

CAPITULO 4

ANÁLISIS DE UN REACTOR DE COLIMACIÓN PARA DESINFECCIÓN UV.

4.1 Antecedentes del reactor de colimación.

El uso de un reactor a escala de banco para investigar la eficiencia germicida de la radiación UV fue divulgado por Qualls y Johnson (1983) por primera vez. Su aparato original consistió en lámparas UV - de baja presión - contenidas en una caja de cartón con un tubo de colimación del mismo material (de 2" Φ ; L= 72 cm) que se extendía desde un agujero en el centro de la longitud del arco de la lámpara. En ese caso, los autores tuvieron que aplicar una corrección por reflexión (4 %) para despreciar la luz reflejada de la superficie del agua, y además debieran corregir absorción UV cuando la absorción de la muestra era significativa (Linden, 2003). En 1997, Blatchley concluyó que las muestras que se irradian en este tipo de sistemas deberán colocarse por lo menos a 20 centímetros de la lámpara UV y que un aparato hecho de madera sin pintar provee superficies con reflexiones mínimas. Desde este primer informe, el diseño del equipo de prueba de radiación colimada ha tenido una forma artística basada en utilidad y presupuesto. Un diseño del sistema de radiación colimada se ilustra en la Figura 4.1.

Los diseños y configuraciones utilizados para la construcción de estos reactores de colimación a escala son muy variados. Y precisamente debido a esta gran variedad de diseños y los efectos que éstas pudieran tener en la aplicación efectiva de la radiación UV, algunos autores han estudiado dichos efectos. Somme (1995) comparó curvas de respuesta de dosis UV para *B. subtilis* de tres laboratorios y aparatos diferentes y concluyó que, para

evitar efectos de borde, la muestra irradiada no debe agitarse y solamente un volumen pequeño de la suspensión de microorganismos, tomada cerca del centro del plato, se debe utilizar para el análisis del grado de inactivación.

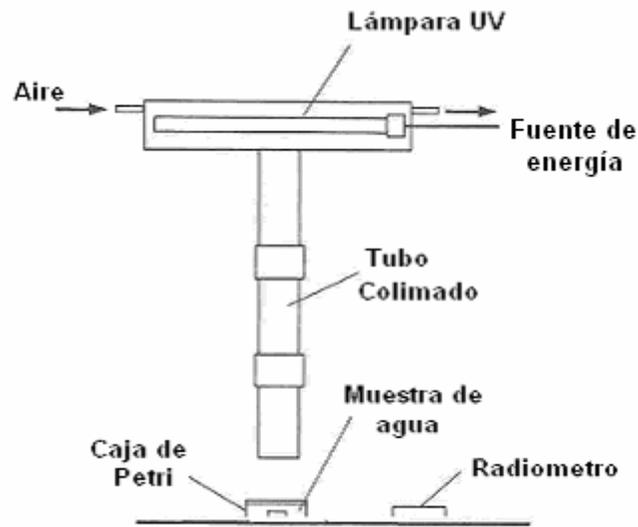


Figura 4.1 Reactor de colimación.

Los aparatos de radiación UV colimada han jugado un rol importante en el estudio y caracterización de la radiación UV como desinfectante del agua. Algunos de los usos más comunes de estos reactores son los siguientes: 1) Desarrollo de las relaciones de respuesta estandarizadas de la inactivación de dosis UV para el uso de la prueba biosimetría biológica de actinometría. 2) Generación de los datos fundamentales de la respuesta de inactivación de dosis UV para determinar la susceptibilidad UV comparativa de diversos patógenos. 3) Investigación de la degradación fotoquímica de contaminantes.

En todas estas aplicaciones, el uso apropiado del equipo de prueba de radiación colimada es esencial para obtener resultados exactos y reproducibles.

4.2 Componentes de un reactor de radiación UV colimada.

El diseño de un reactor de colimación no ha sido estandarizado hasta ahora. Existen varios diseños que son eficientes en la liberación de la energía UV, pero que sin embargo requieren de ciertas modificaciones para cada uso específico. No obstante, se deben seguir un número de cualidades y de pautas básicas para el diseño de un reactor de colimación.

