

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**VALIDACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE EQUIPOS DE
DESINFECCIÓN DE AGUAS POR RADIACIÓN ULTRAVIOLETA.**

TRABAJO DE TITULACION PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS
REQUISITOS PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO FÍSICO

Profesor Guía Dr. Ernesto Gramsch Labra

Pablo Fredes Donoso

2011

**VALIDACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE EQUIPOS DE
DESINFECCIÓN DE AGUAS POR RADIACIÓN ULTRAVIOLETA.**

PABLO FREDES DONOSO

Este trabajo de titulación fue elaborado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Ernesto Gramsch Labra, director del Laboratorio de Óptica y Semiconductores del Departamento de Física y ha sido aprobado por los miembros de la Comisión Calificadora del Candidato.

.....
Sr. Raúl Labbé

.....
Sr. Francisco Vivanco

.....
Sr. Ignacio Olivares

.....
Sr. Ernesto Gramsch
Profesor Guía

Sr. Bernardo Carrasco Puentes
Director

Agradecimientos

Agradezco a todos los estudiantes del Departamento de Física que me han acompañado sobre todo en momentos de distensión, alegría, lucha y perseverancia. A mis profesores, en especial al Profesor Ernesto Gramsch, por su calidad profesional y humana, su sencillez y gran dominio técnico del área de investigación que desempeña, quien creyó en mis capacidades para iniciar esta nueva línea de investigación, de la cual de seguro saldrán nuevos trabajos. Agradezco también al profesor Lautaro Vergara por su compromiso con la calidad de la enseñanza de la física teórica y su profesionalismo como docente. Al profesor Norman Cruz quien me enseñó de la Física desde cuando recién entré a la Usach. Además agradecer a mi tío Roberto Donoso y a mi abuelo Eduardo Donoso q.e.p.d, quienes me ayudaron a elaborar el sistema Karalakis 1.0 desde su taller con su torno de antaño. A don José Luís Pinto Gerente General de Hidro-UV Ltda. por sus apoyos técnicos, por compartir su experiencia en el mundo de la industria y por su importante aporte a esta investigación.

DE MANERA MUY ESPECIAL A MI FAMILIA, MIS PADRES CECILIA Y LUIS, MI HERMANO FELIPE Y A PEPITA QUIEN A SIDO MI COMPAÑERA DE VIAJE EN ESTE ANDAR POR LOS MUNDOS DE LA CIENCIA, EL CONOCIMIENTO, EL ARTE, LA POESÍA Y LA VIDA.

EL CONOCIMIENTO ES PATRIMONIO DE LA HUMANIDAD Y SU ACCESO NO DEBE ESTAR RESTRINGIDO POR CONDICIONES ECONOMICAS, NI DE CLASE, NI DE RAZA, NI DE NINGUN TIPO.

*Estudiantes de Física Usach 2011
Por una Educación Gratuita y de Calidad.*

TABLA DE CONTENIDOS

1. OBJETIVOS GENERALES.	8
1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	8
2. ESTADO DEL ARTE.	8
3. PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA.	9
3.1 EL AGUA Y LA NECESIDAD DE SU ESTERILIZACIÓN.	9
3.2 PLANTEAMIENTO ESPECIFICO DEL PROBLEMA.	11
4. ANTECEDENTES TEÓRICOS.	13
4.1 LEY DE LAMBERT - BEER.	13
4.2 TIEMPO DE RESIDENCIA MEDIO.	14
4.3 INTENSIDAD PROMEDIO DE LA RADIACIÓN.	16
4.4 DOSIS GERMICIDA.	16
4.4.1 <i>Dosis Germicida Promedio.</i>	17
4.5 ACCIÓN GERMICIDA DE FOTONES UVC.	17
4.5.1 <i>Absorción de la Radiación UVC en el DNA.</i>	17
4.6 FUENTE ARTIFICIAL DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA.	18
4.6.1 <i>Espectro de emisión de lámpara de mercurio de baja presión.</i>	19
4.6.2 <i>Sistema de cuarzo para aislamiento eléctrico.</i>	20
4.6.3 <i>Distribución de intensidad a lo largo de una lámpara cilíndrica.</i>	21
4.7 ESQUEMAS DE REACTORES CERRADOS Y DE CANAL ABIERTO.	22
4.7.1 <i>Reactores cilíndricos cerrados.</i>	22
4.7.2 <i>Reactores de canal abierto.</i>	22
5. MODELO FÍSICO MATEMÁTICO PARA IMPLEMENTACIÓN EN SOFTWARE.	24
5.1 SISTEMAS DE LÁMPARA ÚNICA.	24
5.1.1 <i>Distribución espacial de la intensidad.</i>	24
5.1.2 <i>Contribución de la Reflección en las paredes internas.</i>	27
5.1.3 <i>Fluido dinámica de distribución radial de la velocidad.</i>	29
5.1.4 <i>Determinación de las Dosis Germicida del sistema.</i>	30
5.2 SISTEMAS MULTI LÁMPARA.	31
5.2.1 <i>Distribución espacial de la intensidad.</i>	31
5.2.2 <i>Contribución de la Reflección en las paredes internas.</i>	34
5.2.3 <i>Determinación de la Dosis Germicida.</i>	36
6. CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR ULTRAVIOLETA PARA DESINFECCIÓN DE AGUAS.	36
6.1 MATERIALES Y MONTAJE.	37
6.1.1 <i>Sistemas de cañerías y tubos de PVC.</i>	37
6.1.2 <i>Sistema de Aislamiento de agua.</i>	38
6.1.3 <i>Lámpara UVC.</i>	39
6.1.4 <i>Montaje Sistema Eléctrico.</i>	40
6.2 PUESTA EN MARCHA.	40
7. APLICACIÓN Y RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.	43
7.1 REACTOR LÁMPARA ÚNICA.	43
7.1.1 <i>Intensidad en función de la Posición Radial.</i>	43
7.1.2 <i>Tiempo de Residencia para diferentes valores del Caudal.</i>	44

7.1.3 Dosis función de la Posición Radial. -----	46
7.1.4 Dosis en función de la transmitancia y de la posición Radial. -----	47
7.1.5 Distribución espacial de la Dosis. -----	49
7.1.6 Factor de Rango mínimo para la Dosis. -----	50
7.1.7 Histograma para valores de Dosis. -----	50
7.1.8 Contribución de la reflexión en las paredes internas. -----	51
7.1.9 Resultados para sistema Karalakis 1.0. -----	53
7.2 REACTORES MULTILÁMPARA. -----	54
7.2.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA INTENSIDAD. -----	54
7.2.2 Contribución de la Reflexión en las paredes internas. -----	56
7.2.3 Dosis Germicida para sistema marca Hidro-UV modelo HO-UV287. -----	57
8. MEDICIÓN DE INTENSIDAD DE RADIACIÓN UVC EN LOSSISTEMAS. -----	58
8.1 SENSORES A UTILIZAR. -----	58
8.1.1 Detector UVC desarrollado en el Laboratorio de Óptica y Semiconductores Usach (SLOSC). -----	58
8.1.2 Detector UVC marca SGLux modelo SENSOR MONITOR 5.0 . -----	60
8.2 MONTAJES EXPERIMENTALES PARA LA MEDICIÓN DE RADIACIÓN UVC. -----	61
8.2.1 Montaje Sensor marca SgLux. -----	61
8.2.2 Montaje Sensor SLOSC. -----	62
8.3 RESULTADOS MEDICIONES. -----	63
8.3.1 Equipo marca Hidro-UV modelo HO-UV287, sensor marca SgLux modelo Sensor Monitor 5.0. -----	63
8.3.2 Equipo Karalakis 1.0, lámpara Phillips TUV 15W SLV , sensor SLOSC. -----	66
8.3.3 Lámpara 87 watts marca Light – Tech, comparación con y sin funda de cuarzo. -----	67
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS. -----	68
9.1 CINÉTICA DE INACTIVACIÓN MICROBIANA. -----	68
9.2 NORMAS EXISTENTES PARA LOS VALORES DE LA DOSIS GERMICIDA. -----	69
9.3 EFECTIVIDAD DE LA DOSIS GERMICIDA DE LOS SISTEMAS ULTRAVIOLETA. -----	70
9.3.1 Equipo Karalakis 1.0. -----	70
9.3.2 Equipo Marca Hidro-UV modelo HO-UV287. -----	71
10. CONCLUSIONES -----	71
REFERENCIAS -----	72
ANEXO I -----	74
ANEXO II -----	75

RESUMEN

La Desinfección con luz ultravioleta (UV) es una alternativa cada vez más valorada y requerida frente al uso de productos químicos para la desinfección de agua potable, aguas residuales, etc. Los sistemas de desinfección UV pueden ser diseñados para una amplia gama de aplicaciones. Se han demostrado amplias ventajas respecto de otros sistemas tradicionales de desinfección, en costo, tiempo y seguridad.

La presente investigación tiene como objetivo principal caracterizar sistemas de desinfección de aguas por medio de radiación ultravioleta emitida por lámparas de mercurio de baja presión. Para ello se desarrolla una metodología basada en simulaciones computacionales de los procesos físicos presentes y mediciones empíricas de la radiación ultravioleta en los procesos, con su respectiva comparación entre los valores simulados y los valores medidos de la radiación en el sistema, de lo anterior podemos definir un valor de Dosis Germicida de cada sistema según su geometría, el número de lámparas, la potencia eléctrica y lumínica de estas, el caudal a tratar y la transmitancia del agua.

El principal problema a la hora de optar por esta tecnología de desinfección, es el poco conocimiento técnico y teórico de los procesos físico y biológicos presentes. Debido a que la desinfección debe estar garantizada, en muchos casos, se ha observado que los sistemas de desinfección mediante radiación ultravioleta están sobre dimensionados, es decir, la distribución de radiación UV en el proceso no es óptima, lo que hace incurrir en costos innecesarios.

