

CAPITULO 2

CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN UV

2.1 Definición de la intensidad UV.

El término "intensidad" (o *fluence*, en inglés) se define como el poder radiante total que incide de todas las direcciones en una esfera infinitesimalmente pequeña. A menor distancia del agua respecto al punto de emisión de la radiación, mayor será la intensidad de los mismos, y por tanto, la desinfección será más eficiente. La intensidad se expresa generalmente en mW/cm^2 .

2.2 Definición del tiempo de exposición.

Como cualquier otro desinfectante, el tiempo de exposición es vital para asegurar un buen desempeño germicida de la radiación UV. Sería complicado establecer un tiempo de contacto único que pudiera aplicarse a todo proceso de potabilización, pero el período debe estar relacionado con la dosis necesaria. No obstante los tiempos de exposición se encuentran en el orden de segundos, en el rango de 10 a 20 segundos.

Para un grado determinado de inactivación de microorganismos, el tiempo requerido de exposición del agua a la radiación UV 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 a la distancia.

2.3 Definición de dosis UV.

La efectividad de la desinfección UV está basada en la dosis de UV a la cual se exponen los microorganismos. La dosis D de UV se define como:

$$D = I * t \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

en donde: $D =$ dosis de UV, mJ/cm^2

$I =$ intensidad de UV, mW/cm^2

$t =$ tiempo de exposición, s

De acuerdo a la ecuación 2.1, la dosis de UV puede variar tanto con el cambio de intensidad como del tiempo de exposición. La dosis de UV recomendada para sistemas de agua es $100 mJ/cm^2$ para efluente de filtración granular media de efluente, $80 mJ/cm^2$ para efluente de filtración con membranas, y $50 mJ/cm^2$ para efluentes de ósmosis inversa. Las dosis mencionadas tienen el propósito de proveer cuatro unidades logarítmicas (99.99% de inactivación) con un factor de seguridad de 2.

2.3.1 Métodos para la determinación de la dosis UV.

2.3.1.1 Radiometría.

Un radiómetro es un dispositivo que detecta la radiación total o alguna fracción de interés que incide en un sensor Figura (2.1). Debido al continuo desarrollo de los detectores de radiación, semiconductores y equipos electrónicos, se hicieron cada vez más populares

entre los fotoquímicos para la medición de la radiación. Para el caso de irradiación de geometrías simples, los dispositivos físicos son preferidos sobre los actinómetros químicos debido a su rápido, fácil y preciso desempeño (Kuhn, 1989).

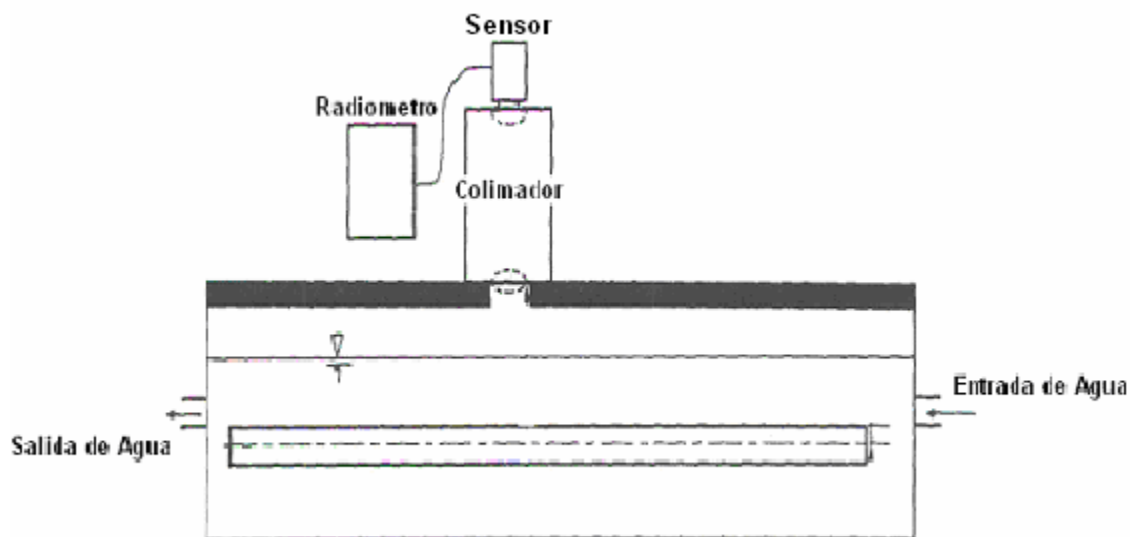


Figura 2.1 Instalación de un radiómetro en un reactor de flujo continuo para monitorear intensidad de radiación.