En general, existe un mínimo de componentes esenciales que todo reactor de desinfección UV – a escala de banco – debe tener:

- 1) *Obturador*: Es el medio con el cual se regula el factor tiempo de manera precisa durante una prueba de exposición. Para tiempos cortos de irradiación, la exactitud de un sistema obturador llega a ser importante pues de ella depende la aplicación de una dosis reproducible.
- 2) *Ventana*: El recinto de la lámpara debe ser termalmente estable, puesto que la emisión de muchas lámparas UV es termo-sensible. Para asegurar dicha termo-estabilidad se puede emplear una ventana de cuarzo, próxima al obturador, la cual evite la entrada de aire a la cámara de la lámpara cuando el obturador sea accionado. Esto es particularmente importante para lámparas UV de presión media que operan a temperaturas de 400-600°C, ya que su emisión y distribución espectral es afectada por los cambios en la temperatura de la lámpara.

- 3) *Fuente de alimentación:* Es muy importante mantener una emisión constante de la lámpara UV cuando se requiera de tiempo de exposición prolongados.
- 4) *Tubo de colimación:* El objetivo de un aparato de radiación colimada es proporcionar un campo de irradiación espacial homogéneo en un área superficial dada. Algunos materiales como el cristal o plástico pueden reflejar porcentajes altos de UV cuando el ángulo de incidencia de la radiación es bajo. Por tal motivo se recomienda que la superficie interna del tubo de colimación sea áspera y se pinte de negro para prevenir la reflexión. En algunos diseños, se omite el uso del tubo de colimación y el área de radiación es definida por las aberturas colocadas en algunas distancias de la lámpara para crear radiación cuasi-paralela. En cualquier diseño, el resultado final debe ser una radiación razonablemente uniforme sobre la superficie que se irradiará.
- 5) *Agitación:* Para asegurar que una muestra de agua irradiada recibirá una dosis de UV homogénea, es importante mantener una agitación adecuada durante la exposición. Sin embargo, se recomienda que el agitado se realice sin crear un remolino en el agua. Así la barra de agitación debe ser pequeña y su velocidad controlada cuidadosamente.
- 6) *Lámpara:* Como se ha descrito anteriormente, las lámparas pueden ser de vapor de mercurio de presión baja (monocromático en 254 nm) o de vapor de mercurio de presión media (luz UV policromática). Las lámparas deben colocarse correctamente para mantener una temperatura estable durante la irradiación. La emisión de longitudes de onda debajo de los 200 nm debe ser evitada debido a la formación del ozono en el aire durante la irradiación.

4.3 Medición de la Irradiación de una Lámpara UV.

En el capítulo II se explican las distintas formas de medir la irradiación entre las que se mencionaron los radiómetros, algunos de los factores que se deben considerar al utilizar este sistema de medida son:

4.3.1 Calibración

Los radiómetros y sus detectores son calibrados típicamente por terceros que utilizan los detectores estándares primarios completamente caracterizados obtenidos directamente de un instituto nacional de estándares, tal como National Institute of Standards and Technology, de una división del Ministerio de Estados Unidos de Comercio. Con la transferencia de la técnica de los estándares, la salida de un detector se compara a un estándar bajo condiciones firmemente controladas del laboratorio. El factor de la calibración se computa y se programa en el radiómetro, permitiendo lecturas directas en las unidades ópticas deseadas. Los detectores se deben volver a calibrar por lo menos una vez al año.

Los actinómetros químicos puede ser una herramienta útil para periódicamente comprobar la calibración usando la actinometría para calibrar el detector.

4.3.2 Ángulo de Aceptación

Los diseñadores de radiómetros deben especificar el *ángulo de aceptación*, el cual está definido como el ángulo total del cono a través del cual el lector de irradiación puede proporcionar la medida exacta. El ángulo de aceptación está usualmente limitado (10-15°), por lo tanto el radiómetro puede dar lecturas erróneas significativas si se coloca muy cerca de la lámpara UV donde el colimador es divergente.

