

Capítulo 4

RADIACIÓN ULTRAVIOLETA



Introducción

Aunque la radiación ultravioleta (o luz ultravioleta o UV) no es popular en el tercer mundo, es el único método físico práctico que puede usarse para la desinfección del agua en comunidades pequeñas (con sistema centralizado de agua). Las aplicaciones prácticas de la radiación ultravioleta comenzaron en 1901 cuando se consiguió producir esta luz artificialmente. Esta técnica se consideró para la desinfección del agua de bebida cuando se comprobó que el cuarzo era una de los pocos materiales casi totalmente transparente a la radiación ultravioleta, lo que permitió la envoltura protectora de los tubos. Los primeros intentos experimentales se llevaron a cabo en Marsella, Francia, en 1910. Entre 1916 y 1926, se usó UV en los Estados Unidos para la desinfección del agua y para proveer agua potable a los barcos. Sin embargo, la popularidad del cloro y sus derivados, asociados a su bajo costo de aplicación, hicieron que se retardara la producción de equipos hasta la década de 1950 y más aún hasta la de 1970 en que las lámparas comienzan a ser confiables y de vida prolongada.

La aparición de los subproductos de la desinfección (SPD), sobretodo aquellos asociados a la desinfección con cloro, hicieron que numerosos sistemas pasaran de éste a la UV. Al comienzo del siglo XXI, en Europa existen unos 2.000 sistemas de aguas desinfectados con UV, y una planta en Alemania (Wahnbachtalsperrenverband), trata nada menos que un caudal de 329.000 m³/día.

La gran ventaja en relación con los SPD se contrabalancea con su notoria desventaja: la radiación UV no otorga ningún residual al agua tratada para hacer frente a eventuales futuras contaminaciones en las redes de distribución o en las viviendas.

A pesar de esto último, la desinfección con radiación ultravioleta se ha venido utilizando ampliamente en los sistemas de abastecimiento de agua de pequeños establecimientos, como hospitales, industrias de alimentos y bebidas y hoteles. Recientemente se ha incrementado su uso para la desinfección de efluentes de plantas de tratamiento de aguas servidas y ha vuelto a recibir atención como desinfectante de pequeños sistemas de agua, debido a su capacidad de desinfectar sin producir cambios físicos o químicos notables en el agua tratada. Existe en el mercado una gama de equipos para grandes plantas de tratamiento de agua hasta un pequeño artilugio que cabe en una mano y que los caminantes usan para desinfectar aguas de lagos y ríos.

Propiedades de la radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta se caracteriza por longitudes de onda muy cercanas a las de la luz del sol. Los parámetros más importantes de la radiación UV relacionados con la desinfección del agua son:

- 1 *Longitud de onda:* El rango germicida se encuentra entre 240 y 280 nm (nanómetros) y se obtiene la máxima eficiencia desinfectante cerca de los 260 nm. Estos límites se encuentran dentro del rango denominado *ultravioleta - C* (100-280 nm), que se diferencia del *ultravioleta - A* (315-400 nm) y del *ultravioleta - B* (280-315 nm).
- 1 *Calidad del agua:* La temperatura del agua tiene poca o ninguna influencia en la eficacia de la desinfección con luz ultravioleta, pero afecta el rendimiento operativo de la lámpara de luz ultravioleta, cuando la misma está inmersa en el agua. La energía ultravioleta es absorbida por el agua, pero en mucho mayor grado es absorbida por los sólidos en suspensión o disueltos, turbiedad y color. En el agua para consumo humano, la concentración de los

sólidos en suspensión es generalmente inferior a 10 ppm, nivel al que empieza a experimentar problemas con la absorción de la luz ultravioleta. La turbiedad debe ser tan baja como sea posible y en todo caso, deben evitarse turbiedades mayores de 5 UTN.