Para cumplir con los objetivos primero se expondrán las ecuaciones físico matemáticas que modelan el proceso, luego se expondrá un método que permite llevar estas ecuaciones a un sistema de simulación computacional, tales como los softwares MATLAB, MAPLE, MATHEMATICA, etc. Esto nos permitirá conocer la distribución espacial de la intensidad, la dinámica de fluidos, la distribución espacial y los valores mínimo y promedio de la Dosis germicida. Los valores de intensidad obtenidos en la simulación serán verificados con las correspondientes mediciones de radiación en los equipos, para finalmente obtener el valor de dosis que caracterice a los equipos. Estos valores de dosis germicida se comparan con los valores de dosis necesarios (valores ya conocidos y tabulados) para la eliminación de microorganismos.

1. Objetivos Generales.

Implementar un método que permita caracterizar sistemas de desinfección de aguas mediante radiación ultravioleta con precisión y calidad, que permita la implementación segura de esta tecnología en potabilización de aguas, desinfección en piscinas publicas y privadas, esterilización de agua, etc.

1.1 Objetivos Específicos.

Conocer como se distribuye espacialmente la intensidad de radiación UV en el interior de los reactores, mientras están operativos.

Determinar los valores de Dosis Germicida proporcionados por el sistema según:

Transmitancia del agua, número de lámparas del sistema y su potencia eléctrica, ubicación de las lámparas en el sistema, geometría del reactor, valor del caudal.

2. Estado del Arte.

1877, Downs y Blunt reportaron por primera vez los efectos germicidas de la energía radiante del sol.

1901, Desarrollo de lámparas de vapor de mercurio como fuente de luz UV artificial.

1905, Se reconoce el cuarzo como la envoltura ideal de lámpara debido a que deja pasar los rayos UVC. ^[1]

1910, Primeros intentos experimentales para usar UV como desinfectante del agua se llevaron a cabo en Marsella, Francia. ^[2]

1929, Gates estudió la absorción de radiación UV en ácido nucleico ^[3]

Década de los 30, el desarrollo de las lámparas fluorescentes, permitió realizar lámparas tubulares que facilitaron la implementación de esta tecnología

1955, se pusieron en funcionamiento instalaciones prácticas de desinfección UV para agua potable en Suiza y Austria. En 1985, el número de instalaciones en dichos países había aumentado a 500 y 600 respectivamente. ^[2]

2005, en Nueva York se aprueba la construcción de la Catskill / Delaware UV Desinfección para el tratamiento de agua de la fuente Catskill & Delaware, ubicado a más de 100 kilómetros de la ciudad. El agua tratada se suministra a una población de más de 9 millones de personas en la ciudad y sus alrededores. ^[4]

3. Planteamiento General del Problema.

La provisión de agua dulce está disminuyendo a nivel mundial. Una persona de cada cinco ya no tiene acceso al agua potable. Casi una de cada tres no dispone de medios de saneamiento adecuados. ^[5] El debate mas importante a resolver es entre quienes sostienen que el agua debe ser considerado un commodity o bien comerciable (como el trigo y el café) y quienes expresan que es un bien social relacionado con el derecho a la vida. Los alcances de la soberanía nacional, las herramientas legales, los desarrollos tecnológicos asociados al saneamiento y potabilizacion son también parte de esta problemática en desarrollo. ^[6] Una persona adulta debe consumir al menos 2.5 litros de agua diarios, tomado ya sea de las bebidas, del agua de los alimentos. La sed es una necesidad, una exigencia natural provocado por el aumento de la presión osmótica del medio interior al cuerpo. ^[16]

3.1 El agua y la necesidad de su esterilización.

"El agua y el saneamiento son uno de los principales motores de la salud pública. Suelo referirme a ellos como «Salud 101», lo que significa que en

cuanto se pueda garantizar el acceso al agua salubre y a instalaciones sanitarias adecuadas para todos, independientemente de la diferencia de sus condiciones de vida, se habrá ganado una importante batalla contra todo tipo de enfermedades." *Dr. LEE Jong-wook, Director General, Organización Mundial de la Salud.*^[7]

La presente investigación busca aportar a la solución del problema y a una potabilización segura de agua, reduciendo el riesgo de enfermedades para la población que la consume. En Chile en general el sistema de abastecimiento de agua potable es considerado de los mejores en la región respecto a cobertura y calidad, aunque todavía hay un importante número de comunidades rurales en las que el acceso a este bien no está asegurado. Además los sistemas de potabilización tradicionales actuales son basados en la aplicación de Cloro, lo que no asegura una calidad en el sabor, olor, ni en la salud de quien consume. Aunque es una opción muy común, debe hacerse notar que las sustancias químicas órganocloradas que acompañan a este proceso de desinfección pueden causar problemas de salud pública, poner en peligro la vida acuática y permanecer en el medio ambiente durante períodos prolongados. En vista del interés de balancear los impactos ambientales de la cloración con la necesidad continua de una desinfección efectiva, muchas empresas de servicio de agua han comenzado a seguir otras opciones en cuestión de desinfección.

Los sistemas de purificación tradicionales con cloro requieren de una alta inversión inicial, ya que necesitan transporte del agua (cañerías y bombas) desde la central de purificación hasta cada casa o grifo, lo que hace necesario un número considerable de familias como mínimo, que puedan cubrir entre todas el costo.

Es sabido que muchas personas que viven en sectores rurales, ya sean parcelas o pequeños campos, obtienen su agua desde pozos o vertientes. Para asegurar la desinfección de estas, se utiliza en general cloro, o se hierve el agua. Existen viviendas en donde el agua de sus pozos sólo es utilizada para riego y aseo (lavar platos, autos, etc.) y para consumo compran el agua envasada, lo que demuestra ya una gran demanda de agua potable, la que se podría cubrir con la tecnología ultravioleta instalada en cada hogar o fuente de agua potable.

3.2 Planteamiento específico del Problema.

En este caso particular, se propone como solución a la necesidad de agua potable, el desarrollo y la implementación de la tecnología de desinfección mediante radiación ultravioleta, el problema puntual que aquí surge es conocer la potencia efectiva de un reactor según sus características, número de lámparas y cantidad de agua a tratar, para una geometría cilíndrica, tal como lo indican las figuras 3.3 y 3.2.

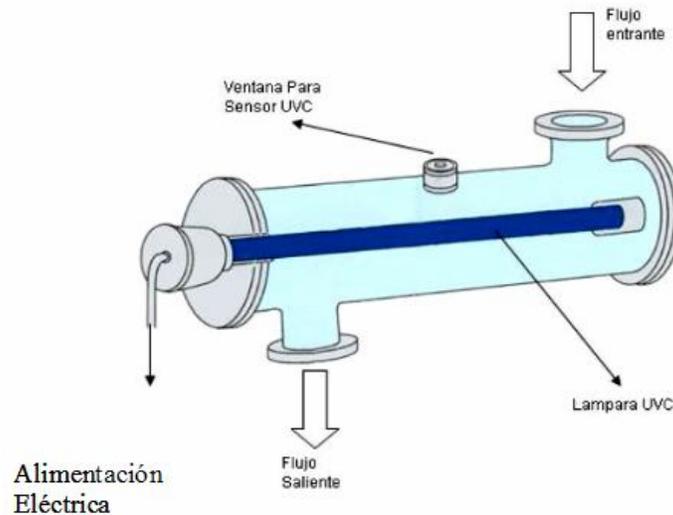


Figura 3.1, Esquema de reactor cilíndrico de lámpara única.

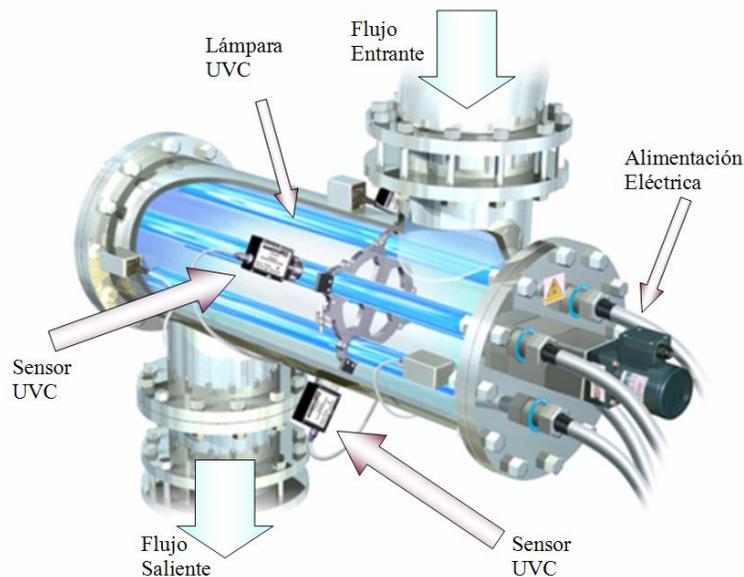


Figura 3.2, Esquema reactor multi lámpara de 4 lámparas, se aprecian sensores de radiación.

La geometría cilíndrica nos permite definir un plano transversal medio, en el cual desarrollaremos el modelamiento de los sistemas.

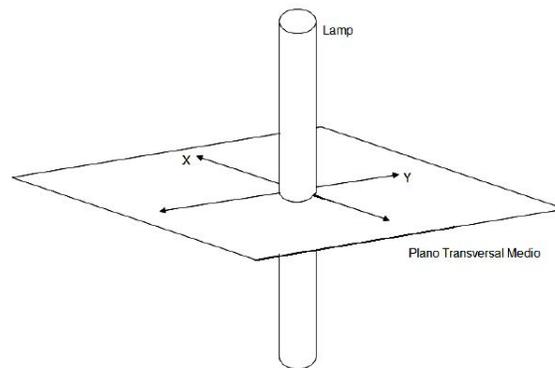


Figura 3.3, Esquema del Plano Transversal Medio en donde se aplica la ecuación 5.1 según el sistema cartesiano de coordenadas.

4. Antecedentes Teóricos.

Los sistemas a estudiar, consideran factores geométricos y físicos, tales como la absorción de la luz en el agua, la fluido dinámica, la forma del reactor ultravioleta, los tiempos de residencia del agua en el sistema, entre otros. Presentaremos los elementos teóricos elementales para poder estudiar estos sistemas, y las definiciones y términos a utilizar en el presente texto.