4.3.3 Sensibilidad Espectral del Detector.

La sensibilidad del detector depende de la longitud de onda para fuentes policromáticas, la lectura del radiómetro no medirá exactamente la irradiación. Si la emisión espectral de la lámpara UV es conocida, puede realizarse una corrección del factor del sensor.

4.3.4 Correcciones Necesarias al Usar la Lámpara UV de Baja Presión.

El detector del radiómetro proporciona solamente una medida del incidente de irradiación en el agua en el centro del colimador. Varias correcciones se requieren para obtener la irradiación media en el agua. Este último valor es el más importante, puesto que éste proporciona una estimación del rango medio de fluencia a la cual se expone cada microorganismo y es la base sobre la cual la dosis UV de una muestra puede ser calculada.

Factor de reflexión: Siempre que un haz de luz pase a partir de un medio a otro, donde el índice de refracción cambia, una fracción pequeña de la radiación se refleja del interfaz entre los medios.

Factor petri: Dependiendo del diseño del aparato de la escala del banco, la irradiación variará algo sobre el área superficial de la muestra líquida que se irradiará. Se define como el cociente del promedio del incidente de radiación sobre el área de la caja petri la irradiación en el centro de la caja y se utiliza el factor de petri para corregir la lectura de irradiación en el centro de la misma que refleja más exactamente el rango medio del incidente de fluencia sobre el área superficial

Factor de agua: Si el agua absorbe UV en las longitudes de onda de interés, después es necesario explicar la disminución de la irradiación que se presenta por la radiación que pasa a través del agua. Se define el factor de agua como:

$$Factor\ de\ agua = \frac{(1 - 10^{-al})}{al \ln(10)} \dots\dots\dots(4.1)$$

Donde a = coeficiente de absorción (cm^{-1}) o absorbancia para una longitud de trayectoria de 1 centímetro y l = longitud de trayectoria vertical (cm) del agua en la caja petri.

Factor de divergencia: Para la distancia finita de la suspensión de células de la lámpara UV, la radiación no se enfoca y no diverge perfectamente perceptiblemente. Para las distancias de la lámpara más que cerca de cuatro por el diámetro de la abertura, la radiación disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia L de la lámpara UV a la

superficie de la suspensión de la célula. Así el irradiancia en L + x en relación con la distancia L es:

$$\frac{L^2}{(L+x)^2} \dots\dots\dots(4.2)$$

El factor de divergencia es el promedio de esta función sobre la trayectoria de longitud de la suspensión de la célula:

$$\text{Factor de divergencia} = \frac{L}{(L+x)} \dots\dots\dots(4.3)$$

Para una lámpara UV de presión baja (emisión UV de 253.7nm), es necesario obtener las cuatro correcciones antedichas para el rango medio germicida E'_{avg} (Wm^{-2}) de fluencia en el agua. Así, para una lámpara UV de presión baja, E'_{avg} se da por:

$$E'_{avg} = \frac{(E_0 * \text{Factor de petri} * \text{Factor de Reflexión} * \text{Factor de Agua} * \text{Factor de divergencia})}{\dots\dots\dots(4.4)}$$

Donde E_0 = lectura de metro del radiómetro en el centro de la caja y en una posición vertical. La *fluencia germicida media (dosis UV)* (Jm^{-2} o $mJcm^{-2}$) está dada por el producto de E'_{avg} y *tiempo de exposición t* (s).

4.3.5 Correcciones necesarias al usar una lámpara UV de presión media.

Cuando una lámpara UV de presión media de banda ancha se utiliza en el aparato de radiación colimada, se requieren dos correcciones adicionales:

Factor del Sensor: El incidente de radiación UV contiene longitudes de onda en el rango de 200 - 300 nm, se realiza un estimado de la variación de la sensibilidad del detector sobre esta banda (ver Figura 4.2). El factor del sensor es la sensibilidad del detector en 254 nm divididos por la sensibilidad media cargada del detector sobre la banda de los 200 - 300 nm. El factor del sensor se da cerca de:

$$Factor\ sensor = \frac{S_{254}}{\sum_i N_{\lambda_i} S_{\lambda_i}} \dots\dots\dots(4.5)$$