- 1 *Intensidad de la radiación:* A menor distancia del agua respecto al punto de emisión de los rayos, mayor será la intensidad de los mismos y por tanto la desinfección será más eficiente. Con respecto a esta condición, existe una regla general que dice que no debe haber más de 75 mm de profundidad de agua para asegurar que cada porción de la misma sea alcanzada por los rayos adecuadamente.
- 1 *Tipo de microorganismos:* La radiación ultravioleta se mide en microvatios por centímetro cuadrado ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$) y la dosis en microvatios segundo por centímetro cuadrado ($\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) (radiación x tiempo). La resistencia al efecto de la radiación dependerá del tipo de microorganismo. No obstante, la dosificación de luz ultravioleta requerida para destruir los microorganismos más comunes (coliformes, pseudomonas, etc.) varía entre 6.000 y 10.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$. Las normas para la dosificación de luz ultravioleta en diferentes países varían entre 16.000 y 38.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$.
- 1 *Tiempo de exposición:* Como cualquier otro desinfectante, el tiempo de exposición es vital para asegurar un buen desempeño. No es fácil determinar con exactitud el tiempo de contacto (ya que éste depende del tipo de flujo y de las características del equipo), pero el período debería estar relacionado con la dosificación necesaria (recordar la explicación y el concepto del $C \times T$). De cualquier modo, las exposiciones normales son del orden de 10 a 20 segundos.

Para un grado determinado de inactivación de microorganismos, el tiempo requerido de exposición del agua a la luz ultravioleta es inversamente proporcional a la intensidad de la luz que penetra el agua, teniendo en cuenta la capacidad de absorción del agua y la dispersión de la luz debido a la distancia.

El método de desinfección es sencillo, consiste en poner en contacto el flujo de agua con una lámpara ultravioleta, de tal manera que la radiación UV actúe sobre los microorganismos del agua bajo las condiciones arriba expuestas con el consecuente efecto desinfectante.

Mecanismos de la desinfección por radiación ultravioleta

El mecanismo de desinfección se basa en un fenómeno físico por el cual las ondas cortas de la radiación ultravioleta inciden sobre el material genético (ADN) de los microorganismos y los virus, y los destruye en corto tiempo, sin producir cambios físicos o químicos notables en el agua tratada.

Se cree que la inactivación por luz ultravioleta se produce mediante la absorción directa de la energía ultravioleta por el microorganismo y una reacción fotoquímica intracelular resultante que cambia la estructura bioquímica de las moléculas (probablemente en las nucleoproteínas) que son esenciales para la supervivencia del microorganismo. Está demostrado que independientemente de la duración y la intensidad de la dosificación, si se suministra la misma energía total, se obtiene el mismo grado de desinfección.

En el cuadro de la página siguiente se muestran valores reportados por varias fuentes de dosis de energía ultravioleta para eliminar algunos micro-organismos. Estos dan una idea del rango y orden de la magnitud de la exposición.

La mayoría de los equipos de desinfección ultravioleta utilizan una exposición mínima (en el agua) de 30.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$. Esto es adecuado para inactivar las bacterias y virus patógenos, pero quizá no sea suficiente para ciertos protozoos patógenos, quistes de protozoos y huevos de nemátodos, que pueden requerir hasta 100.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ para su inactivación total.

Radiación de energía ultravioleta necesaria para destruir hasta en un 99.99% de los microorganismos patógenos del agua

<u>BACTERIAS</u>	<u>ENERGIA</u> $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	<u>OTROS ORGANISMOS</u>	<u>ENERGIA</u> $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Bacillus anthracis	8.700		
S. enteritidis	7.600		
B. Megatherium sp.(veg)	2.500	LEVADURA	
B. Megatherium sp.(sporas)	5.200		
B. peratyphosus	6.100	Saccharomyces ellipsoideus	13.200
B. subtilis	11.000	Saccharomyces sp.	1.600
B. subtilis spores	22.000	Saccharomyces cerevisiae	13.200
Clostridium tetani	22.000	Levadura para cerveza	660
Corynebacterium diphtheriae	6.500	Levadura para panadería	800
Eberthella typosa	4.100	Levadura para repostería	13.200
Escherichia coli	6.600		
Micrococcus candidus	12.300	ESPORAS	
Mycobacterium tuberculosis	10.000		
Neisseria catarrhalis	8.500	Penicillium roqueforti	26.400
Phytomonas tumefaciens	500	Penicillium expansum	22.000
Proteus vulgaris	6.600	Mucor racemosus A	35.200
Pseudomonas aeryginosa	10.500	Mucor racemosus B	5.200
Pseudomonas fluorescens	6.600	Oospora lactis	1.100
S. typhimurium	15.200		
Salmonella	10.000	VIRUS	
Sarcina lutea	26.400		
Serratia marcescens	6.160	Bacteriophage (E. coli)	6.600
Dysentery bacilli	4.200	Virus de la influenza	6.600
Shigella paradysenteriae	3.400	Virus de la hepatitis	8.000
Spirillum rubrum	6.160	Poliovirus(Poliomyelitis)	1.000
Staphylococcus alous	5.720	Rotavirus	24.000
Staphylococcus aureus	6.600		
Streptococcus hemolyticus	5.500	ALGAS	
Streptococcus lactis	8.800		
Streptococcus viridans	3.800	Chlorella vulgaris	2.000
Vibrio cholerae	6.500		

