarma muy efectivos. Por estos motivos, es preferible la utilización de hipocloritos en solución o en forma sólida.

El hipoclorito sódico (NaClO) en solución es un desinfectante que se utiliza desde el siglo XVIII y que popularmente se conoce como lejía. A nivel industrial se obtiene por reacción del cloro gas con una solución de hidróxido de sodio. Tras la reacción, se obtienen soluciones acuosas de color amarillo verdoso, que tienen una concentración determinada de cloro activo por litro. Se comercializa en disoluciones de concentraciones entre 3 y 15% en peso. El hipoclorito sódico es un oxidante muy potente e inestable, tanto que una solución de 100 gramos de cloro activo por litro, después de ser almacenada durante 3 meses, puede contener 90 gramos o incluso menos.

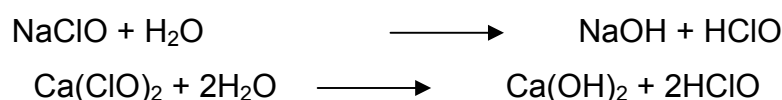
El hipoclorito cálcico ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) es un sólido blanco con contenido entre el 20 y el 70% de cloro activo. Es muy corrosivo y que puede inflamarse al entrar en contacto con ciertos materiales ácidos. Sin embargo, presenta dos ventajas respecto al hipoclorito sódico: su mayor contenido en cloro y su mayor estabilidad. Para ser utilizado, se diluye con agua para obtener una solución de concentración más manejable, por ejemplo, 2%.

2.2 Química del cloro

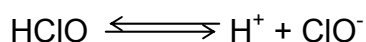
Cuando el Cl_2 se disuelve en agua, se hidroliza rápidamente para generar ácido hipocloroso y ácido clorhídrico.



En el caso de los hipocloritos, se produce la disociación de ambas sales de acuerdo a las ecuaciones:



Así pues, en cualquiera de los casos: cloro, hipoclorito sódico e hipoclorito cálcico, se acaba formando ácido hipocloroso, que es realmente la especie desinfectante. No obstante, éste se disocia según el siguiente equilibrio:



Este equilibrio está regido por la siguiente constante:

$$K_a = \frac{[\text{H}^+][\text{ClO}^-]}{[\text{HClO}]}$$

cuyo valor aproximado es $3.2 \cdot 10^{-8}$.

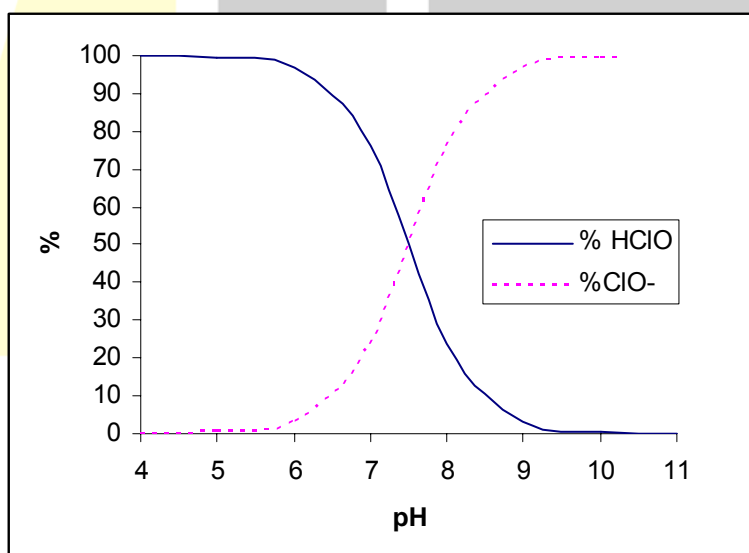
Si realizamos el menos logaritmo de la expresión,

$$-\log K_a = -\log[\text{H}^+] - \log \frac{[\text{ClO}^-]}{[\text{HClO}]}$$

Teniendo en cuenta que el $-\log X$ se conoce como pX , la expresión resulta ser:

$$pK_a = pH - \log \frac{[\text{ClO}^-]}{[\text{HClO}]}$$

En la gráfica siguiente se puede observar la distribución de cada una de las especies en función del pH.



Se aprecia claramente en el gráfico que entre pH 6 y pH 9, ambas especies coexisten, mientras que a pH inferiores a 6 y superiores a 9 se considera la existencia de una única especie. A valor de pH igual al pK_a del ácido hipocloroso ($pK_a \approx 7.5$), se observa que las concentraciones de HClO y ClO^- son iguales, hecho fácilmente deducible de la expresión anterior.

El ácido hipocloroso es un desinfectante mucho más eficaz que el ión hipoclorito, este hecho podría estar relacionado con la inexistencia de carga en la molécula de ácido hipocloroso. Al ser una molécula neutra, le sería más fácil penetrar la pared bacteriana con la consiguiente actividad bactericida. A partir de este hecho, y teniendo en cuenta lo visto hasta ahora, es fácil entender la diferente actividad del hipoclorito como agente bactericida a diferentes valores de pH. Así, a pH por debajo de 7.5 la cantidad de hipoclorito para desinfectar un agua es mucho menor que la necesaria para esa misma agua a pH superior a 7.5.

Además de su aplicación como desinfectante, el cloro y sus derivados han demostrado ser útiles también en:

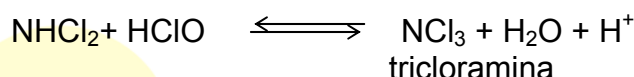
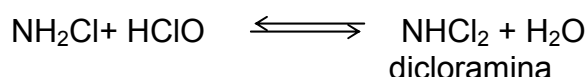
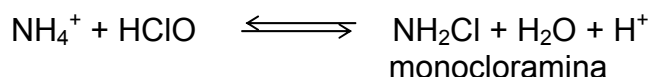
- Control de olores y sabores
- Prevención de crecimiento de algas
- Eliminación de hierro y manganeso
- Destrucción de ácido sulfhídrico
- Eliminación de colorantes orgánicos
- Mejoras en la coagulación por sílica
- ...