4.1 Ley de Lambert - Beer.

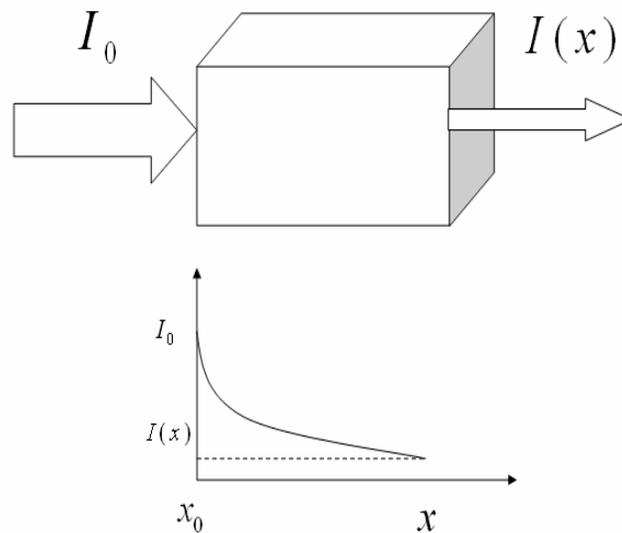


Figura 4.1 Esquema de la Absorción de Lambert Beer para una penetración de largo x .

Es una ley empírica, que relaciona la intensidad incidente I_0 en un material en función de la distancia x recorrida a través de este. Se observa que, al interactuar con un medio absorbente, la luz pierde intensidad, esta variación de la intensidad es función de la distancia recorrida y de la absorción del material. Esta ley es la más apropiada para los estudios de la distribución espacial de la radiación ultravioleta en los sistemas de desinfección ultravioleta ^[17].

La forma matemática de esta ley es:

$$I = I_0 10^{-ax} \quad (4.1)$$

Donde I_0 es la radiación inicial y a es el coeficiente absorción del medio, este es constante y es una propiedad del material. En general se caracteriza el agua según su transmitancia, que se define para una penetración de la luz $x = 1$ cm, según Lambert – Beer, y se expresa como un factor entre 0 y 1, también se puede expresar como porcentaje, por ejemplo cuando hablamos de un 95% de transmitancia, entonces $T = 0.95$. Podemos determinar la absorbancia a en función de la transmitancia T_x .

$$a = -\frac{\log(T_x)}{x} \quad (4.2)$$

4.2 Tiempo de Residencia medio.

Las partículas del fluido son expuestas a la radiación UVC al pasar por el sistema, esta exposición dura un tiempo determinado, podemos definir el tiempo de residencia medio que se medirá en segundos, se puede determinar un valor medio conociendo el Caudal Q y el *Volumen Efectivo* del reactor ultravioleta V , el caudal se mide en unidades de volumen dividido por tiempo.

$$t_{medio} = \frac{V}{Q} \quad (4.3)$$

Considerando la geometría cilíndrica de los reactores, tal como lo indican las figuras 3.1 y 3.2, el volumen efectivo, es el volumen de agua en el reactor, que es el volumen del cilindro del reactor menos el volumen ocupado por el cilindro de la o las lámparas como indica el esquema de la figura 4.2.

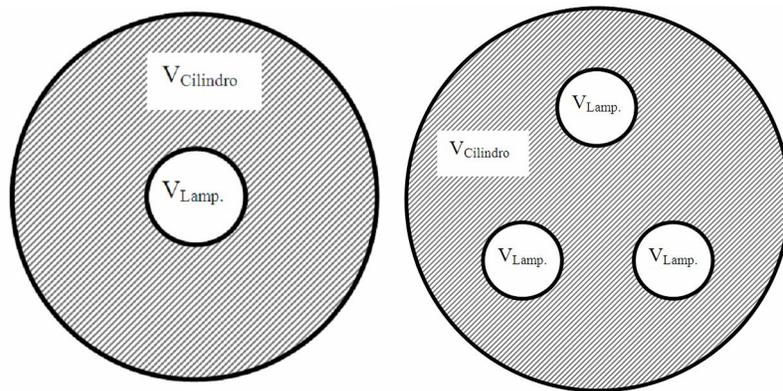


Figura 4.2, Vista Transversal de Sistemas Cilíndricos, el primero de una lámpara y el segundo de tres lámparas. La zona achurada por donde circula el agua corresponde al volumen efectivo.

Caso con una lámpara:

$$V = V_{Cilindro} - V_{Lampara} \quad (4.4)$$

Caso n Lámparas:

$$V = V_{Cilindro} - nV_{Lampara} \quad (4.5)$$

Entonces el tiempo de residencia medio se calcula,

$$t_{medio} = \frac{V_{Cilindro} - nV_{Lampara}}{Q} \quad (4.6)$$

n es el numero de lámparas en el reactor, por ejemplo el caso de la figura 4.2 $n = 3$.

4.3 Intensidad Promedio de la Radiación.

Es el promedio de todos los valores de intensidad en el reactor, en este caso se calculará el promedio ponderado de la intensidad en el área correspondiente a la parte interna del reactor al Plano Transversal medio, ver figura 3.3. Podemos escribir entonces la ecuación 4.7.

$$I_{prom} = \frac{\int_{R_i}^R I(\vec{r}) dA(\vec{r})}{\int_{R_i}^R dA(\vec{r})} \quad (4.7)$$

$I(\vec{r})$ es la intensidad en el reactor según su posición \vec{r} en el plano transversal medio.

En el caso de más de una fuente, el promedio quedaría como sigue

$$I_{prom} = \frac{\int_{R_i}^R \sum_{L=1}^n I_L(\vec{r}) dA(\vec{r})}{\int_{R_i}^R dA(\vec{r})} \quad (4.8)$$

el desarrollo de esta se expondrá en el capítulo 5.

4.4 Dosis Germicida.

En general un reactor de desinfección ultravioleta se caracteriza por su Dosis Germicida Promedio, la dosis se define en general como el producto entre Intensidad y tiempo de residencia. Si consideramos que la intensidad y el tiempo de residencia dependen de la posición radial (desarrollado en el capítulo 5), podemos ubicar el valor del radio en donde esta dosis es mínima y calcular su valor, también podemos determinar un valor promedio de la dosis en la distribución espacial del interior del reactor.

4.4.1 Dosis Germicida Promedio.

La dosis Germicida aplicada sobre una sección espacial de fluido se define como el producto entre el valor de intensidad UVC en dicha sección espacial y el intervalo de tiempo en que el fluido recibió tal valor de intensidad, dicho de manera simplificada la dosis es el producto entre la intensidad y el tiempo de exposición ver ecuación 4.11. Podemos definir la Dosis Germicida Promedio como el producto entre el tiempo de residencia medio y la intensidad promedio en el reactor.

$$D_{prom} = t_{medio} \cdot I_{prom} \quad (4.9)$$

en unidades de : $\left[\frac{mWseg}{cm^2} \right] = \left[\frac{mJ}{cm^2} \right]$, puede escribirse

$$D_{prom} = \frac{V}{Q} \cdot I_{prom} \quad (4.10)$$

4.5 Acción Germicida de fotones UVC.

4.5.1 Absorción de la Radiación UVC en el DNA.

En la desinfección de aguas mediante luz ultravioleta el efecto germicida es producido por la energía que los fotones ultravioleta de 254 nm de longitud de onda, transfieren a los enlaces moleculares que constituyen el DNA de los virus, bacterias, hongos, etc. Los microorganismos son desactivados y quedan incapacitados para reproducirse o infectar.

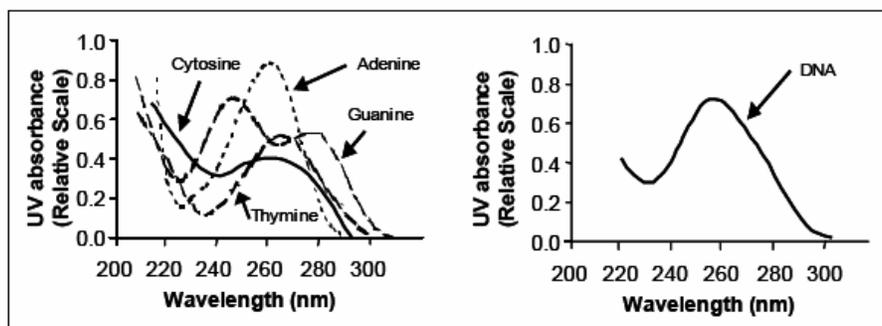


Figura 4.3, Absorción UVC en nucleótidos y en DNA (a PH 7), se aprecia que el DNA tiene su máximo de absorción entre los 250 y 260 nm de longitud de onda. ^[8]

La radiación UV absorbida promueve la formación de enlaces entre nucleótidos adyacentes, con lo que se crean moléculas dobles o dímeros. Si bien la formación de dímeros de tiamina-tiamina son los más comunes, también suelen ocurrir dímeros de citosina-citosina, citosina-tiamina, y dimerización del uracilo. La formación de un número suficiente de dímeros dentro de un microbio impide que éste replique su DNA y RNA, lo que impide su reproducción. Debido a la dependencia de la longitud de onda para la absorción de UV por parte del DNA, la inactivación UV de los microbios también está en función de la longitud de onda.^[9]

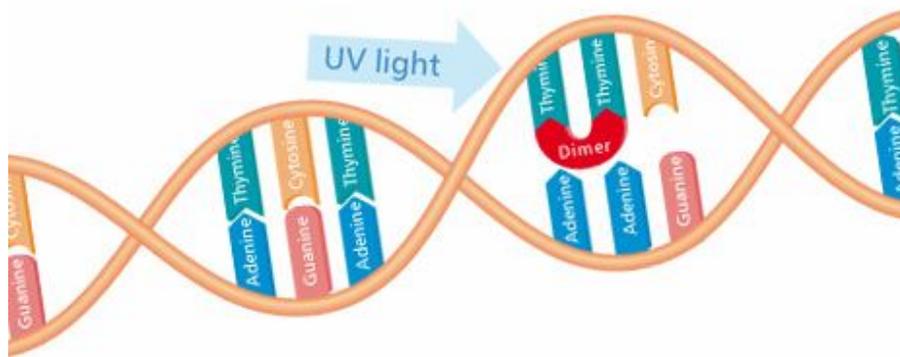


Figura 4.4, Representación esquemática de una cadena de ADN luego de ser modificado por la radiación UVC, se aprecia la formación de dímeros (enlaces entre elementos de la misma hebra) que alteran la información genética del microorganismo impidiendo su reproducción.