Sub productos de la desinfección con rayos ultravioleta

Como se ha expresado, la luz ultravioleta tiene la capacidad de tratar el agua sin producir cambios físicos o químicos considerables en el agua tratada. No se conoce que haya efectos directos adversos sobre la salud de los consumidores de agua desinfectada con luz ultravioleta. En el proceso de desinfección no se le agrega ninguna sustancia al agua, por lo que no hay riesgos de formación de SPD y la luz ultravioleta no altera el sabor ni el olor del agua tratada. A la dosificación y

frecuencia utilizada para la desinfección, no se conoce que exista la formación de derivados. La sobredosis de luz ultravioleta tampoco resulta en ningún efecto nocivo. No obstante, el operador del equipo de desinfección con luz ultravioleta debe usar anteojos y ropa protectora para evitar exponerse a la radiación de alta energía, característica de la luz ultravioleta.

Equipos

La luz ultravioleta se produce por medio de lámparas de vapor de mercurio de alta y baja presión, siendo más populares las últimas. Se asemejan a las conocidas lámparas fluorescentes. En realidad, las lámparas ultravioletas son elaboradas por las grandes empresas que fabrican las lámparas fluorescentes estándar. En consecuencia, las lámparas, los balastos y los arrancadores para los sistemas ultravioletas pueden comprarse en tiendas comerciales, salvo las que tengan dimensiones excepcionales.

Las lámparas raras veces se queman, pero generalmente se cambian después de que han perdido 25% a 30% de la luz ultravioleta que emitían cuando eran nuevas. Estas lámparas tienen una duración de 10.000 horas, lo que en términos prácticos y teniendo en cuenta el recambio cuando ha descendido su intensidad a 70-75 % , significa una vida útil de nueve meses a un año de trabajo sin interrupción.

Como se ha mencionado, la desinfección del agua con luz ultravioleta puede lograrse con longitudes de onda de luz entre 240 y 280 nm y se obtiene la máxima eficiencia germicida a los 260 nm. Las lámparas de arco de mercurio a baja presión que se encuentran en el mercado producen una longitud de onda de luz ultravioleta cerca de 254 nm.

El mecanismo que usa la lámpara ultravioleta es sencillo: dentro de la lámpara, que es un tubo hecho de cuarzo o sílice, un arco eléctrico golpea una mezcla de vapor de mercurio y argón que hay en el interior. Cuando la corriente eléctrica golpea la mezcla, el argón no participa, ya que su función es solo ayudar a arrancar la lámpara, extender la vida del electrodo y reducir las pérdidas, pero las moléculas del mercurio se excitan y cuando los electrones de las órbitas externas descienden a órbitas de menor nivel energético, emiten la energía sobrante en forma de radiación ultravioleta.

Los arrancadores tienen la misión de producir una descarga fuerte que genera la primera ionización del gas. Establecen un cortocircuito sobre la lámpara, que precalienta los electrodos, interrumpe luego bruscamente la corriente, lo que origina en la reactancia inductiva del balasto un pico de alta tensión que inicia el arco. Los balastos fijan la corriente de operación (y por consiguiente la tensión) de la lámpara, presentan una alta impedancia hacia la red en el momento de arranque y producen una resistencia óhmica baja, de manera que las pérdidas de potencia (calor generado) sean mínimas. En una palabra, el balasto es un elemento que ordena el flujo de electrones dentro del tubo. Es como un policía ordenando el tránsito.