2.3.1.2 Biodosimetría.

Consiste en inocular microorganismos inocuos en el agua del reactor. Se toman muestras del líquido que entra y sale del sistema, y con ello se puede calcular el grado de inactivación. Al mismo tiempo, se determina una curva de respuesta a la dosis usando un aparato de haz colimado con la misma muestra de agua. De esta forma se puede obtener un estimado de la dosis UV leyendo de la curva dosis-respuesta, la dosis correspondiente al grado de inactivación observado en el reactor (Bolton, 2001).

2.3.1.3 Actinometría.

Un actinómetro es un compuesto químico, sensible a la luz UV, el cual es expuesto a la longitud de onda de interés, y los cambios fotoquímicos resultantes son determinados analíticamente.

El proceso de actinometría permite estimar la cantidad de radiación UV incidente sobre una superficie a través de una reacción fotoquímica, para la cual la cantidad de moléculas de producto formado por fotones absorbidos está bien establecida (Bolton 2001).

Una celda que contiene un producto químico, se inserta en el reactor y se expone a la radiación UV. El cambio químico genera otro producto durante el tiempo de exposición. A partir del nuevo producto y de la cantidad producida se puede determinar el total de fotones incidentes en la muestra. Los actinómetros se emplean comúnmente para calibrar radiómetros (Jaeggi, 2000).

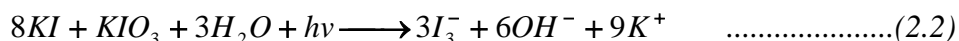
Un actinómetro químico adecuado debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Debe ser simple y bien estudiado. La foto-reacción debe ser reproducible bajo condiciones bien definidas y fácilmente controlables. La eficiencia cuántica debe ser conocida con precisión para un gran número de longitudes de onda y de preferencia es recomendable conocer la eficiencia cuántica para un amplio rango de longitudes de onda (Kuhn et al.,1989).
- Los compuestos químicos deben ser térmicamente estables para evitar complicaciones.

- El sistema debe exhibir buena sensibilidad.

Entre los sistemas fotoquímicos más comúnmente utilizados se encuentran el ferrioxalato y el yoduro/yodato. A continuación se describe brevemente el sistema yoduro/yodato, el cual se ha empleado en el desarrollo de este trabajo de tesis.

Actinómetro Yoduro/Yodato: al exponerse a radiación UV, una solución de yoduro/yodato de potasio se transforma en triyoduro de acuerdo a la siguiente reacción:

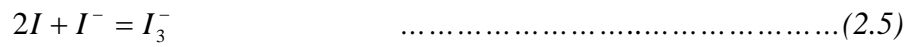
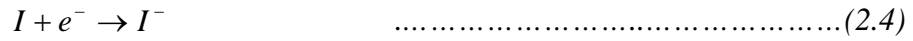
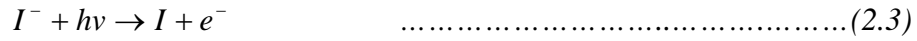


Ocho moles de yoduro de potasio (KI) más otra de yodato de potasio (KIO₃) absorben un fotón y convierten los reactivos en tres moles de triyoduro (I₃⁻) más otros productos. Ambos reactivos (KI, KIO₃), así como el producto (I₃⁻), pueden determinarse espectrofotométricamente, de manera que la cantidad de fotones absorbidos por una solución de concentraciones conocidas puede estimarse de forma precisa.

El actinómetro de yoduro/yodato tiene varias ventajas incluyendo las siguientes:

- Es fácil de preparar y no requiere de medidas especiales de precaución.
- Es opaco a las longitudes de onda por debajo de 290 nm para 1 cm de trayectoria de radiación. Por lo tanto, sirve como un contador de fotones incidentes en la solución que son absorbidos por la misma.
- Es ciego a las longitudes de onda mayores de 330 nm. Por lo tanto, las mediciones pueden realizarse en presencia de luz normal de laboratorio.