4.6 Fuente artificial de Radiación Ultravioleta.

La mayoría de las lámparas UV actualmente diseñadas para el tratamiento del agua, utilizan principalmente vapor de mercurio o una mezcla de mercurio y otros gases. La producción de luz UV de las lámparas a base de mercurio depende de la manera en que se encuentren los átomos de mercurio, lo cual está directamente relacionado con la presión del vapor de mercurio. Los tipos de lámparas se diferencian en el valor de la presión de Hg, tenemos las de Baja presión LP, las de mediana presión MP, y las de amalgama AHO que contienen otros tipos de gases junto con el mercurio y que trabajan a una mayor potencia emitiendo

mas intensidad que las anteriores. En este trabajo estudiaremos sistemas que usen lámparas de baja presión alta intensidad LPHO.

Las lámparas de arco de mercurio de baja presión usadas en la desinfección de agua varían en longitud de 35 a 163 cm y tienen un diámetro entre 1,2 y 1,9 cm. Durante la fabricación de la lámpara, se introduce el mercurio en la lámpara en la forma de una sola gota (50-100 mg Hg en una lámpara de baja presión de 1.5 m.^[1]

La activación (o ionización) de los átomos de mercurio se produce por las descargas eléctricas. Se usa mercurio ya que es el elemento metálico más volátil en el que puede activarse la fase gaseosa a temperaturas compatibles con las estructuras de las lámparas. Por otra parte, tiene una energía de ionización lo suficientemente bajo como para permitir el llamado "efecto avalancha", que es una reacción en cadena que subyace en la descarga eléctrica. Al ionizar el gas por descargas eléctricas, se obliga a los electrones excitados en los átomos de mercurio a volver a un estado de menor energía (por ejemplo, el estado fundamental) ver Figura 4.6.

4.6.1 Espectro de emisión de lámpara de mercurio de baja presión.

Al realizar un análisis espectral de la luz con la que se tratará el agua, tenemos el siguiente grafico.

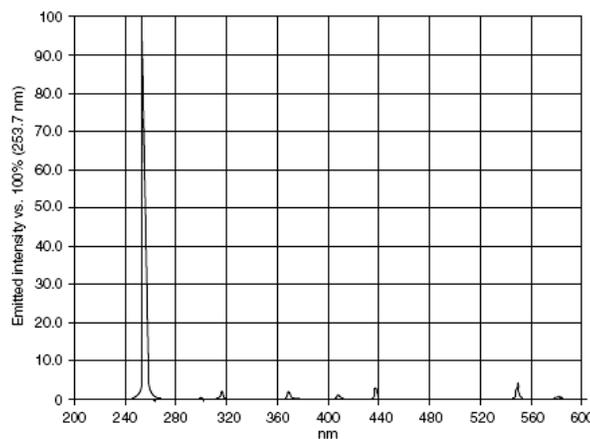


Figura 4.5, Espectro de emisión de una lámpara de mercurio de baja presión. ^[10]

4.6.2 Sistema de cuarzo para aislamiento eléctrico.

Debido a que las lámparas funcionan con electricidad, y estas deben estar en contacto directo con el caudal de agua a tratar, es necesario aislarlas eléctricamente, es decir debemos asegurar que el agua no estará en contacto con el sistema eléctrico, para ello se recubren las lámparas con una camisa de cuarzo ver figura 4.8, que impide que el agua entre en contacto con la lámpara, además el cuarzo permite el paso de los fotones UVC a través de este, ver figura 4.6.

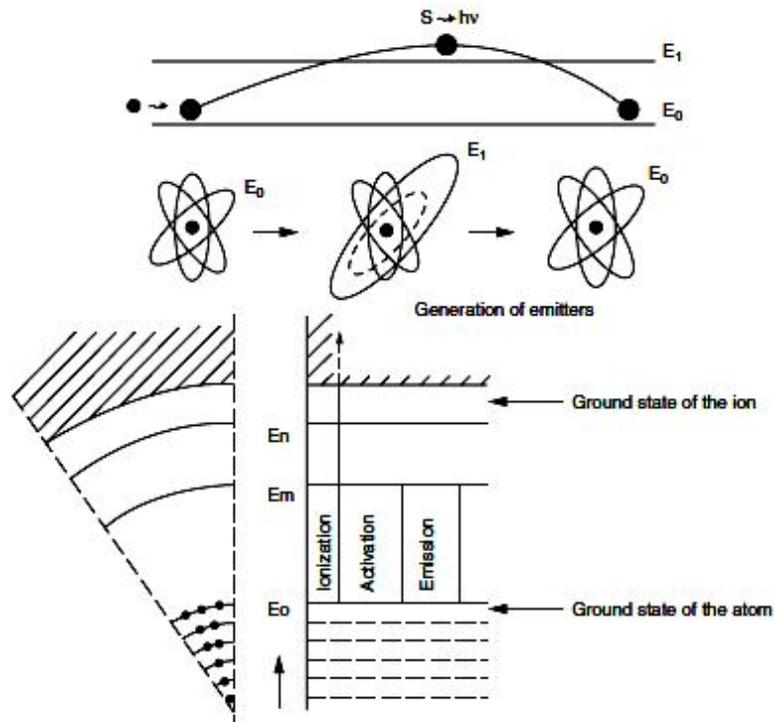
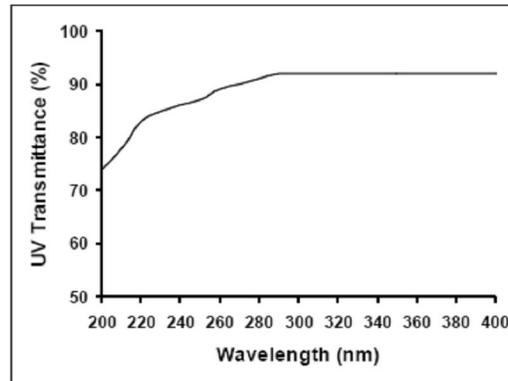


Figura 4.6, Esquema emisión cuántica de fotones en el mercurio.^[10]

El cuarzo es el recubrimiento ideal ya que este es transparente a la radiación que nos interesa hacer interactuar con el caudal de agua, ver figura 4.7.



Source: GE Quartz (2004a)

Figura 4.7, Transmitancia UV en función de la longitud de onda, para la radiación de 254 nm podemos apreciar que la transmitancia está entre el 85 y 90 %.^[11]

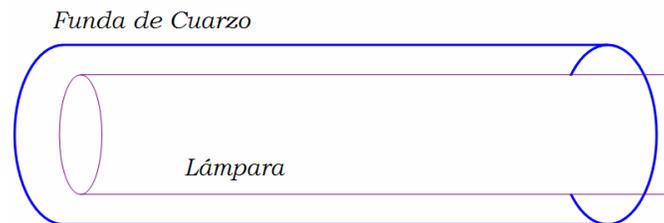


Figura 4.8, Dibujo que representa la funda de Cuarzo envolviendo la lámpara UV.

4.6.3 Distribución de intensidad a lo largo de una lámpara cilíndrica.

La intensidad emitida por la lámpara depende principalmente de la distancia radial al eje del cilindro, debido a que la intensidad en función del largo es prácticamente constante, podemos introducir un factor de corrección longitudinal según el comportamiento de la intensidad en los extremos, ver figura 4.9.

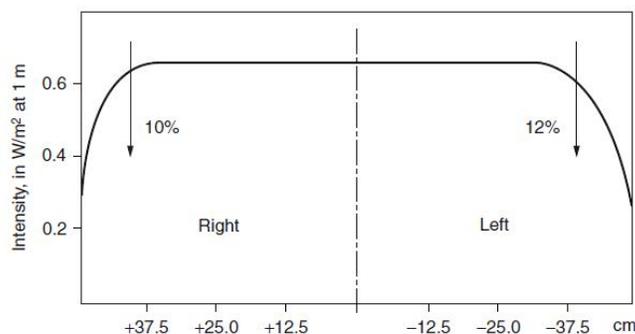


Figura 4.9, Distribución superficial de la intensidad y su porcentaje de disminución a la intensidad total a lo largo del tubo.^[12]

4.7 Esquemas de reactores cerrados y de canal abierto.

Existen al menos dos tipos de reactores que se diferencian básicamente en que unos son cerrados y estos deben soportar las presiones asociadas al caudal, este valor de presión debe ser tomada en cuenta a la hora de implementar a un equipo cerrado a un caudal específico. Tenemos también los reactores de canal abierto, los cuales tienen la parte superior descubierta, es decir son canales de agua, en los cuales debe ponerse atención en el nivel del agua en el canal.

4.7.1 Reactores cilíndricos cerrados.

Básicamente el sistema consiste en un cilindro por el cual pasará el caudal, el que en su interior tendrá lámparas también cilíndricas (de radio mucho menor al cilindro del reactor), estas lámparas van recubiertas por un tubo de cuarzo, el sistema eléctrico de alimentación de las lámparas está fuera del reactor. Estos se describieron en las figuras 4.12 y 4.13.

4.7.2 Reactores de canal abierto.

Estos sistemas en general tienen ubicadas las lámparas en dirección paralela al flujo del agua, en general tienen más de una lámpara, estas se disponen en módulos con una encima de la otra a una misma distancia entre ellas, cada módulo se acomoda en el canal. El canal puede ser de hormigón, acero inoxidable u otro material resistente a la radiación UV.