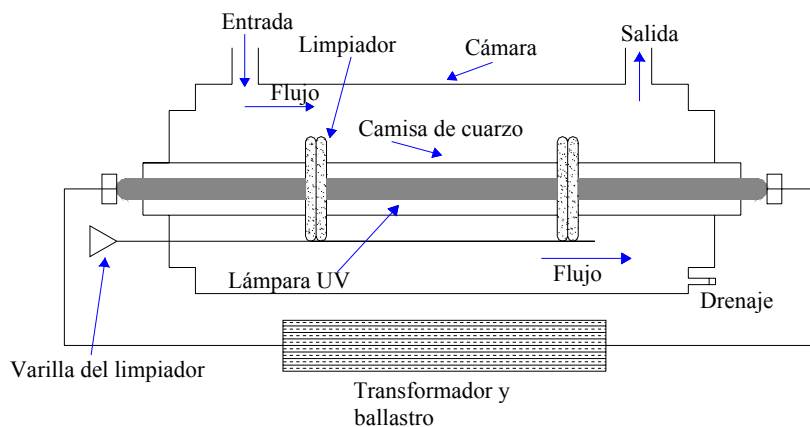
Hay dos tipos básicos de cámaras de exposición del agua a la radiación ultravioleta. Aquellas en las que las lámparas están sumergidas en el agua y las que están fuera del agua. En las unidades de luz ultravioleta de lámparas sumergidas, se debe proveer un espacio aislado donde se ubica la lámpara, lo que se logra rodeando la misma con una camisa de cuarzo que es un material transparente a los rayos. Solo el cuarzo presenta esa característica, y de los plásticos, solo el PTFE (Teflón) es parcialmente transmisible.

En el segundo tipo, las lámparas están suspendidas sobre el agua que se está tratando, en forma casi rasante con el agua.

Un sistema moderno de desinfección ultravioleta puede incluir lo siguiente:

- | Una cámara de exposición de material anticorrosivo, el cual alberga el sistema.
- | Lámparas ultravioleta.
- | Limpiadores mecánicos, limpiadores ultrasónicos u otros mecanismos de auto limpieza.
- | Censores conectados a sistemas de alarma para el monitoreo de la intensidad de la luz ultravioleta.
- | Interruptor de velocidad en caso de que se presenten velocidades de flujo altas o bajas, intensidades altas o bajas o temperaturas anormales en los componentes del sistema.
- | Monitores de lámpara apagada.
- | Balastos eléctricos.