En la tabla siguiente se muestra, de forma resumida, algunos de estos usos y sus dosis típicas.

Aplicación	Dosis	pH óptimo	Tiempo de reacción	Efectividad
Hierro	0.62 mg/mg Fe	7.0	< 1h	Bien
Manganeso	0.77 mg/mg Mn	7-8 9.5	1-3 h minutos	Cinética lenta
Crecimiento biológico	1-2 mg/l	6-8		Bien
Olor/sabor	Variable	6-8	Variable	Variable
Eliminación de color	Variable	4-6.8	Minutos	Bien
Mejillones cebra	2-5 mg/l 0.2-0.5 mg/l		Nivel de shock Nivel residual	Bien
Almejas asiáticas	0.3-0.5 mg/l		Continuo	Bien

Una de las desventajas del uso de cloro y derivados es que reacciona con mucha materia orgánica y da lugar a trihalometanos (THM) muchos de los cuales se ha demostrado son tóxicos o carcinogénicos. Otro inconveniente es la formación de clorofenoles en aguas que contienen fenoles, lo que daría lugar a malos olores.

El cloro también reacciona con el amoníaco disuelto en el agua para formar cloraminas. Estos productos también tienen cierto poder desinfectante, aunque son aproximadamente 25 veces menos eficaces que el cloro libre. No obstante, su tiempo de permanencia en el agua es largo y por ello a veces se han usado como reserva de cloro residual. Presentan dos grandes inconvenientes: pueden dar lugar a olores y sabores y son potencialmente tóxicas de forma crónica.



Otro derivado del cloro que se utiliza como desinfectante es el dióxido de cloro (ClO_2). Éste es igual de efectivo que el cloro/hipoclorito y menos sensible a los cambios de pH por lo que respecta a su actividad desinfectante. Además no se combina con el amoníaco ni con mucha materia orgánica, con lo cual se evita la aparición de cloraminas y otros compuestos de sabores y olores desagradables. No obstante, es un gas 10 veces más tóxico que el cloro gas y explosivo al aire en concentraciones 8-12%. Asimismo, como producto de reacción da lugar a clorito, cuyo riesgo para la salud humana es incierto.

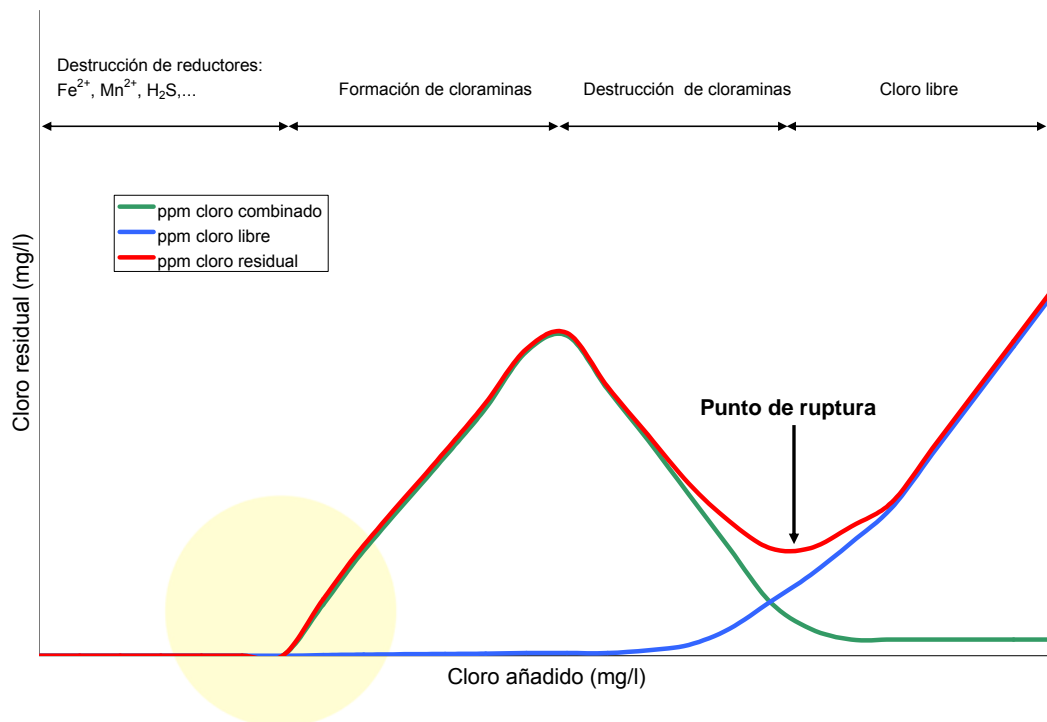
2.3 Demanda de cloro

De todo lo expuesto anteriormente, se puede deducir que el cloro (y derivados) además de reaccionar con los microorganismos, también lo hace con otra materia disuelta en el medio: materia orgánica, hierro, manganeso,... Por este motivo, para tener un cierto nivel de cloro residual, la cantidad necesaria que se ha de añadir es bastante superior al residual obtenido.

Por todo ello, antes de decidir la dosis de cloro que se ha de utilizar para desinfectar, se ha de determinar la demanda de cloro, es decir, la cantidad de cloro que se consume hasta la aparición del residual.

En la figura de la página siguiente se muestra la variación de la cantidad de cloro residual en función del cloro añadido para un caso hipotético general.

- En una primera etapa, se produce la oxidación de sustancias reductoras, principalmente inorgánicas: Fe^{2+} , Mn^{2+} , H_2S ,... Todo el hipoclorito que se añade se consume, con lo cual no hay cloro disponible.
- Una vez destruidas estas sustancias, se iniciaría una etapa en la que se formarían compuestos clorados, principalmente cloraminas, que actuarían como cloro residual, otorgando un cierto carácter desinfectante al sistema.



- Cuando todo el amoníaco y las aminas orgánicas ha reaccionado con el cloro, después del máximo de la curva, se inicia una etapa de destrucción de estos compuestos clorados formados en la etapa anterior. A pesar de añadir más cloro, no se observa un aumento de la cantidad de cloro disponible sino una disminución, ya que se consume tanto el cloro residual que se había formado, como el hipoclorito que se añade. En la ecuación siguiente se puede observar este efecto:



La capacidad desinfectante del sistema, pues, disminuye en esta etapa.