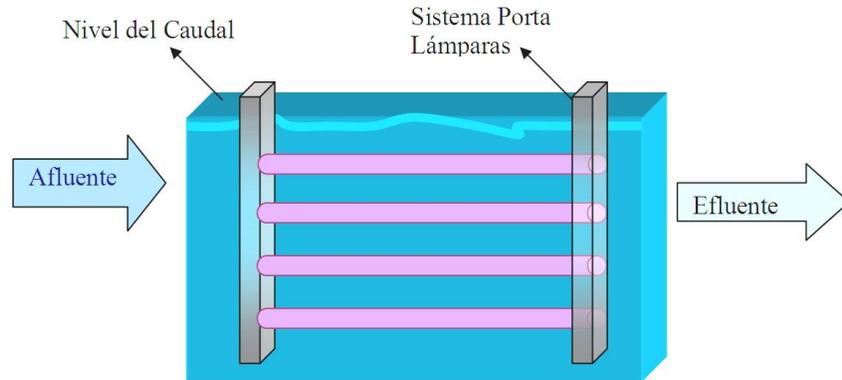


Figura 4.12, Dibujo esquemático sistema de canal abierto, las lámparas están paralelas al flujo del agua, el nivel del agua siempre debe cubrir todas las lámparas.

La siguiente figura indica un sistema de canal abierto, con seis módulos de cuatro lámparas cada uno, en un canal de acero inoxidable.

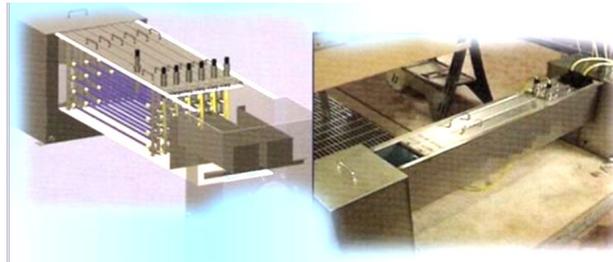


Figura 4.13, Dibujo esquemático Sistema de canal abierto de acero de 6 módulos de 4 lámparas cada uno, fotografía de sistema de canal abierto pequeño, en acero inoxidable.^[13]

5. Modelo Físico Matemático para implementación en software.

Se quiere saber el valor de la intensidad de la radiación UVC en puntos al interior del reactor, considerando las características geométricas de la fuente, su potencia, la absorción de la luz en el agua y la distancia del punto a la o las fuentes, los cambios en el coeficiente de absorción del agua no dependen del valor del flujo de agua. Se incluirán consideraciones de la fluidodinámica sólo para el caso de lámpara única.

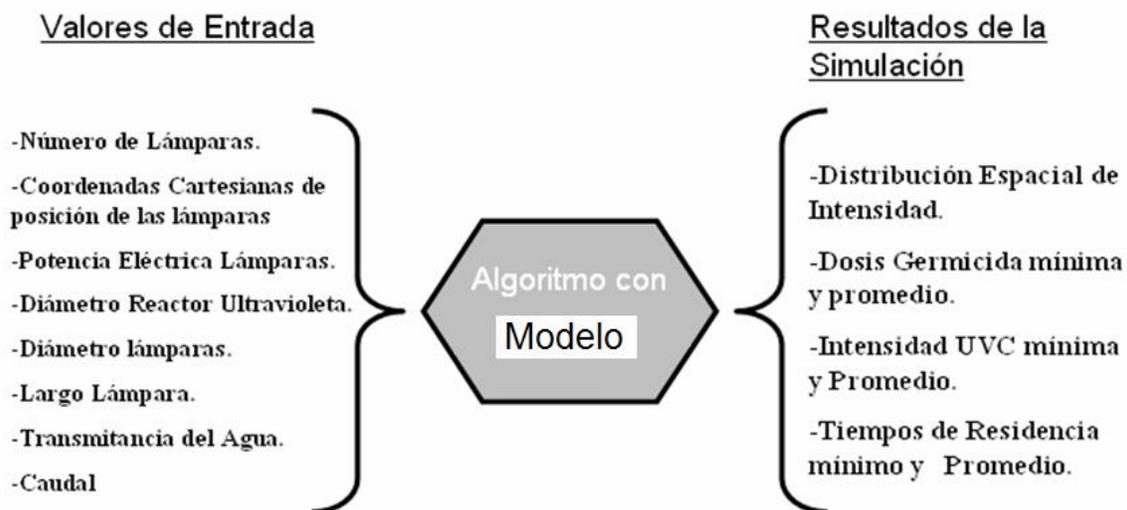


Figura 5.1 Visión esquemática de Modelo Fredes a implementar.

5.1 Sistemas de Lámpara única.

5.1.1 Distribución espacial de la intensidad.

El modelo a utilizar para describir la distribución espacial de la radiación, es llamado Infinite line source model (ILS) en la publicación de S. Kucuk del 2004 el cual desarrolla la ecuación 5.1, en este caso se expresa vectorialmente, también podemos usar el Finite surce model (FSM), que se describe en detalle en la publicación mencionada. Para cálculos de promedios espaciales de intensidad los resultados resultan ser iguales para ambos modelos, por lo que usaremos el ILS por ser mas censillo.

Se determina la intensidad según la siguiente ecuación vectorial.

$$I(\vec{r}) = I_0 \frac{R_l}{|\vec{r}|} 10^{-a(|\vec{r}|-R_l)} \quad (5.1)$$

$|\vec{r}|$ es el modulo del vector posición, I_0 es la Intensidad en la superficie de la lámpara, R_l es el Radio de la Lámpara y a es la absorbancia del medio (en este caso agua).^[14]

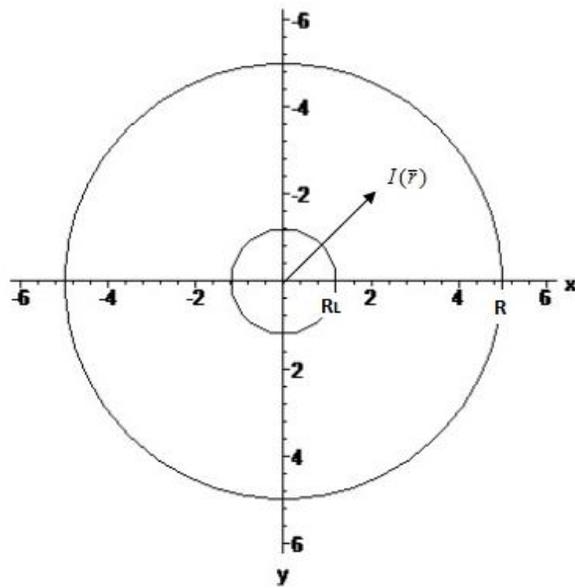


Figura 5.2, Vista Transversal de un reactor cilíndrico de lámpara única, y su representación en el plano cartesiano llamado también Plano Transversal Medio, donde R_L es el radio de la lámpara, R es el radio del reactor e $I(\vec{r})$ es la intensidad en función del vector posición \vec{r} .

Se definirá un plano con un sistema cartesiano de coordenadas x e y con el origen según la figura 5.2. Deben definirse las condiciones de borde. Para reactores cilíndricos, la evaluación de la intensidad, debe ser en los puntos que estén dentro de la circunferencia que limita las paredes del reactor, los subíndices j e i relacionan los valores x e y en el plano según la ecuación 5.2.

$$I(r_{ij}) = \begin{cases} 0 & \text{si } r_{ij} < R_l \\ 0 & \text{si } r_{ij} > R \\ I_0 \frac{R_l}{r_{ij}} 10^{-a(r_{ij}-R_l)} & \text{si } R_l < r_{ij} < R \end{cases} \quad (5.2)$$

Donde r_{ij} es el modulo del vector posición, I_0 es la Intensidad en la superficie de la lámpara, R_l es el Radio de la Lámpara y a es la absorbancia del medio (en este caso agua), R es el Radio definido por las paredes del reactor, R y R_l son constantes.

Podemos definir en una matriz de N x N elementos que contengan los valores evaluados por la ecuación 5.2 en el plano, le llamaremos Matriz de Intensidades. Se generará entonces una matriz, donde cada elemento es el valor de la intensidad en una coordenada cartesiana del espacio. Esta matriz tendrá tantos elementos como determine la geometría del reactor y la fineza del cálculo (factor h) ver figura 5.3.

Los puntos en el plano se evaluarán para distintos valores de x e y.

$$I(\vec{r}_{ij}) = I(x_i, y_j) \quad (5.3)$$

Los sub índices siguen las relaciones

$$\begin{aligned} i &= 1, 2, \dots, N \\ j &= 1, 2, \dots, N \\ x_i &= ih \\ y_j &= jh \end{aligned} \quad (5.4)$$

con

$$r_{ij} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2} = |\vec{r}_{ij}| \quad (5.5)$$

El software debe encargarse de evaluar la ecuación 5.1 en las coordenadas x e y, estas serán incrementadas un valor h constante en cada ciclo de cálculo, para así recorrer toda el área del plano a evaluar (en general $h = 0,1$ en unidades de [cm]) y generar la Matriz de Intensidades, como muestra la figura 5.3.

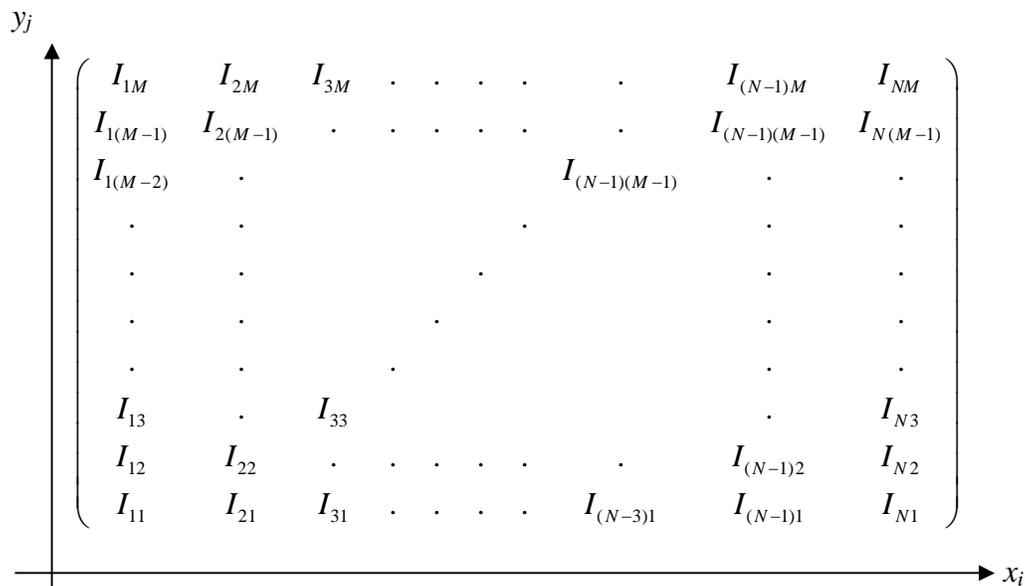


Figura 5.3 Matriz de Intensidades y plano cartesiano, cada elemento de la matriz es la intensidad UVC en una coordenada espacial específica.