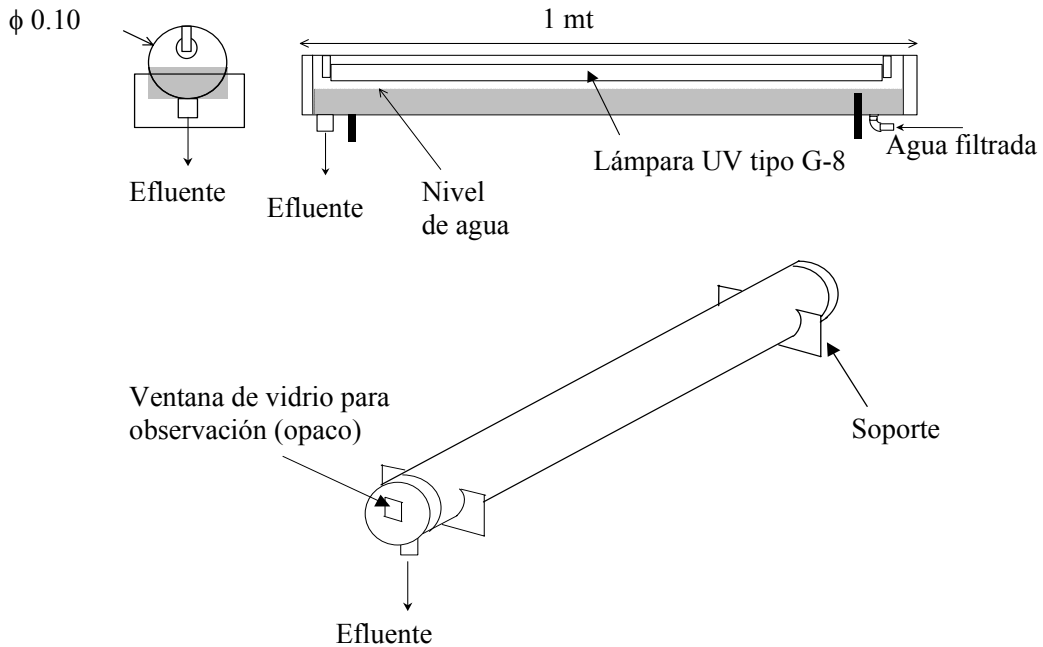
Una consideración importante en el diseño del equipo de desinfección es asegurarse de que cada microorganismo reciba la dosis biocida de radiación en la cámara de contacto. Esto se logra determinando el espacio correcto entre las lámparas y las superficies reflectoras del interior de la cámara y agitando adecuadamente el agua cuando pasa por la cámara. El equipo ultravioleta con lámparas sumergidas puede tener una de las dos configuraciones básicas de flujo del agua: paralelo o perpendicular a la longitud de las lámparas. Si el flujo es perpendicular, las propias lámparas y camisas pueden producir la turbulencia necesaria para asegurar que toda el agua quede expuesta a la dosis biocida. Cuando el flujo es paralelo a la longitud de las lámparas, es necesario utilizar mezcladores estáticos (pantallas) para proporcionar la turbulencia necesaria.



Instalación típica de un equipo de radiación UV con lámpara sumergida

Vista frontal

Vista lateral



Instalación típica de un equipo de radicación UV con lámpara fuera del agua



Conducto sobre el que se colocarán las lámparas UV para desinfección del agua. El diseño de las pantallas dentro del conducto sirve para asegurar que el flujo de agua a ser desinfectada se deslizará con un frente homogéneo y asegurará que toda el agua tenga igual irradiación.

Instalación y requerimientos

La instalación del equipo ultravioleta típico se muestra en la figura correspondiente. La lámpara en este caso se encuentra dentro de un encamisado protector hecho de cuarzo. Con los sistemas antiguos era difícil mantener la lámpara o las camisas limpias, debido a los depósitos de carbonato de calcio, sedimentos, materiales orgánicos o hierro, que reducían la penetración y el poder germicida. Ahora casi todos los sistemas tienen limpiadores de encamisados que reducen el problema.

Un requisito infaltable es la energía eléctrica. Su consumo varía en función de la calidad del agua a tratar; resulta óptimo un consumo de 22 vatios/hora por cada metro cúbico de agua tratada. Como la luz ultravioleta no deja efecto residual, se requiere que la fuente de energía sea sumamente fiable durante todo el tiempo que el agua esté fluyendo por la unidad de desinfección. En comunidades donde la electricidad no sea confiable, se debe instalar una fuente de energía de emergencia independiente para asegurar la continuidad de la desinfección en todo momento.

El equipo puede ser instalado tanto en el exterior como en un recinto protegido de los elementos del clima y del vandalismo. En el último caso, el recinto sirve también para proteger el equipo de temperaturas extremas u otras condiciones que pudieran dañarlo o afectar su funcionamiento.



Sistema de tubos paralelos al flujo instalado en una planta potabilizadora

El espacio requerido para el equipo de desinfección ultravioleta es bastante pequeño porque el tiempo necesario de contacto/exposición es muy breve. Si bien el equipo es uno de los que ocupa menos espacio dentro de los diferentes equipos de desinfección, se recomienda dejar un espacio adecuado para cambiar las lámparas y otro para almacenar un número de lámparas suficiente para dos años de operación.

Operación y mantenimiento

Los requerimientos en cuanto a operación y mantenimiento de los sistemas de desinfección ultravioleta son mínimos, pero cruciales para un rendimiento adecuado. Es preciso asegurar que las camisas de cuarzo o la tubería de teflón estén libres de sedimentos u otros depósitos que atenúen la radiación, pues podría ocurrir deposición de partículas. En los sistemas pequeños, la limpieza generalmente se hace a mano, limpiando la camisa de cuarzo una vez al mes como mínimo y en circunstancias excepcionales, dos o tres veces por semana.