- Después del punto de ruptura (*breakpoint*), todo el cloro que se añade se mantiene como cloro libre. Así pues, se considera que a partir de este punto tanto la desinfección como la eliminación de materia orgánica oxidable por cloro, se ha llevado a cabo y el agua tiene un cierto valor de cloro libre residual.

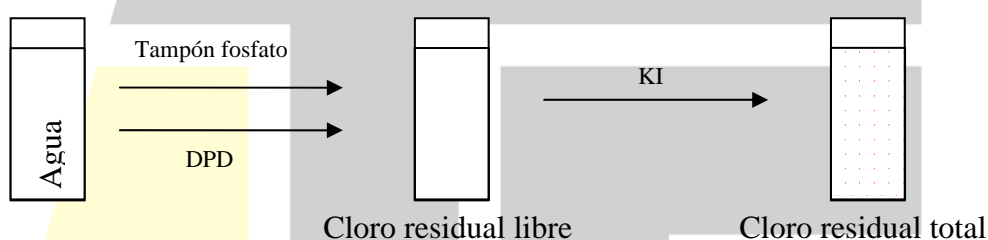
La demanda de cloro es la diferencia existente entre la cantidad de cloro aplicada al agua y la de cloro disponible libre. Así pues, podemos considerar que la demanda de cloro aproximadamente coincide con la dosis a la que se alcanza el punto de ruptura.

El cloro libre residual puede presentarse en forma de Cl_2 , HClO y/o ClO^- , dependiendo del pH de trabajo y por lo tanto corresponde a la suma de estas tres especies.

2.4 Determinación de cloro

Habitualmente la determinación de cloro residual en aguas se realiza por reacción con o-tolidina o bien N,N-dietil-p-fenilendiamina (DPD, *N,N-diethyl-p-phenylen-diamine*). La primera de ellas se realiza de forma simple, pero presenta el inconveniente de que no permite una buena diferenciación entre el cloro residual libre y el combinado. La o-tolidina reacciona rápidamente con el cloro libre, pero a partir de los 5 segundos también reacciona con el combinado, de forma que no se puede cuantificar ambos por separado, ya que es casi imposible realizar el análisis por separado en una escala tan corta de tiempo. Al no poder determinar si realmente existe cloro libre (y en qué cantidad), podemos tener un agua mal clorada: alto contenido en cloro combinado, pero ausencia de cloro libre (es decir, estaríamos clorando por debajo del punto de ruptura).

Por lo anteriormente expuesto, es más recomendable el uso de DPD, que si permite distinguir entre cloro libre y combinado. La DPD, a pH entre 6.2 y 6.5 da lugar a una coloración rojiza que es proporcional a la cantidad de cloro libre presente en el medio. Por comparación con una escala de color se puede determinar la cantidad de cloro libre. Sobre la misma muestra, se añade yoduro potásico, que libera el cloro combinado y hace que éste reaccione con la DPD, con lo que finalmente tenemos la lectura de cloro residual total. Por diferencia entre ambos valores, podemos determinar el cloro residual combinado.



Esta reacción se puede monitorizar de forma sencilla en forma de kits de reacción, suministrados por multitud de proveedores. Una forma más precisa de realizar esta determinación es utilizando un fotómetro, que es un instrumento que realiza la lectura de la intensidad de color y permite relacionarla directamente con la concentración de los productos. La determinación colorimétrica de cloro por reacción con DPD está reconocido como el método estándar de la EPA 4500-Cl G.

En el mercado existen dispositivos que permiten la realización de estas reacciones en línea, pero su coste y complejidad no los hacen muy habituales. Otro sistema de determinación de cloro es el método amperométrico. En él, se produce la reducción del cloro en solución, lo que genera una intensidad de corriente que es proporcional a la concentración de cloro. Existen versiones para determinar sólo cloro libre o para determinar cloro total. La gran ventaja de este método es la posibilidad de realizar lecturas en continuo lo que permite un control en línea de la cloración. Su gran inconveniente es el elevado coste de un sistema de control de estas características.

2.5 Control de la cloración

Con todo lo expuesto hasta ahora, tenemos ya las bases para poder discutir un poco más en profundidad sobre qué parámetros nos permiten decidir que un agua está correctamente tratada. Como hemos visto, la cloración es correcta siempre que nos encontremos en valores de cloro residual superiores a los del punto de ruptura (que coinciden aproximadamente con los valores de cloro residual libre). Las cantidades de cloro libre residual recomendadas por los organismos competentes para aguas potables oscilan entre 0.5 y 1.0 ppm y entre 1.5 y 3.0 ppm para piscinas.

No obstante, se trata de cloro libre, es decir, esta cantidad no es el cloro añadido, puesto que parte de éste se ha consumido por sustancias presentes en el agua (demanda de cloro).

Hasta este momento no hemos tenido en cuenta en ningún momento la velocidad de reacción del cloro (hipoclorito) con los microorganismos. En este aspecto, conviene definir el concepto Ct, que es el producto de la concentración de hipoclorito dosificada por el tiempo de contacto entre el cloro y el microorganismo, para asegurar la desinfección deseada. El valor de Ct depende del microorganismo en cuestión y la temperatura del agua. Además, tal y como se ha podido ver anteriormente, la actividad del hipoclorito está muy influenciada por el pH; es decir, en términos de desinfección no es lo mismo tener 5ppm a pH 7 que tenerlos a pH 8. Por este motivo, Ct también depende del pH del agua. En la tabla siguiente se muestra un ejemplo de Ct. Se puede observar que estos valores también dependen de la concentración de cloro disponible.

El producto Ct se expresa como mg·min/l, es decir, tiene dimensiones de concentración por tiempo.