La formación del triyoduro, inducida por la luz ultravioleta, es facilitada por la presencia del yodato que actúa como un receptor de electrones y estabiliza al triyoduro formado (Rahn, 1999).



2.4 Efectos de la calidad del agua en la eficiencia germicida de la radiación UV.

Las características físico-químicas del agua pueden afectar la eficiencia germicida de la radiación UV. La Tabla 2.1 muestra algunos parámetros de la calidad del agua y sus posibles efectos en el proceso de desinfección con este tipo de radiación.

Tabla 2.1 Efectos de algunos componentes del agua potable en la eficiencia de la desinfección con UV (Tomado de Metcalf and Eddy, 2004).

Constituyente (a)	Efecto
Sólidos suspendidos	Absorción de radiación UV contenida dentro de una bacteria.
Alcalinidad	Puede impactar en gran escala también afecta la solubilidad de metales que absorber luz UV.
Dureza	Calcio, magnesio, y otras sales pueden formar depósitos minerales en los tubos de cuarzo, especialmente a temperaturas elevadas
Amoníaco (NH_4^+)	Sin o con efecto menor
Nitrato (NO_3^-)	Sin o con efecto menor
Nitrito (NO_2^-)	Sin o con efecto menor
Hierro (Fe^{2+} , Fe^{3+})	Fuerte absorbente de la radiación UV, Puede precipitar en tubos de cuarzo Puede absorber sólidos suspendidos y placas de bacterias.
Magnesio (Mg^{2+})	Fuerte absorbente de la radiación UV
PH	Puede afectar la solubilidad de metales y carbonatos

2.5 Sistemas de desinfección UV, sus componentes y configuraciones.

Los componentes principales de un sistema de desinfección con radiación UV son: lámparas UV, arrancador, balastras y cámaras de exposición. A continuación se describen brevemente las características más relevantes de las lámparas UV y de las cámaras de exposición.

2.5.1 Lámparas ultravioleta.

La luz ultravioleta puede producirse con lámparas de vapor de mercurio, las cuales se asemejan a las conocidas lámparas fluorescentes. En realidad, las lámparas ultravioletas son elaboradas por las grandes empresas que fabrican las lámparas fluorescentes estándar.

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. Las lámparas más utilizadas en la desinfección con UV son las de baja y media presión.

a) *Lámparas UV de Baja Presión:* Este tipo de lámparas genera esencialmente radiación monocromática con longitud de onda de 254 nm (UV-C). Como se ha mencionado previamente, esta longitud de onda es considerada como la más efectiva para la inactivación de microorganismos (ver Figura 2.2). En todos los casos, las lámparas de mercurio y argón son usadas para generar radiación del tipo UV-C. Las lámparas UV de baja presión tienen un diseño delgado con una longitud total de 0.75 - 1.50 m y un diámetro que puede variar entre 15 – 40 mm. Estas lámparas operan óptimamente a una temperatura de 40 °C y una presión interna de 0.007 mm de Hg. El rendimiento de las lámparas de baja presión está comprendido

entre 25 y 27 W a 254 nm con un poder de entrada de 70 a 80 W. Aproximadamente 85 a 88% del rendimiento de las lámparas es monocromático a 254 nm, haciendo así una elección eficiente para el proceso de desinfección.