Las lámparas se deben cambiar a intervalos necesarios para garantizar por lo menos 30.000 microvatios-segundo/cm² de área de exposición en todo momento. Esta variará de una lámpara a

otra, pero en general están programadas para el intervalo promedio cuando su intensidad disminuye a menos de 70% de su potencial nominal. En aguas muy frías pueda que haya que cambiar las lámparas con mayor frecuencia.

Como la luz ultravioleta no deja residual de desinfectante alguno, es indispensable desinfectar muy bien todo el sistema con un desinfectante químico apropiado antes de activar por primera vez una unidad de desinfección ultravioleta. Si hay alguna contaminación externa en el sistema de distribución debido a sifonaje de retorno o a una conexión cruzada, también habrá que remediarla y desinfectarla químicamente antes de ponerlo a funcionar.

Monitoreo

La única manera confiable de determinar la eficiencia biocida de la desinfección ultravioleta es mediante un muestreo del agua tratada y análisis microbiológicos para determinar el contenido de microorganismos indicadores. Con una celda fotoeléctrica también se puede medir la intensidad de la exposición de uno o varios puntos estratégicos dentro de la cámara de exposición, pero esto no necesariamente significa que todos los microorganismos han recibido una dosis de luz ultravioleta suficiente para asegurar su inactivación o muerte. En todo caso, este tipo de monitoreo de la intensidad de luz ultravioleta debe ser continuo y la dosis debe ser adecuada para que garantice una exposición suficiente en todo momento en las condiciones esperadas de calidad y flujo del agua.

Desde el punto de vista práctico, se precisa cierto nivel de automatización y complejidad en el sistema de monitoreo, que debe incluir monitores de los sensores ultravioleta que indiquen visualmente si existen los niveles de luz ultravioleta necesarios para lograr la desinfección. El sistema de control debe dejar que las lámparas UV se calienten por lo menos cinco minutos antes de empezar el tratamiento del agua. Para los sistemas que tratan flujos variables de agua, el sistema de control debe poder encender y apagar lámparas para poder alcanzar la dosis necesaria en función al flujo. También es recomendable tener un sensor que pueda cortar automáticamente el flujo de agua en cualquier momento que el sistema ultravioleta no pueda producir la dosificación adecuada para la desinfección.

Ventajas y desventajas

Las ventajas empiezan con la sencillez de la operación y mantenimiento. Otra gran ventaja de la desinfección con luz ultravioleta es que no se requieren productos químicos. Asimismo, el tiempo de exposición requerido es muy corto en comparación con la duración del contacto necesario para los desinfectantes químicos convencionales, por lo que no requiere de tanques de contacto. También es una ventaja su eficacia para aniquilar una gran variedad de microorganismos. Estos factores son especialmente importantes en la desinfección del agua. Por otro lado, no cuenta con partes móviles que se desgasten. El agua no requiere tratamiento previo, salvo filtración en caso de aguas turbias. Presenta costos reducidos de operación. Además, presenta una gama tan grande de equipos que van desde la gran planta de tratamiento hasta el nivel familiar. Esto último hay que tenerlo en cuenta, ya que los programas de desinfección del agua en el nivel familiar no solo pueden ser cubiertos con tecnología de hipoclorito *in situ*, sino también con la radiación ultravioleta.

En oposición, una desventaja es la notable reducción de la eficiencia cuando aumenta la turbiedad o el color del agua, debido a que los microorganismos pueden protegerse de los efectos de la luz ultravioleta en las partículas en suspensión. Otra desventaja es la dificultad de medir la eficacia de la desinfección, excepto si se hace un análisis microbiológico para determinar la presencia de organismos indicadores después del tratamiento con luz ultravioleta, lo que resulta difícil en áreas rurales muy alejadas.