Inactivación de Giardia Cysts a 20°C									
Concentración Cloro (mg/l)	pH 6.5			pH 7.5			pH 8.5		
	90%	99%	99.9%	90%	99%	99.9%	90%	99%	99.9%
0.6	15	30	45	21	43	64	31	61	92
1.0	16	31	47	22	45	67	33	65	98
1.4	16	33	49	23	47	70	34	69	103
1.8	17	34	51	25	49	74	36	72	108
2.2	18	35	53	26	51	77	38	75	113
2.6	18	37	55	27	53	80	39	78	117
3.0	19	38	57	28	55	83	41	81	122

Ejemplo 1
 Agua a 20°C
 pH 7.5
 Inactivación 99%
 Dosis a emplear 1 mg/l

Inactivación de Giardia Cysts a 20°C									
Concentración Cloro (mg/l)	pH 6.5			pH 7.5			pH 8.5		
	90%	99%	99.9%	90%	99%	99.9%	90%	99%	99.9%
0.6	15	30	45	21	43	64	31	61	92
1.0	16	31	47	22	45	67	33	65	98
1.4	16	33	49	23	47	70	34	69	103
1.8	17	34	51	25	49	74	36	72	108
2.2	18	35	53	26	51	77	38	75	113
2.6	18	37	55	27	53	80	39	78	117
3.0	19	38	57	28	55	83	41	81	122

Así, $Ct = 45 \text{ mg} \cdot \text{min/l}$

Y por tanto, el tiempo de contacto recomendado resulta de dividir este valor por la concentración

$$t_{\text{contacto}} = 45/1 = 45 \text{ min.}$$

Ejemplo 2

Se ha de tratar la misma agua del ejemplo anterior, pero se utiliza una dosis de cloro de 3 mg/l.

En este caso $Ct = 55$, un valor superior al anterior, pero

$$t_{\text{contacto}} = 55/3 = 18.3 \text{ min.}$$

Ejemplo 3

Se ha de tratar la misma agua del **Ejemplo 1**, pero ahora el pH del agua es 8.5.

En este caso $Ct = 65$, un valor superior al anterior y

$$t_{\text{contacto}} = 65/1 = 65 \text{ min.}$$

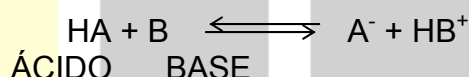
Como se ha podido ver en los ejemplos anteriores, el tiempo de desinfección depende de muchos parámetros y, el hecho de tener una determinada concentración de cloro libre no asegura una adecuada desinfección si no se mantiene un estricto control tanto del tiempo de contacto como de todos los otros factores: pH, temperatura,... Por este motivo, para controlar la desinfección se recomienda la monitorización, no del cloro libre, sino del potencial redox del medio (ORP, *oxidation-reduction potential*). Mantener un valor de ORP dentro del rango asignado nos asegura que la cantidad de oxidante es adecuada para garantizar el proceso de desinfección. La Organización Mundial de la Salud adoptó en 1972 un valor de 650mV como adecuado para agua purificada. La German Standards Agency adoptó un valor de 750mV para la desinfección de piscinas públicas, mientras que el National Swimming Pool Institute propuso un valor de 650mV para spas públicos.

En general, en las condiciones de potencial anteriormente especificadas, se puede considerar que en 30 minutos el agua está adecuadamente desinfectada. No obstante, a estos valores de potencial puede ocurrir tanto la sobredosificación como la no desinfección y por ello se ha de realizar un estudio individualizado de cada caso.

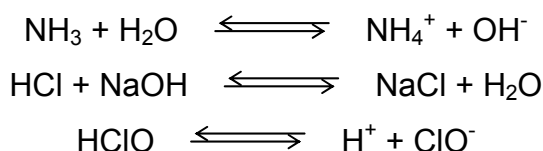
El potencial redox del medio es fácilmente mesurable mediante electrodos que permiten incluso realizar lecturas en continuo en el caudal de agua tratada. Además, son elementos muy económicos. Todo ello hace muy atractivo el control de la cloración mediante el potencial redox. Pero antes de seguir adelante con la discusión, veamos qué es el potencial redox.

2.6 Equilibrio redox y cloro

Existen muchos tipos de reacciones químicas. Unas de las más conocidas son las ácido-base. De forma general, podemos decir que son reacciones en las que se intercambian protones. La especie que cede los protones es un ácido y la que los acepta es una base.



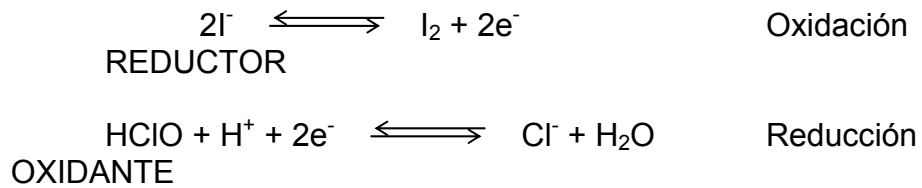
Las siguientes reacciones son ejemplos de reacciones ácido-base:



En todas ellas se produce un intercambio de protones y están regidas por una constante de equilibrio, tal y como se explicó en el apartado sobre la química del cloro.

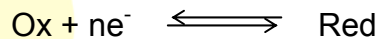
En el caso de las reacciones redox lo que se produce es un intercambio de electrones, que provoca un cambio en el estado de oxidación (valencia) de los reactivos. En este caso, la sustancia que cede el electrón es un reductor y la

que lo acepta es un oxidante. La reacción en que un reductor se oxida se llama oxidación y la reacción en que un oxidante se reduce se llama reducción.



Al tener lugar una transferencia de electrones, se produce una diferencia de potencial que puede ser medida mediante el sistema electródico adecuado. El electrodo de trabajo suele ser de platino, aunque también se utiliza el oro o el grafito.