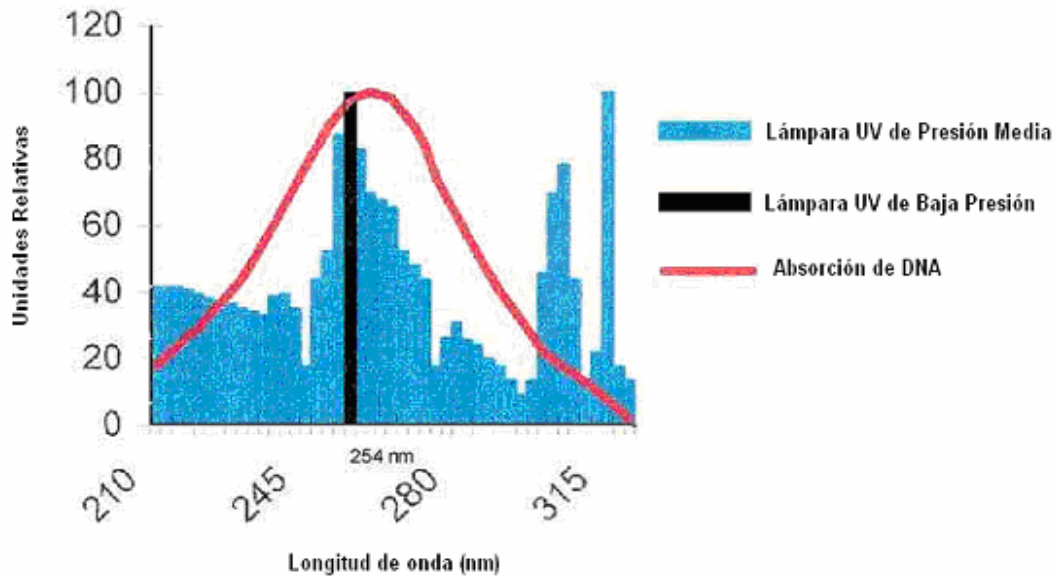


Figura 2.2 Radiación UV emitida por lámparas de presión baja y media.

Las celdas de cuarzo son utilizadas para aislar las lámparas UV del contacto directo con el agua y para controlar la temperatura de la pared de la misma. Debido a que existe exceso en el líquido de mercurio en este tipo de lámparas, la presión de vapor de mercurio es controlada por la pared más fría de la misma. Si la pared de la lámpara no está trabajando a su temperatura óptima de 40°C, una parte del mercurio se condensa, de tal modo que el rendimiento de la lámpara disminuye. La vida útil de estas lámparas varía entre 9,000 a 13,000 hr dependiendo del número de ciclos por día. La vida útil de las celdas de cuarzo es de 4-8 años.

b) *Lámparas UV de Presión Media*: Estas lámparas operan a temperaturas y presiones mucho más elevadas que las empleadas por lámparas de baja presión (600-800 °C; 10^2 - 10^4 mm de Hg) y generan radiación policromática. No obstante, sólo el 27 – 44 % del total de la energía irradiada por dichas lámparas tiene una longitud de onda comprendida en el rango germicida de UV-C y más aún, sólo del 7 al 15 % de su rendimiento está cerca de los 254 nm. Sin embargo, las lámparas de presión media generan aproximadamente de 50 a 100 veces el total del rendimiento de una lámpara de baja presión.

Una comparación de las características de operación de las lámparas UV es presentada en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Características de operación típicas en lámparas UV.

Producto	Unidad	Tipo de lámpara	
		Baja presión	Presión media
Consumo de energía	W	70 - 100	
	kW		2 a 5
Corriente de la lámpara	mA	350 - 550	Variable
Voltaje de la lámpara	V	220	Variable
Eficiencia	%	30 - 40	10-12(b)
Salida de la lámpara a 254 nm	W	25 - 27	
Temperatura	°C	35 - 45	600-800
Presión	mm Hg	0.007	
Longitud de la lámpara	M	0.75 - 1.5	Variable
Diámetro de la lámpara	mm	15 - 20	Variable

(a) Salida muy alta de la lámpara

(b) Salida dentro del rango germicida (~250 – 260 um).

2.5.2 Cámaras de exposición.

Hay dos tipos básicos de cámaras de exposición para desinfectar agua con radiación ultravioleta: Aquellas en las que las lámparas están sumergidas en el agua y las que están fuera del agua (ver Figuras 2.3 y 2.4). En las cámaras 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. (Hay que recordar que este material es transparente a la radiación UV).