Podemos determinar la intensidad en el borde del reactor (superficie de la pared interna del manto cilíndrico) se denotará I_B según la siguiente ecuación

$$I(r_{ij} = R) = I_0 \frac{R_l}{R} 10^{-a(R-R_l)} = I_B \quad (5.6)$$

$$I_B = cte. \quad (5.7)$$

La ecuación vectorial nos da la intensidad en cualquier posición indicada por el vector \vec{r} que tiene su origen en el centro de la lámpara cilíndrica y apunta perpendicular al eje de simetría del cilindro, en el Plano Transversal Medio, figura 5.2. La ecuación 5.1 nos dice que la intensidad lumínica decae inversamente con la distancia y además decae por la absorción en el medio según la Ley de Lambert – Beer.

5.1.2 Contribución de la Reflexión en las paredes internas.

La ecuación para la intensidad reflejada en las paredes internas del cilindro (solo en el caso en que el material del reactor tenga esa propiedad de reflexión de rayos UVC), considerando la reflexión en el manto cilíndrico y no en las tapas, queda como sigue:

$$I_{rfx}(r_{ij}) = \begin{cases} 0 & \text{si } r_{ij} < R_l \\ 0 & \text{si } r_{ij} > R \\ f_{rfx} I_B 10^{-a(R-r_{ij})} & \text{si } R_l < r_{ij} < R \end{cases} \quad (5.8)$$

I_B corresponde al valor de la intensidad en las paredes del reactor, con el cual se calcula la intensidad reflejada desde los bordes hacia el interior del reactor, donde f_{rfx} es el factor de reflectancia de UVC en el material del cilindro, en la tabla 5.1 se especifican valores ya medidos para las superficies sin agua. La ecuación 5.8 a diferencia de la 5.1, no muestra dependencia con la geometría cilíndrica, ya que se hace la suposición de que cada rayo que sale radial de la lámpara a la pared, es reflejado en la misma dirección de incidencia, es decir el ángulo de incidencia de 0° respecto de la normal

. Tabla 5.1 Valores para el porcentaje de radiación reflejada según la superficie.^[15]

TABLE 4
Reflectance of UV at 254 nm

Material	Reflectance (%)
Aluminum foil	60–90
Evaporated aluminum on glass	75–90
Stainless steel	25–30
Chromium (metal)	40
Nickel (metal)	40
Oil paint (white)	3–10
Water paint (white)	10–35
Aluminum coating—paint	40–75
White plastering	40–60
Zinc oxide	5–10
Magnesium oxide	75–90
White linen	15
White cotton	30
White wool	4
Wall paper	20–30
Enamels	5–10

From technical documents of Philips Lighting, Eindhoven, the Netherlands.

Se define entonces la ecuación para la intensidad total en el reactor como la suma de la intensidad emitida por la lámpara y la intensidad de la luz reflejada en las paredes internas del reactor, cumpliendo el Principio de Superposición del electromagnetismo clásico.

$$I_{Total}(r_{ij}) = I(r_{ij}) + I_{rfx}(r_{ij}) \quad (5.9)$$

5.1.3 Fluido dinámica de distribución radial de la velocidad.

La dinámica del fluido dentro del reactor dependerá entre otros factores de la viscosidad, la velocidad del flujo, las posiciones de la entrada y salida del agua, las dimensiones de estas entradas y salidas, de los radios de la lámpara (considerando su envoltura de cuarzo) y del radio del reactor. Se quiere conocer el comportamiento de los tiempos de residencia en el reactor, por ser este de geometría cilíndrica este puede ser caracterizado solo por la posición radial, simplificando el calculo, realizaremos la modelación considerando un Flujo laminar de Poiseuille. ^[16] Esta aproximación es apropiada para el tipo de agua a tratar ya que su coeficiente de absorción es bajo y relativamente constante, Según la publicación de Ye Schengcay del 2007 ^[16] podemos considerar el flujo en reactor cilindro como laminar para coeficientes de absorción cercanos a cero, ver figura 5.4 de la distribución de dosis en un reactor cilíndrico de flujo laminar para diferentes valores del coeficiente de absorción (en el grafico denotado con la letra A). En el caso estudiado, en el a tratar el coeficiente de absorción es muy cercano a cero. Existe también el modelo de flujo turbulento, cuyo resultado contribuiría de manera considerable sólo en procesos donde el coeficiente de absorción sea alto, por ejemplo en el tratamiento de bebida, jugos, cidra, etc. Lo que no es el presente caso. Después de aplicar las ecuaciones de Navier-Stokes de flujo laminar para fluidos newtonianos, según la posición r perpendicular al eje de simetría del cilindro, se puede obtener una ecuación para el perfil radial de velocidades.

$$u(r) = C_1 \left[1 - \frac{r^2}{R^2} - \frac{1 - \frac{R_l^2}{R^2}}{\ln\left(\frac{R_l}{R}\right)} \ln\left(\frac{r}{R}\right) \right] \quad (5.10)$$

donde C_1 es una constante definida como sigue,

$$C_1 = \frac{2v}{\left(1 + \frac{R_l^2}{R^2} + \frac{1 - \frac{R_l^2}{R^2}}{\ln\left(\frac{R_l}{R}\right)} \right)} \quad (5.11)$$

nuevamente R_l es el radio de la lámpara, R el radio del reactor y v es la velocidad media del fluido que se determina con el largo efectivo del reactor L y el tiempo de residencia medio según 2.3.1.

$$v = \frac{L}{t_{medio}} \quad (5.12)$$

De las dos ecuaciones anteriores podemos entonces definir el tiempo de residencia en función de la posición radial en unidades de segundos

$$t(r) = \frac{L}{u(r)} \quad (5.13)$$

5.1.4 Determinación de las Dosis Germicida del sistema.

Con la anterior podemos determinar la dosis germicida en función de la posición radial en el reactor $D(r)$, ya que la dosis germicida se define como el producto de la intensidad y el tiempo de exposición a dicha intensidad (en este caso tiempo de residencia), podemos implementar las ecuaciones para estudiar la dosis en el sistema.

$$D(r) = I(r)t(r) \quad (5.14)$$

La función $D(r)$ es continua y tiene derivada, que nos permite identificar para qué valor de r tenemos la dosis mínima, a este valor le llamaremos $r_{D_{\min}}$, al evaluar 5.14 para un valor $r_{D_{\min}}$ podemos conocer la Dosis mínima.

$$D_{\min} = D(r_{D_{\min}}) \quad (5.15)$$

Para dar una simplificación practica, sobre todo en los casos de sistemas de mas de una lámpara que desarrollaremos mas adelante, podemos suponer una relación proporcional entre el valor de Dosis mínimo D_{\min} y el valor de Dosis promedio, este valor de proporcionalidad lo llamaremos *Coefficiente de rango mínimo*.

$$\chi = \frac{D_{\min}}{D_{prom}} \quad (5.16)$$

al considerar la ecuación 4.9, e incluir el porcentaje de contribución de la reflexión interna a la dosis, en 5.17 se tiene una expresión para la Dosis nominal mínima D'_{\min} .

$$D'_{\min} = \chi I_{prom} t_{prom} + \gamma_{rfx} \quad (5.17)$$

donde $\gamma_{rfx} = I_{rfx} t_{prom}$ es el aporte a la dosis debido a la reflexión de la radiación en las paredes internas del reactor. Es la expresión que representa cómo se determina el valor de dosis mínima que caracterizará a un sistema de una lámpara.

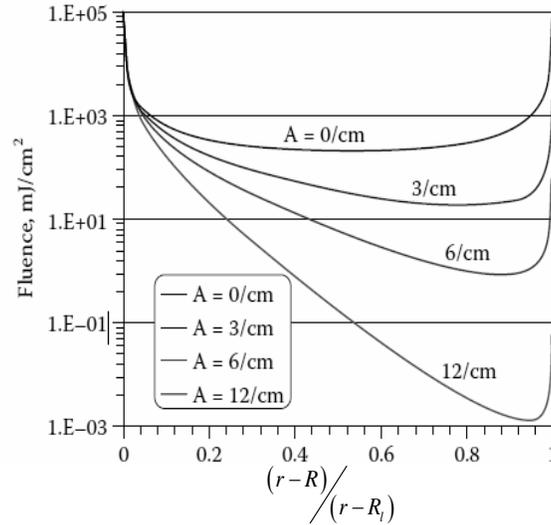


Figura 5.4 Dosis en función de la posición radial en el Reactor, para diferentes valores del coeficiente de absorción a en el gráfico se denota con la letra A. ^[16]

5.2 Sistemas multi lámpara.

5.2.1 Distribución espacial de la intensidad.

En este caso tenemos más de una lámpara, estas no están necesariamente en el origen, por lo que debemos considerar la posición de estas con sus respectivas coordenadas, con esto podemos definir nuestro vector \vec{r}_{ijL} , según la figura 5.5.

Según la figura 5.5 podemos determinar el módulo del vector, que es la distancia de la fuente (lámpara) al punto a evaluar según la siguiente ecuación.

$$r_{ijL} = |\vec{r}_{ijL}| = |\vec{r}_{ij} - \vec{r}_L| = \sqrt{(x_L - x_i)^2 + (y_L - y_j)^2} \quad (5.17)$$

donde (x_L, y_L) son las coordenadas de posición de la lámpara L según indica la figura 5.6.

Cada lámpara aporta una intensidad en el punto (x_i, y_j) , dependiendo de su distancia al

punto definida por el vector \vec{r}_{ijL} estas se calculan para cada lámpara (valor de L) y luego se suman según el principio de superposición del electromagnetismo clásico. Con $L = 1, 2, \dots, n$, con n el número de lámparas.