Si consideramos una semirreacción redox general:

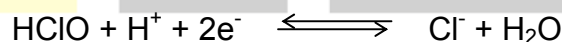


El potencial generado en el electrodo viene dado por la expresión:

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{\text{red}}}{a_{\text{ox}}}$$

Esta expresión, conocida como Ecuación de Nerst, rige el equilibrio redox. En ella, a_{red} y a_{ox} son las actividades de la especie reducida y oxidada, respectivamente. Sin ser muy estrictos, podemos considerar que la actividad coincide con la concentración, expresada en mol/l o, si el producto es un gas, con su presión en atmósferas. E_0 es el potencial estándar referido a un electrodo de hidrógeno cuando la actividad de la sustancia es 1. R y F son constantes, n es el número de electrones intercambiados y T la temperatura absoluta (grados Kelvin), que corresponde a la temperatura en grados centígrados + 273.15.

A modo de ejemplo, mostraremos los valores para la semirreacción de reducción del hipoclorito:



Aquí, si expresamos E en mV, resulta

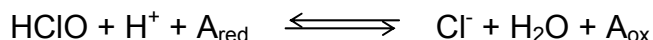
$$E = 1490 - 0.198 \cdot T \cdot \log \frac{[\text{Cl}^-]}{[\text{HClO}][\text{H}^+]}$$

Modificamos un poco más esta expresión:

$$E = 1490 - 0.198 \cdot T \cdot (\text{pH} + \log \frac{[\text{Cl}^-]}{[\text{HClO}]})$$

Tal y como se observa en la expresión, el potencial del electrodo para la reacción de reducción del HClO depende del pH y la temperatura. El potencial disminuye al aumentar el pH y también al aumentar la temperatura, pero en esta última presenta una menor influencia que el primero.

Si consideramos el equilibrio redox completo (oxidación + reducción)



Donde A es cualquier sustancia que reacciona con el hipoclorito: H_2S , Fe^{2+} , ... Para la reacción completa, a 25°C , se puede escribir la ecuación de Nerst de la siguiente forma:

$$E = E_{0_{\text{HClO}}} - E_{0_A} - \frac{0.059}{n} \log \frac{[\text{Cl}^-][\text{A}_{\text{ox}}]}{[\text{HClO}][\text{H}^+][\text{A}_{\text{red}}]}$$

donde n es el número de electrones intercambiados en la reacción. Como se puede ver en la ecuación, el potencial del electrodo depende tanto de la naturaleza y concentración del oxidante como de la del reductor, por tanto, en cada tipo de agua, el potencial redox será diferente dependiendo de sus propias características químicas.

La medida de pH es un caso específico de medida de potencial redox. En éste, se realiza una lectura del potencial de varias soluciones de pH conocido y se construye un sistema de calibración de forma que a cada valor de potencial se le asigna un valor de pH.

En el caso de medidas absolutas de potencial redox, no se suele realizar una calibración propiamente dicha, ya que normalmente se utiliza como sistema de control de reacciones, para observar cambios en su valor y no por su valor en sí mismo. Así, la comprobación de las lecturas de potencial de soluciones patrón sólo se utiliza para controlar el buen funcionamiento del sistema de medida. Para ello, se hace un cortocircuito en el sistema de lectura y por tanto se realiza una lectura de potencial 0. A continuación se comprueba la lectura de potencial en una de las varias soluciones estándar de potencial redox conocido que existen: 192mV, 258mV, 468mV, 650mV... Se trata de seleccionar aquélla que más cerca esté del valor de potencial redox de trabajo. Para la cloración de aguas, la solución estándar más adecuada sería la de 650 mV.

2.7 Protocolo de cloración

A modo general, se puede establecer un protocolo de cloración que consta de varias etapas:

1. Estimación de la demanda de cloro o punto de ruptura. Esto nos permitirá determinar la dosis de cloro que se ha suministrar para conseguir una completa desinfección del agua.
2. Establecimiento del valor de Ct a que necesitamos trabajar. Esto permitirá ajustar el tiempo de contacto entre el hipoclorito y los microorganismos de forma que obtengamos un agua desinfectada. Habitualmente, la dosificación de desinfectante se realiza en un depósito en la red de distribución para permitir la máxima homogeneización del agua. El dimensionado de tanques de tratamiento ha de tener en cuenta el parámetro Ct para permitir un tiempo de permanencia adecuado al tratamiento. En general, se considera que a pH inferior a 8, un tiempo de contacto de 30 minutos es suficiente. Se recomienda que el tiempo de permanencia del agua en el tanque sea inferior a 48 horas.
Si el tanque ya estaba en funcionamiento antes de iniciar la cloración y estaba infradimensionado, podría ocurrir que el tiempo de permanencia del agua no fuera suficiente, lo que daría lugar a una mala desinfección. En estos casos, para mantener el parámetro Ct sería necesario incrementar la dosis de tratamiento.
3. Una vez desinfectada el agua, se ha de comprobar, mediante un kit de determinación de cloro, que la cantidad de cloro residual en el punto más alejado de la red de suministro está dentro de lo estipulado por las autoridades competentes. En caso de ser demasiado bajo, se tendría que aumentar la dosis de cloro suministrada, con posterioridad a la desinfección. Por el contrario, si la dosis es demasiado elevada- como ocurriría en el caso de un tanque infradimensionado-, la adición de un reductor (como el bisulfito sódico o el metabisulfito) permitiría la eliminación del cloro residual hasta el nivel necesario. Una vez el cloro se mantiene dentro de los valores residuales requeridos, se puede realizar una medida del potencial redox del sistema ya que éste nos servirá como sistema de control, siempre y cuando no haya grandes variaciones en la calidad del agua de alimentación del sistema.

Este procedimiento aquí descrito es meramente orientativo y en ningún caso constituye una receta exacta a seguir. En caso de duda, se recomienda pedir asesoramiento a los organismos competentes en materia de Salud Pública.