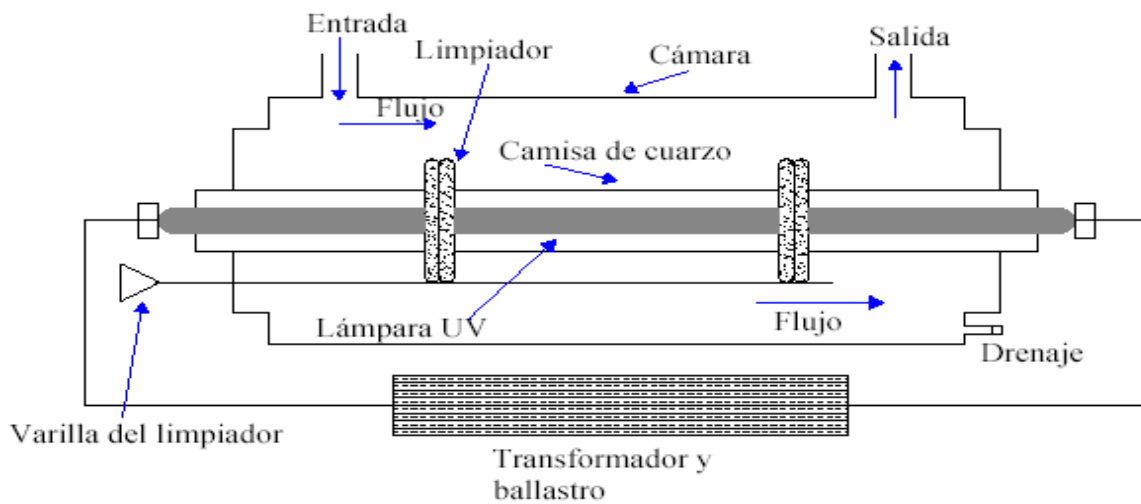


Figura 2.3 Instalación típica de un equipo de radiación UV con lámpara sumergida.

En el segundo tipo de cámaras de exposición, las lámparas están suspendidas sobre una lamina de agua por desinfectar, en forma casi rasante.

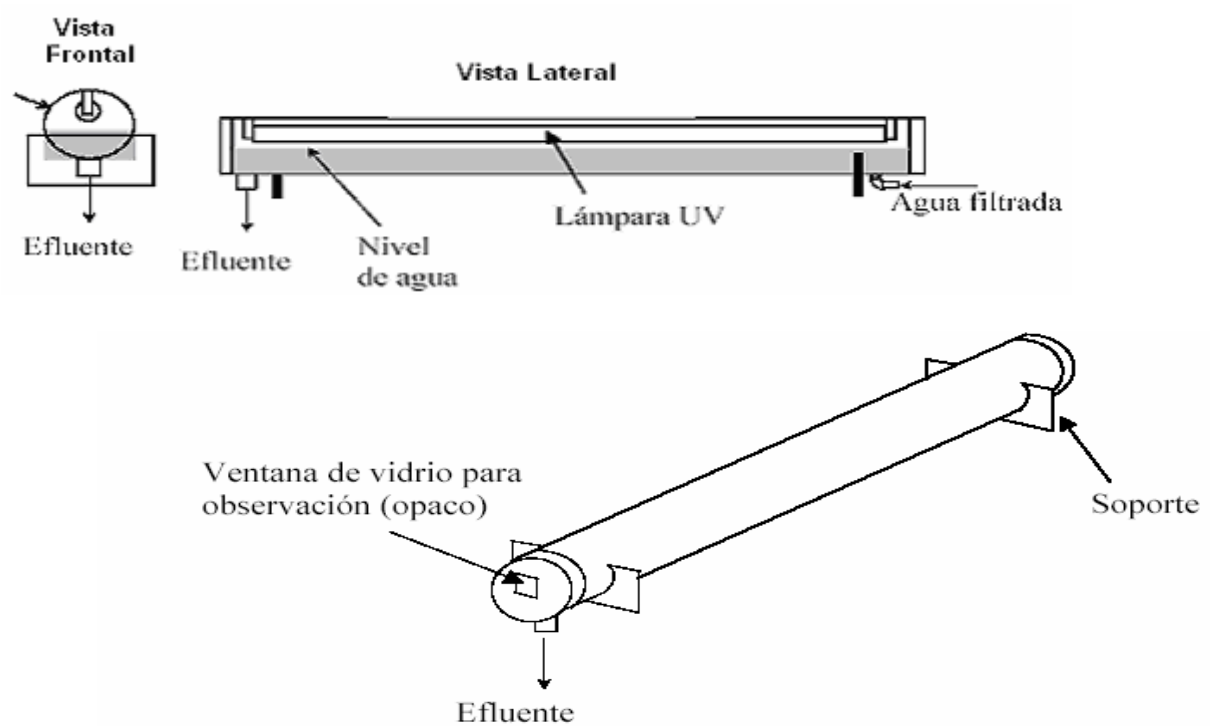


Figura 2.4 Instalación típica de un equipo de radiación UV con lámpara fuera del agua.

2.6 Reactores para desinfección con radiación UV.

Existen dos tipos de reactores de desinfección con radiación UV: de flujo continuo y de colimación.