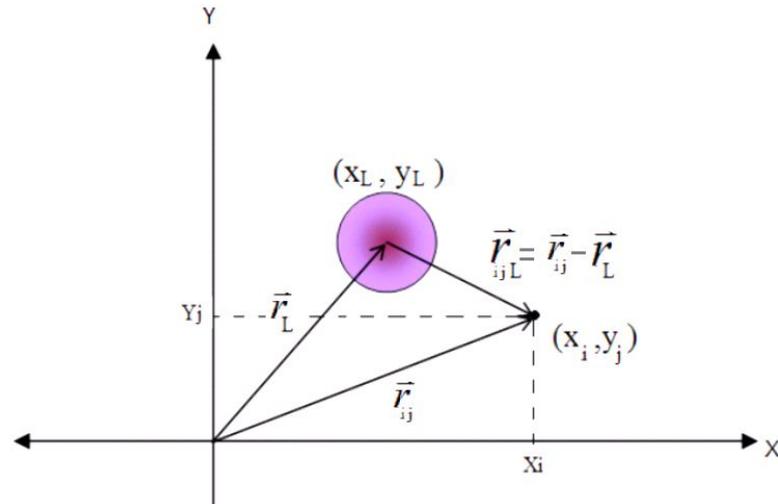


Figura 5.5, Esquema vectorial para la determinación del módulo del vector \vec{r} considerando las coordenadas de ubicación de la lámpara (x_i, y_j) y el punto espacial a evaluar.

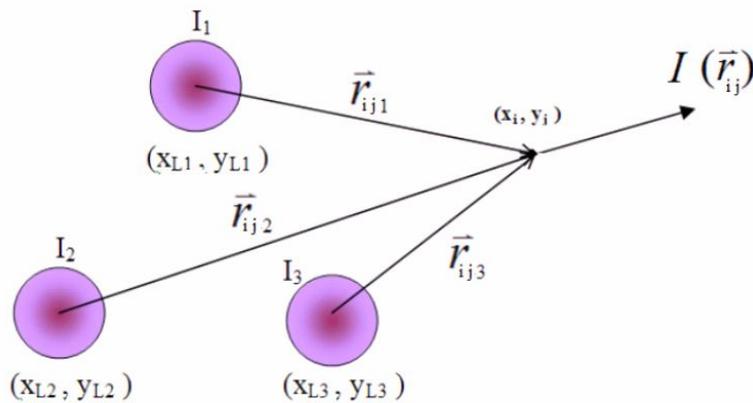


Figura 5.6, Análisis vectorial de la suma de intensidades producidas por tres lámparas (vista transversal) con sus respectivas ubicaciones en coordenadas cartesianas, determinación de la intensidad total en un punto (x_i, y_j) .

Podemos generalizar la ecuación para n lámparas con sus respectivas coordenadas. La Intensidad total producida por varias lámparas se puede definir con el siguiente desarrollo.

Para una sola lámpara tenemos

$$I(r_{ij}) = I_0 \frac{R_l}{|\vec{r}_{ij}|} 10^{-a(|\vec{r}_{ij}| - R_l)} \quad (5.18)$$

Para n lámparas, y considerando el principio de superposición del electromagnetismo clásico representado en la figura 5.6 tenemos

$$I(r_{ij}) = \sum_{L=1}^n \frac{I_0 R_l}{|\vec{r}_{ij} - \vec{r}_L|} 10^{-a(|\vec{r}_{ij} - \vec{r}_L| - R_l)} \quad (5.19)$$

Podemos escribirla también como

$$I(r_{ij}) = I(r_{ij1}) + I(r_{ij2}) + \dots + I(r_{ijn}) = \sum_{L=1}^n I(r_{ijL}) \quad (5.20)$$

Al incluir las condiciones de borde en la ecuación de la intensidad dentro del reactor para cada lámpara L queda:

$$I(r_{ijL}) = \begin{cases} 0 & \text{si } |\vec{r}_{ij} - \vec{r}_L| < R_l \\ 0 & \text{si } |\vec{r}_{ij}| > R \\ I_0 \frac{R_l}{|\vec{r}_{ijL}|} 10^{-a(|\vec{r}_{ijL}| - R_l)} & \text{e.o.c.} \end{cases} \quad \text{a}(5.21)$$

Todas las lámparas tienen el mismo Radio por lo que R_l tiene un valor constante, R es el radio del reactor, \vec{r}_L es la coordenada de la lámpara L . Finalmente la ecuación analítica para la intensidad en el Plano Transversal Medio se puede escribir como sigue:

$$I(r_{ij}) = \sum_{L=1}^n I(r_{ijL}) \quad (5.22)$$

El problema se reduce desde tres variables i, j, L a sólo dos i, j lo que nos permite trabajar con una matriz de $N \times N$ elementos con N un número entero mayor que cero.

^a e.o.c. Significa en otro caso.

5.2.2 Contribución de la Reflección en las paredes internas.

Se debe considerar también, que a diferencia del caso de Lámpara Única, la intensidad en los bordes nos es de valor constante.

$$I_B \neq cte. \quad (5.23)$$

La intensidad en los bordes varía según la variación del ángulo del vector \vec{r} en coordenadas polares para un radio fijo, que corresponde a \mathbf{R} el radio del reactor. Se define la intensidad en el borde como función del ángulo, $I_B = I_B(R, \theta)$, con $0 \leq \theta \leq 2\pi$ y $R = cte.$

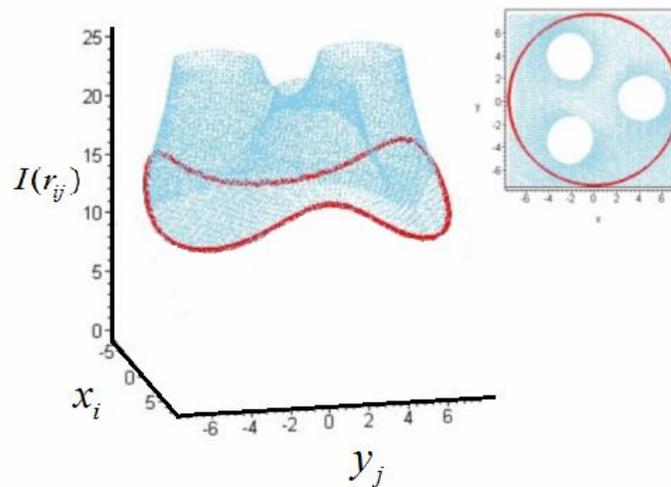


Figura 5.7, Gráfico de intensidad en función de la posición en el Plano Transversal Medio, la línea roja representa los valores de intensidad en el borde del reactor cilíndrico.

Podemos representar la variación de la intensidad en el borde en un grafico de intensidad en función del ángulo. Por ejemplo, para el caso de reactores de 2 y 3 lámparas tenemos la siguiente distribución de intensidades en el borde del reactor.

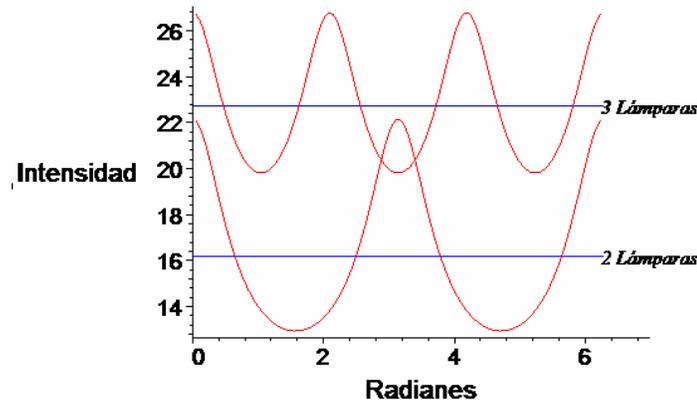


Figura 5.8, Curvas para la intensidad en el borde del reactor en el plano Transversal Medio según su posición angular en coordenadas polares, para dos tipos de equipos uno de tres lámparas y otro de 2 lámparas, ambos de radio $R=7.5$ cm.

Para poder definir una función de intensidad reflejada en función sólo de la posición radial, se calcula el promedio de los valores de intensidad en el borde del reactor \bar{I}_B que en la figura 5.8 se representa con la línea horizontal azul.

$$\bar{I}_B = \frac{\int_0^{2\pi} I_B(R, \theta) d\theta}{\int_0^{2\pi} d\theta} \quad (5.24)$$

La ecuación de la intensidad reflejada en el Plano transversal medio, para sistemas de más de una lámpara es

$$I_{rfx}(r_{ijL}) = \begin{cases} 0 & \text{si } |\bar{r}_{ij} - \bar{r}_L| < R_L \\ 0 & \text{si } |\bar{r}_{ij}| > R \\ \bar{I}_B 10^{-a(R-r_{ij})} & \text{e.o.c.} \end{cases} \quad (5.25)$$

recuerde que L toma los valores $L = 1, 2, \dots, n$, con n el número de lámparas del equipo, finalmente podemos escribir

$$I_{rfx}(r_{ij}) = \sum_{L=1}^n I_{rfx}(r_{ijL}) \quad (5.26)$$

Entonces la intensidad total en el reactor cilíndrico de mas de una lámpara se escribirá según la ecuación

$$I_{Total}(r_{ij}) = I(r_{ij}) + I_{rfx}(r_{ij}) \quad (5.27)$$

podemos obtener la Intensidad total promedio, sumando todos los puntos evaluados en la zona del plano transversal medio que corresponde al reactor y dividiéndolo por el número de puntos considerados en la simulación, se puede expresar la suma analíticamente con integrales para calcular el promedio ponderado en el área del plano transversal medio que contiene al reactor.

$$I_{prom} = \frac{\int_{Area} I_{Total}(r_{ij}) dA(r_{ij})}{\int_{Area} dA(r_{ij})} \quad (5.28)$$

5.2.3 Determinación de la Dosis Germicida.

Si consideramos la ecuación 4.10, podemos entonces conocer la Dosis Germicida promedio $D_{prom} = (V / Q) \cdot I_{prom}$. Finalmente se procede según la ecuación 5.17 y obtenemos el valor de dosis nominal mínima conociendo previamente los valores correspondientes del coeficiente de rango mínimo χ y según el aporte de la reflexión interna γ_{rfx} .