3. EQUIPOS DE CLORACIÓN

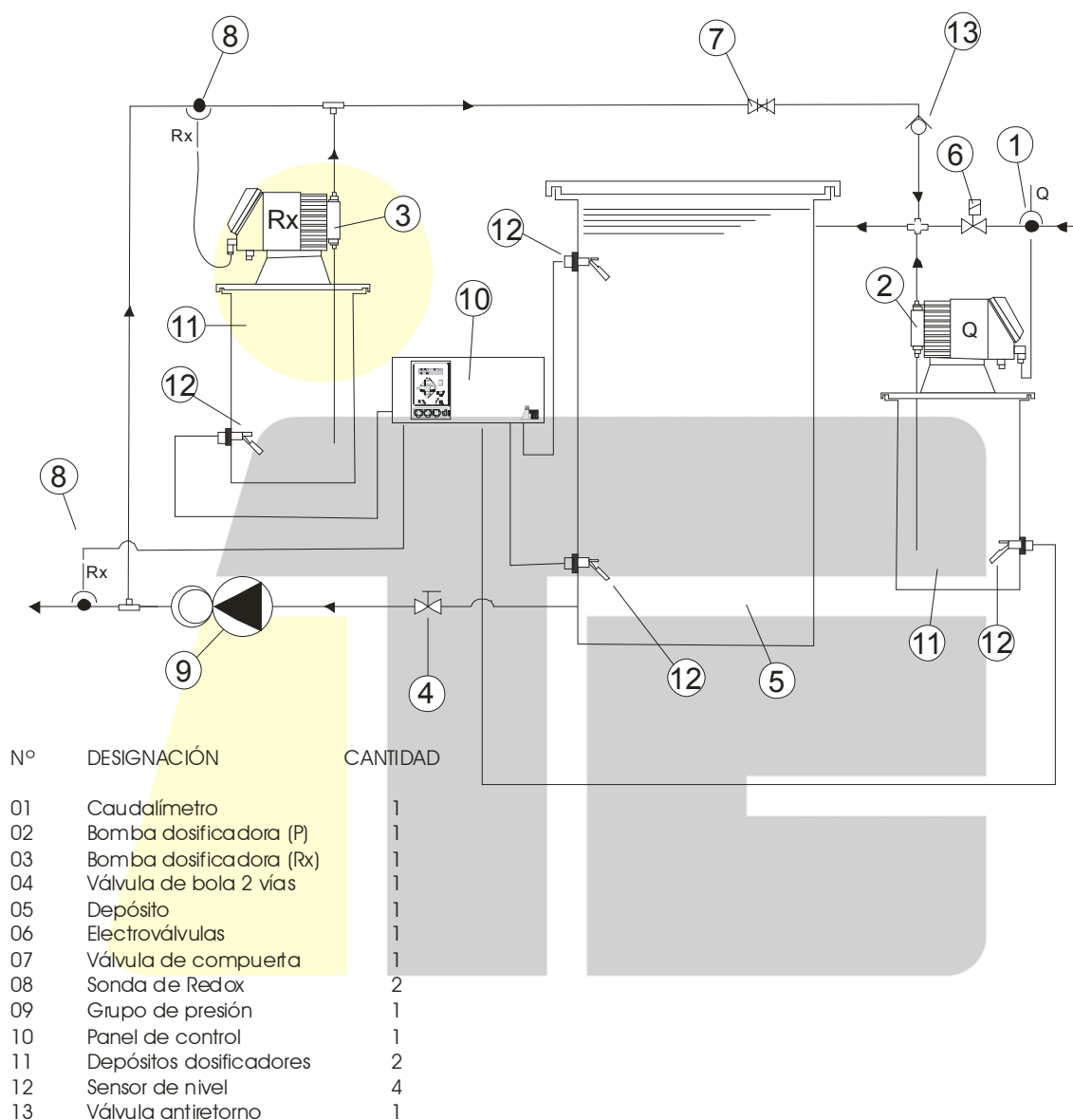
A la hora de clorar un agua podemos encontrarnos en varios casos de características bien diferenciadas:

- A. Aguas destinadas a destino humano que no han sido cloradas anteriormente. Sería el caso de las aguas provenientes de manantiales o pozos y que se suministran directamente a los consumidores. En este caso, sería aplicable todo lo expuesto anteriormente. La cantidad de cloro dosificada se utilizaría para desinfectar y para mantener un residual. La cloración se realizaría en tanque con un sistema de recirculación para controlarla adecuadamente de forma que el agua que se suministra a los consumidores en todo momento contiene el residual necesario.
- B. Aguas que han sido cloradas previamente pero que, por lejanía entre el punto de tratamiento y el de suministro final o por posibles pérdidas de cloro posteriores al proceso de cloración, no presentan un cloro residual adecuado en el punto más alejado de la red de suministro. En estos casos, se trata de una dosis de recordatorio que sólo se emplea para mantener un residual puesto que a priori el agua ha sido previamente desinfectada. Se realizaría en este caso una cloración en línea, en contraposición a la cloración en tanque requerida en el caso A.
- C. Combinación de los dos casos anteriores. Son aguas que no han sido cloradas anteriormente (y por tanto necesitan un tanque de reacción) pero que no tienen un sistema de recirculación que permita una cloración controlada en todo momento. Toda el agua que sale del tanque va a parar directamente a la población y por ello se ha de realizar una dosis de recordatorio (en caso necesario) en línea.

Las soluciones que propone ITC también son diferentes para cada uno de los casos, si bien la configuración que presenta mayor seguridad es la primera. En cualquiera de los tres casos expuestos, es primordial el establecimiento de un protocolo de mantenimiento y calibración que permita detectar cualquier anomalía que pudiera afectar al correcto funcionamiento de los equipos.

3.1 Cloración en tanque con recirculación

En el esquema se muestra a continuación corresponde a una instalación estándar para este tipo de tratamiento. Es la configuración estándar del KIT DE CLORACIÓN EN TANQUE CON RECIRCULACIÓN ofrecido por ITC. Consta de diversos elementos, que pueden ser suministrados por ITC, que pasamos a describir a continuación.



- A la entrada de agua en la cuba, se realiza una cloración proporcional con una **DOSITEC P**. A la salida, en caso de ser necesario, se realizaría un ajuste (dosis recordatorio) mediante una **DOSITEC RX**, controlada de forma que realiza una dosificación por regulación on/off hasta llegar al valor consigna de potencial.
- Se crea un circuito de recirculación de forma que parte del agua que sale del tanque se suministra a la población y parte vuelve al tanque. Así

se puede llegar al valor consigna para la totalidad del contenido del tanque. La proporción de agua que se recircula se puede seleccionar mediante la válvula de compuerta que controla la recirculación.