Los reactores de flujo continuo son habituales en plantas de tratamiento de agua residual y potable. Por lo general dichas plantas presentan un flujo no ideal debido a alteraciones como la presencia de zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos y recirculación. Este es el tipo de flujo que se encuentra usualmente en las unidades de tratamiento de plantas UV. El espacio requerido para el equipo de radiación UV es bastante pequeño porque el tiempo de contacto-exposición es muy breve, en el orden de segundos.



Figura 2.5 Sistema de tubos paralelos al flujo instalado en una planta potabilizadora.

Por su parte, los reactores de colimación se emplean en aplicaciones a escala de banco y permiten irradiar volúmenes de agua determinados con dosis de UV precisas. La radiación colimada consiste en rayos UV paralelos, de intensidad uniforme que inciden o concentran sobre alguna superficie delimitada. La Figura 2.6 muestra un esquema de un reactor de colimación para trabajo de laboratorio. Generalmente el tiempo de exposición puede controlarse con un interruptor de corriente, lo cual permite la aplicación de dosis bastante precisas de radiación UV.

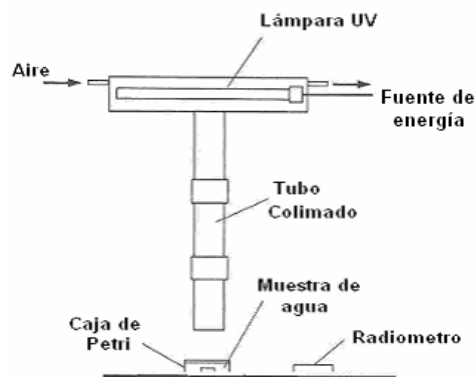


Figura 2.6 Diagrama de reactor de colimación.

2.7 Sistemas de desinfección a escala real.

2.7.1 Selección y tamaño del sistema de desinfección UV.

La aplicación de UV como desinfectante de agua, a mayor escala, requiere la consideración de varios factores. Uno de estos factores importantes es la selección y determinación del número mínimo de lámparas UV necesarias.

Esta selección se ve afectada a su vez por: (1) el flujo volumétrico, (2) el envejecimiento y las características de la lámpara de mercurio, (3) la calidad de agua por desinfectar y (4) la naturaleza de la descarga permitida.

Una vez seleccionado el número de lámparas necesario, debe decidirse si éstas se colocarán de forma paralela o transversal a la dirección del flujo. Para ello, el flujo de agua por desinfectar deberá canalizarse a través de canales abiertos o cerrados.

2.7.1.1 Desinfección UV en canales abiertos.

Como se ha mencionado, en este tipo de canales las lámparas UV pueden situarse en forma paralela, transversal, vertical u horizontal (ver Figura 2.7). Generalmente, el flujo es dividido equitativamente entre el número de canales abiertos y cada canal contiene dos o más bancos de lámparas UV en serie. Cada módulo contiene un número específico de lámparas UV revestidas por celdas de cuarzo. El número de lámparas UV por módulo es de 2, 4, 8, 12 ó 16. La configuración más usada actualmente por los fabricantes de lámparas

UV es una separación de 75 mm de centro a centro de las mismas. Para controlar la profundidad del flujo en cada canal se emplea una compuerta con controlador automático. Además, para evitar la acumulación de residuos en las camisas de cuarzo, los cuales reducen la intensidad de la luz en la parte media del líquido, las lámparas deben ser removidas ocasionalmente de los canales de flujo para ser limpiadas.