Sin embargo y tal como se ha expresado, la gran desventaja del método es que la luz ultravioleta no proporciona residuales. Esto quiere decir que después de la desinfección por este sistema hay que aplicar un compuesto químico para garantizar la seguridad microbiológica del agua durante todo su trayecto por la red de distribución y aun para cuando se almacena en las viviendas.

La amenaza de una nueva contaminación o recrudescimiento de bacterias en un sistema de distribución de agua son razones imperiosas que han cuestionado el uso generalizado de la desinfección con luz ultravioleta sin añadir un desinfectante secundario que proporcione un residual eficaz. La eficacia dudosa de los rayos ultravioleta contra algunos de los quistes de protozoos y huevos de nematodos patógenos requiere que las aguas superficiales reciban filtración u otro tratamiento para su remoción antes de la desinfección con rayos ultravioletas. La desinfección con luz ultravioleta suele ser más costosa que los métodos convencionales de desinfección. El uso de este método de desinfección solamente, sin un desinfectante secundario, se recomendaría cuando la desinfección es preventiva; cuando la fuente de agua es fiable, con una turbiedad menor a 1 UTN, y cuando hay pocas posibilidades de contaminación del agua en el sistema después del tratamiento ultravioleta. En todos los demás casos debe agregarse un desinfectante secundario.

En resumen:

Ventajas	Sencillo. Eficiente. Ningún producto químico involucrado. No modifica las características estéticas del agua. Puede ser administrado por personal no calificado.
Desventajas	Los costos del equipo son algo mayores si se compara con los dosificadores de solución de cloro. El agua debe ser muy transparente. Se necesita energía eléctrica. No hay efecto residual.
Consejos para la operación y mantenimiento	Debe haber control para asegurar que no haya incrustación en los encamisados de protección. Estos deben recibir atención constante para eliminar tales incrustaciones.

Costos

Los sistemas de UV tienen variadas características y complejidad. El corazón del sistema es la lámpara (o lámparas); y sin embargo, ese elemento es el que menos incide en el costo total de un equipo completo de desinfección por radiación ultravioleta.

Ante el requerimiento de un presupuesto para desinfectar un agua cruda destinada al consumo humano con un caudal de 6.000 m³/día, una firma pudo presupuestar desde el razonable precio de US\$ 50.000 hasta el de medio millón de dólares. ¡Diez veces más! Tal diferencia de precios está dada por la disparidad que existe entre la modestia de un equipo básico y simple y la parafernalia de elementos auxiliares que acompañan al equipo sofisticado.

Cuando se participe en la preparación de términos de referencia para la compra de equipos de desinfección por UV, habrá que tener cuidado en balancear adecuadamente la capacidad, seguridad en todos los aspectos de la operación del equipo, con lo que no es tan necesario, lo que es supletorio o suntuario.

Al margen del dato de costos explicitado en el párrafo anterior, los equipos de menor porte, por ejemplo para tratar 100 m³/día (1.000 habitantes) pueden tener un costo de US\$ 300, lo que significa un costo per cápita de 0,3 \$/habitante. El costo de operación para este sistema está calculado en 0,02 \$/m³. Se considera que para el nivel casero, los costos de operación y de capital amortizados pueden estar en el rango de US\$ 10 a \$ 100 por año y por familia.

Fuentes de información

AQUAMARKET, Boletín sobre luz ultravioleta, www.aguamarket.com

Parrotta, M.; Bekdash, F. *UV Disinfection for small groundwater supplies*, J.AWWA Vol 90 (1998).

Reiff, F.; Witt, V. *Guía para la selección y aplicación de tecnologías de desinfección del agua para consumo humano en pueblos pequeños y comunidades rurales en América Latina y el Caribe*. Documento OPS/OMS, Serie Técnica No. 30 (1995).

Solsona, F. *Water disinfection for small community supplies*. Capítulo de desinfección de aguas para el manual del IRC “Small Community Supplies” y disponible como separata en la OPS/ CEPIS (2001).

World Bank, *Development Marketplace Competition*. (2000).

Wright, H.B.; Cairns, W.L. *Desinfección de agua por medio de luz ultravioleta*. Trabajo presentado en los Anales simposio OPS: Calidad de agua, Desinfección efectiva (1998). Publicado también en CD-Rom. Disponible en la OPS/CEPIS.