- Como medida de emergencia, se realiza la lectura del potencial redox en el agua suministrada, de forma que, si nos encontramos por encima del valor consignado, una señal de alarma pare la dosificación de cloro en ambos puntos.
- Como el consumo de agua no es siempre regular, se colocan dos sondas de nivel en la cuba que controlarán la electroválvula que regula la cantidad de agua que entra en el sistema.
- Adicionalmente, los dos depósitos que contienen el hipoclorito incluyen sendos sensores de nivel que permiten el paro de las bombas en caso de agotamiento del producto químico.
- El cuadro eléctrico realiza las gestiones de control de cada uno de los elementos descritos anteriormente.

El dimensionado de la bomba proporcional viene dado por el caudal de agua a tratar y la dosis necesaria para llegar al punto de ruptura, teniendo en cuenta todo lo expuesto anteriormente en materia de tiempo de contacto entre el cloro y el agua.

En general,

$$Q_{Cl} = \frac{Q_{H_2O} \times D}{10 \times \%}$$

Donde Q_{Cl} es el caudal de hipoclorito expresado en l/h

Q_{H_2O} es el caudal de agua a tratar en m^3/h

D es la dosis de hipoclorito requerida, expresada en ppm

$\%$ es el porcentaje de pureza del hipoclorito comercial

Ejemplo

Se necesita clorar un agua de manantial con un caudal de entrada en la cuba de tratamiento de $50 m^3/h$. La dosis de cloro necesaria es de $3 mg/l$ y se suministrará a partir de un producto comercial con una riqueza del 5% en cloro activo.

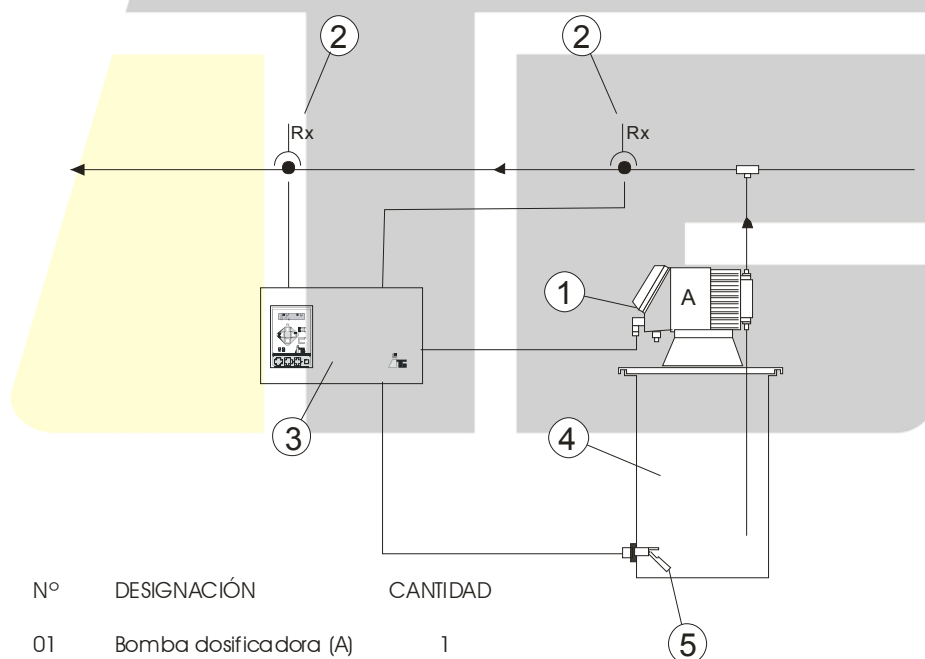
$$Q = \frac{50 \times 3}{10 \times 5} = 3 l/h$$

Así, en este caso, la bomba más adecuada sería una DOSITEC P de $10 l/h$. Para el aporte de cloro como dosis suplementaria (recordatorio), la bomba seleccionada es la DOSITEC RX de $2 l/h$.

3.2 Cloración en línea.

En este caso no existe ningún tanque que actúe como pulmón a la hora de controlar la dosificación ya que la desinfección propiamente dicha ya se ha llevado a cabo anteriormente. Se trata de un caso de cloración de recordatorio para mantener el nivel de cloro residual necesario. Un ejemplo sería una estación de post-cloración en una red de distribución muy extensa donde el tratamiento de desinfección se ha realizado a mucha distancia del punto de consumo. El esquema que se muestra en la página siguiente es la configuración estándar del KIT DE CLORACIÓN EN LÍNEA

- A partir de la lectura de potencial redox realizada por la primera sonda de redox, mediante un protocolo de aproximación PI, la bomba **DOSITEC A** regula la frecuencia de bombeo para ajustar el valor de potencial al de consigna.
- Como medida de emergencia, se realiza la lectura del potencial redox en el agua suministrada, de forma que, si nos encontramos por encima del valor consignado, una señal de alarma pare la dosificación de cloro.
- Adicionalmente, el depósito que contiene el hipoclorito incluye un sensor de nivel que permite el paro de la bomba en caso de agotamiento del producto químico.
- El cuadro eléctrico realiza las gestiones de control de cada uno de los elementos descritos anteriormente.