Donde S_{254} = sensibilidad del detector en los 254 nm; y N_{λ_i} , y S_{λ_i} = emisión relativa de la lámpara (normalizada a la unidad) y la sensibilidad del detector en una banda estrecha de la longitud de onda se centraron en la longitud de onda i . La adición asume el control de un número finito de las bandas estrechas de la longitud de onda (los 5 nm) sobre la gama germicida (los 200-300 nm). Una vez que se determine este factor, se fija mientras se utiliza la misma lámpara UV y ha ocurrido el decaimiento mínimo de la salida de la lámpara. El factor del sensor es casi siempre mayor que la unidad, reflejando el hecho de que el detector es generalmente menos sensible en longitudes de onda fuera de los 254 nm.

Factor Germicida: La meta de la lectura del radiómetro es medir la irradiación UV germicida. Ya que no toda la luz emitida de una lámpara UV de banda ancha es igualmente germicida, es importante medir solamente la porción germicida de la emisión, y carga de cada longitud de onda de su eficacia germicida relativa. El factor germicida específico de la corrección puede ser dependiente del microorganismo bajo evaluación. Como alternativa a confiar en las curvas germicidas específicas de la eficacia del microbio (espectros de la acción), muchos investigadores han utilizado el espectro de la absorbancia del ADN como sustituto. Aunque hay ciertas desventajas en esta aproximación, el espectro de absorción del ADN es bastante uniforme para muchos microorganismos y se considera un alternativa aceptable. Es importante medir (o tener conocimiento de) el espectro de emisión para cada lámpara UV policromática utilizada. Esto ayudará en una determinación más exacta de la fluencia UV.

4.4 Consideraciones microbiológicas.

Agitación: Las suspensiones microbianas se deben agitar siempre durante la irradiación. El cálculo del valor medio de irradiación (E_{avg}) es solamente válido para las suspensiones totalmente mezcladas. La agitación debe iniciarse 10s antes de irradiar las muestras para una solución bien mezclada.

Réplicas y orden aleatorio: Para tener datos precisos es recomendable cuando menos realizar tres replicas en cada dilución y que la respuesta de fluencia (dosis UV) completa sea formada por lo menos con un duplicado. Las muestras deben ser expuestas en orden aleatorio, por ejemplo, si la fluencia (dosis UV) es 0, 200, 400, 600, 800, 1,000,

1,200 J/m², y si la prueba fue hecha en triplicado un “orden aleatorio” posible podría ser 400, 1000, 0, 800, 200, 400, 600, 1,200, 0, 800, 400, 1,200, 200, 1,000, 600, 0, 1,200, 600, 1,000, 200, 800 Jm⁻² (Linden, 2003).

Dirección de la Muestras Antes del Análisis: Antes del análisis, el agua por estudiar deberá almacenarse a 4°C. Si va a ser sembrado un microorganismo en la solución, esto debe realizarse por lo menos 10 minutos antes de la irradiación y de la agitación iniciados inmediatamente.

Análisis estático: Las replicas deben ser satisfactoriamente analizadas para proveer la media geométrica y la desviación estándar. Los datos deben ser trazados, incluyendo las barras de error, con el logaritmo de inactivación $\log_{10}(N_0/N)$ colocado en las ordenadas en función de la dosis UV en el eje de las abscisas. Debe realizarse una regresión lineal con los datos de respuesta de fluencia para determinar la fuerza de la correlación existente entre la fluencia y el logaritmo de inactivación.

4.5 Medición de la Intensidad o Fluence.

Es la medición del proceso de irradiación de un área. En el siguiente capítulo se explica el método utilizado en dicha medición.

4.6 Medición de la Dosis UV

La fluencia (dosis UV) es calculada como el producto de la intensidad por el tiempo de exposición (irradiación) y del tiempo de la exposición. En la disposición típica de la caja petri usada con nuestro reactor el tiempo de exposición se revisó con un cronómetro. Y como se explico en el punto anterior la intensidad se obtuvo mediante un actinómetro yoduro/yodato. Dichos resultados se muestran en el capítulo siguiente.