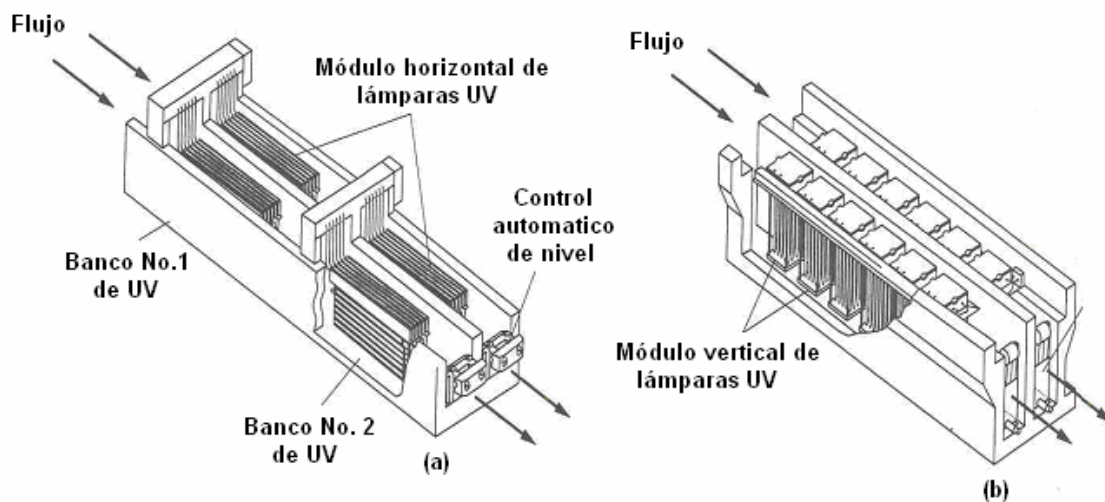


Figura 2.7 (a) Sistemas de lámparas horizontal, paralelo al flujo, (b) Sistema de lámparas vertical, perpendicular al flujo (Tomado de Metcalf and Eddy, 2004).

2.7.1.2 Sistemas de desinfección en canales cerrados.

Numerosos sistemas de desinfección UV de presión baja y media son diseñados para operar en canales cerrados. En la mayoría de los diseños, la dirección del flujo es perpendicular a la ubicación de las lámparas (ver Figura 2.8a), aunque también hay diseños en los que el flujo es paralelo a la dirección de las lámparas UV (ver Figura 2.8b). En los sistemas de desinfección UV de presión media las lámparas se encuentran en módulos y están posicionadas en un reactor con geometría fija.

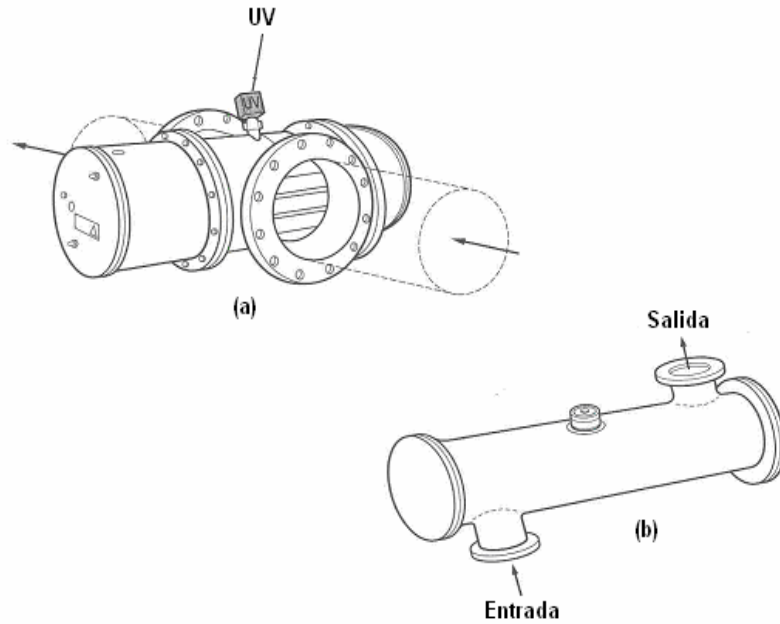


Fig. 2.8 (a) Vista isométrica del reactor con lámparas perpendiculares, (b) Vista isométrica del reactor con lámparas en paralelo (Tomado de Metcalf and Eddy, 2004).

Un sistema moderno de desinfección ultravioleta puede incluir los siguientes componentes:

- Una cámara de exposición de material anticorrosivo, el cual alberga el sistema.
- Lámparas ultravioleta.
- Mecanismos de auto limpieza.
- Sensores 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.
- Monitores de lámpara apagada.
- Balastras.

Una consideración vital para el diseño del equipo de desinfección es la de asegurarse que cada microorganismo recibirá la dosis biocida de UV a su paso por 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. 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.

2.7.2 Instalación y requerimientos de equipo en sistemas de radiación UV.

Otro componente importante de los sistemas de desinfección UV es el equipo de limpieza. 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 que reducen el problema.

Por supuesto que otro requisito indispensable es la energía eléctrica. Su consumo varía en función de la calidad del agua a tratar. 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.