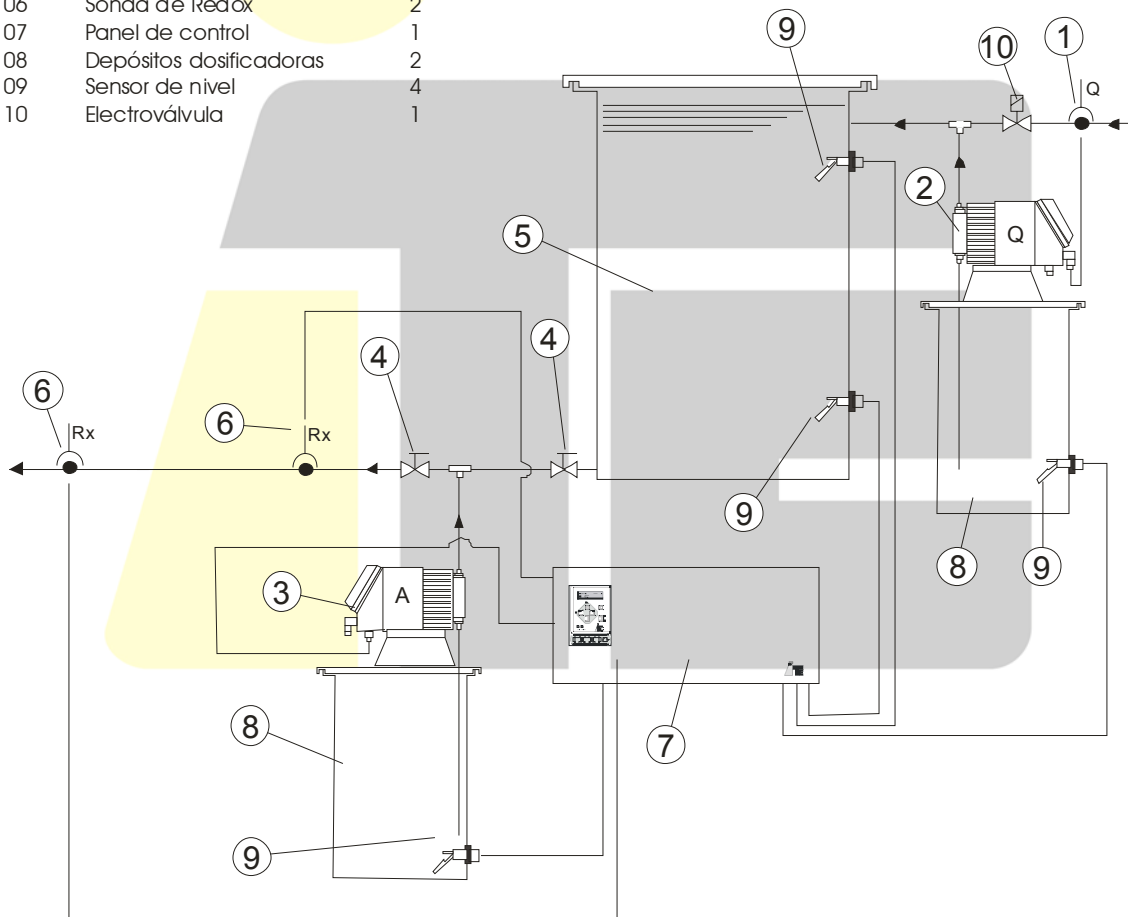
Nº	DESIGNACIÓN	CANTIDAD
01	Bomba dosificadora (A)	1
02	Sonda de Redox	2
03	Panel de control	1
04	Depósito dosificador	1
05	Sensor de nivel	1

Como, en general, la cantidad de cloro que se ha de añadir en este caso suele ser bastante pequeña, se recomienda el uso de la bomba DOSITEC A de 2 l/h a no ser que se trate de caudales de agua muy elevados.

3.3 Cloración en tanque sin recirculación

El esquema se muestra corresponde a una instalación estándar para este tipo de tratamiento. Es la configuración estándar del KIT DE CLORACIÓN EN TANQUE SIN RECIRCULACIÓN ofrecido por ITC. Consta de diversos elementos, todos ellos suministrados por ITC, que pasamos a describir a continuación.

Nº	DESIGNACIÓN	CANTIDAD
01	Caudalímetro	1
02	Bomba dosificadora (P)	1
03	Bomba dosificadora (A)	1
04	Válvula de bola 2 vías	2
05	Depósito	1
06	Sonda de Redox	2
07	Panel de control	1
08	Depósitos dosificadoras	2
09	Sensor de nivel	4
10	Electroválvula	1



- A la entrada de agua en la cuba, se realiza una cloración proporcional con una **DOSITEC P**. A la salida, en caso de ser necesario, se realizaría un ajuste (dosis recordatorio) mediante una **DOSITEC A**, controlada de forma que realiza una dosificación por regulación de la frecuencia de inyección de la bomba a partir de la lectura de potencial redox.

- Como medida de emergencia, se realiza la lectura del potencial redox en el agua suministrada, de forma que, si nos encontramos por encima del valor consignado, una señal de alarma pare la dosificación de cloro en ambos puntos.
- Como el consumo de agua no es siempre regular, se colocan dos sondas de nivel en la cuba que controlarán la electroválvula que regula la cantidad de agua que entra en el sistema.
- Adicionalmente, los dos depósitos que contienen el hipoclorito incluyen sendos sensores de nivel que permiten el paro de las bombas en caso de agotamiento del producto químico.
- El cuadro eléctrico realiza las gestiones de control de cada uno de los elementos descritos anteriormente.

El dimensionado de la bomba proporcional viene dado por el caudal de agua a tratar y la dosis necesaria para llegar al punto de ruptura, teniendo en cuenta todo lo expuesto anteriormente en materia de tiempo de contacto entre el cloro y el agua.

En general,

$$Q_{Cl} = \frac{Q_{H_2O} \times D}{10 \times \%}$$

Donde Q_{Cl} es el caudal de hipoclorito expresado en l/h

Q_{H_2O} es el caudal de agua a tratar en m^3/h

D es la dosis de hipoclorito requerida, expresada en ppm

% es el porcentaje de pureza del hipoclorito comercial

Ejemplo

Se necesita clorar un agua de manantial con un caudal de entrada en la cuba de tratamiento de $10 m^3/h$. La dosis de cloro necesaria es de $1.5 mg/l$ y se suministrará a partir de un producto comercial con una riqueza del 5% en cloro activo.

$$Q = \frac{10 \times 1.5}{10 \times 5} = 0.3 // h$$

Así, en este caso, la bomba más adecuada sería una DOSITEC P de 2 l/h. Para el aporte de cloro como dosis suplementaria (recordatorio), la bomba seleccionada es la DOSITEC A de 2 l/h.