2.7.3 Operación y mantenimiento en sistemas de desinfección UV.

Los requerimientos en cuanto a operación y mantenimiento de los sistemas de desinfección ultravioleta son mínimos, pero muy importantes para un rendimiento adecuado. Es preciso asegurar que las camisas de cuarzo estén libres de sedimentos u otros depósitos que afecten la radiación. En los sistemas pequeños, la limpieza generalmente se hace a mano, limpiando la camisa de cuarzo una vez al mes como mínimo, aunque en algunos casos se requiere limpiar cada dos o tres veces por semana. Las lámparas se deben cambiar siempre que sea necesario para garantizar la intensidad adecuada. El reemplazo de lámparas en aguas frías ocurre 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 antes de activar por primera vez el equipo de desinfección ultravioleta.

2.7.4 Monitoreo de los sistemas de desinfección con UV.

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 significa que todos los microorganismos han recibido una dosis de luz ultravioleta suficiente para su inactivación. El monitoreo de la intensidad de luz ultravioleta debe ser continuo y la dosis debe ser adecuada para garantizar una exposición suficiente en todo momento en las condiciones esperadas de calidad y flujo del agua.

Para los sistemas que tratan flujos variables de agua, el sistema de control deberá encender o apagar las lámparas para obtener la dosis necesaria de acuerdo 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.

2.7.5 Tratamiento necesario antes de la desinfección con UV.

El proceso de desinfección con UV generalmente se emplea hacia el final del tratamiento de potabilización, o bien, hacia el final del tratamiento de aguas residuales en la Figura (2.9) se muestra el pre-tratamiento necesario que debe realizarse antes de la desinfección con UV.

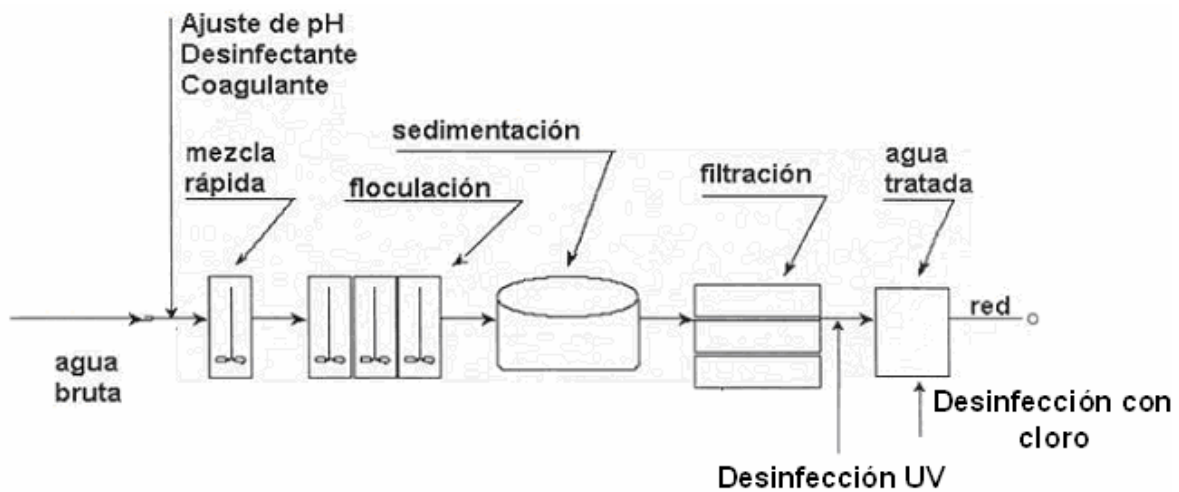


Figura 2.9 Esquema de pre-tratamiento de aguas.

La desinfección con radiación UV es aplicada al final del tratamiento debido a que es necesario previamente remover sólidos suspendidos, sólidos disueltos, dureza y otros compuestos físicos o químicos que pueden interferir con la radiación UV.

Los procesos previos a la desinfección son, coagulación-floculación-sedimentación, los cuales permite remover sólidos suspendidos y disueltos, principalmente. Posteriormente se realiza la filtración, ésta tiene la función de remover la turbiedad del agua.

Una vez que el agua ha sido pasada por los procesos anteriores, es tratada con radiación UV para su desinfección. Por último es necesario la adición de cloro para proveer de un residual al agua tratada, ya que como hemos mencionado anteriormente la desinfección con radiación UV no provee residuales y dicha situación no garantiza que al ser transportada el agua por la red de distribución o en las viviendas continúe con las características esenciales de un agua potable.