6. Construcción de un Reactor Ultravioleta para desinfección de Aguas.

Se diseñó y construyó un reactor ultravioleta de una sola lámpara, con el objetivo de caracterizarlo, verificar su rango de efectividad, conocer los principales aspectos prácticos de la producción y puesta en marcha. Este modelo de Reactor llevará por nombre “Karalakis 1.0” (el apodo de mi abuelo q.e.p.d quien elaboro algunas partes y piezas en su torno) es de diseño propio y fue desarrollado para cumplir los objetivos de la presente tesis.

Seguendo el esquema de la figura 4.8 se ha diseñado y construido el siguiente sistema de reactor ultravioleta.

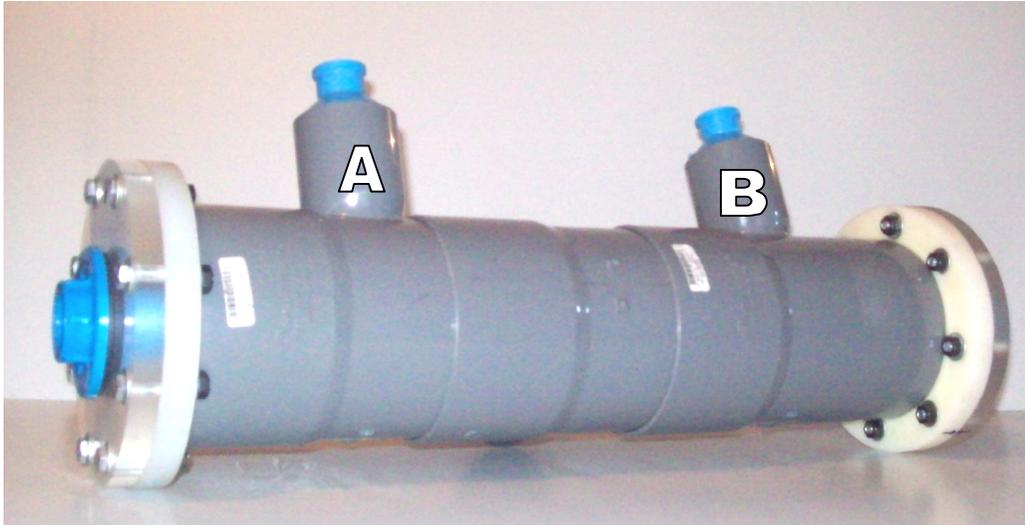


Figura 6.1 Karalakis 1.0, Reactor Ultravioleta de PVC.

6.1 Materiales y Montaje.

6.1.1 Sistemas de cañerías y tubos de PVC.

El cilindro principal de nuestro reactor, las cañerías, codos, llaves de paso, etc. serán de PVC, la ventaja de esto es que es fácil encontrar en PVC una gran cantidad de tipos de conexiones por diámetro, por hilo, diferentes tipos de codos, llaves de paso, etc.

No obstante es sabido, que el PVC sufre los efectos de la radiación ultravioleta, este tendrá mayor posibilidad de quebrarse por algún golpe o por la presión, esto reduce la vida útil de los reactores, sin embargo, para efectos de la presente investigación, la vida útil del reactor ha sido suficiente. Existen en el mercado Sistemas de desinfección ultravioleta desarrollados en PVC especialmente tratado para reducir los impactos del UV y de HDP por sus siglas en ingles (Polietileno de alta densidad). En la figura 6.1 se aprecia el reactor ultravioleta en proceso de construcción, las entradas y salida del agua se indican con A y B. En el interior del reactor deberá ir la lámpara ultravioleta eléctricamente aislada del agua con su correspondiente sistema eléctrico.

6.1.2 Sistema de Aislamiento de agua.

Es necesario que el sistema que sostenga a la lámpara permita que esta pueda recibir la alimentación eléctrica debida sin interferir con el agua que interactuará directamente con la lámpara en el proceso. Además el reactor no debe filtrar agua, el ensamblaje de las piezas en las tapas del cilindro que constituye al reactor ultravioleta debe cumplir con dichas condiciones.

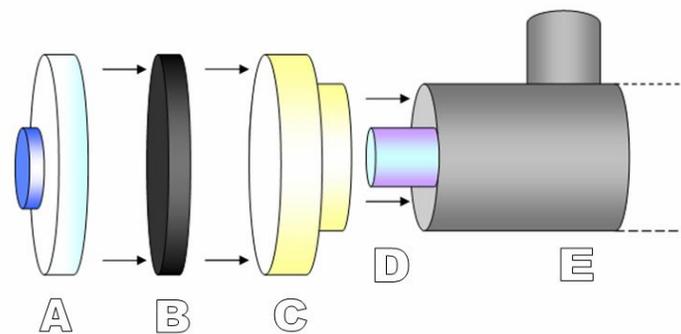


Figura 6.2 Dibujo esquemático de ensamblaje de una de las tapas, ambas son iguales.

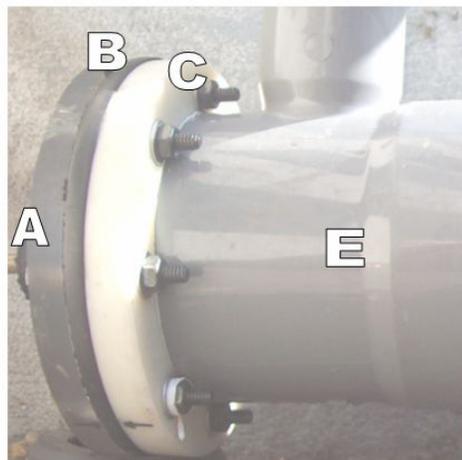


Figura 6.3 Fotografía de una de las tapas del cilindro del reactor ultravioleta.

Según la figura 6.2 las tapas están compuestas por tres piezas: A corresponde a un disco de acrílico con un agujero concéntrico de un Radio apropiado y su respectivo sistema de hilos y gomas de aislamiento, B corresponde a un disco de goma con un agujero concéntrico de un Radio apropiado, C es la pieza de acople con el cilindro E. La lámpara D y su respectivo sistema de cables de alimentación estará acoplada a la tapa compuesta por A, B y C en ambas tapas.

6.1.3 Lámpara UVC.

Este reactor es de PVC de una sola lámpara, es marca Phillips, modelo TUV 15W SLV. Es una Lámpara de descarga de vapor de Hg de baja presión, está diseñada para funcionar como una lámpara fluorescente común, es decir se le puede asociar un sistema de ballast y partidores comunes, sus otras características principales se indican en la Tabla 8.1.

Tabla 6.1 Características Principales Lámpara Philips TUV 15W SLV.

Potencia Eléctrica	15	[watts]
Potencia UVC	4.9	[watts]
Efectividad Potencia UVC	31	%
Voltaje de Lámpara	54	[Volt]
Corriente de Lámpara	0.34	[A]
Contenido de Hg	2	[mg]
Largo de Lámpara	44	[cm]
Largo de Arco	40	[cm]
Diámetro	2,6	[cm]

6.1.4 Montaje Sistema Eléctrico.

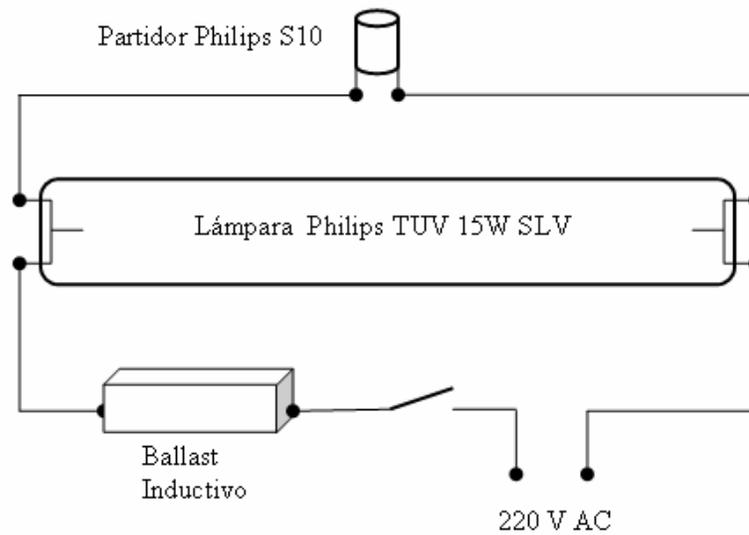


Figura 6.4 Dibujo esquemático de Circuito eléctrico para el encendido de la lámpara.

6.2 Puesta en Marcha.

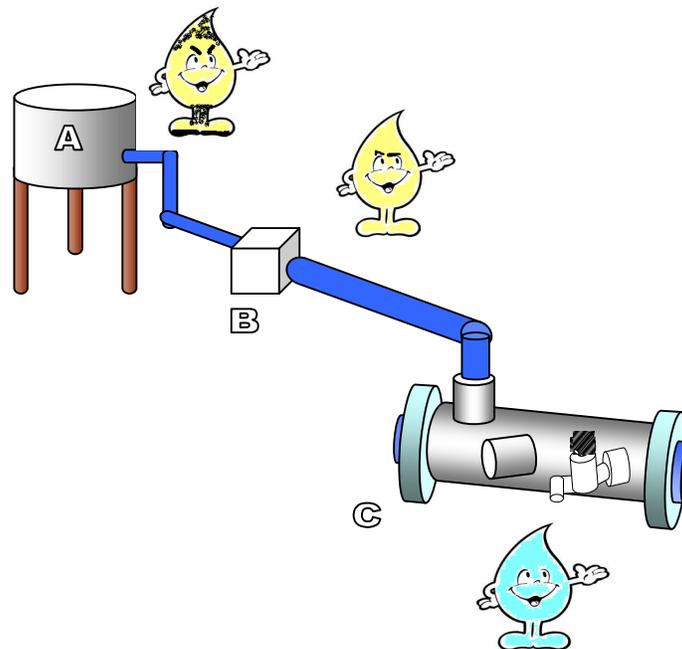


Figura 6.5 Dibujo esquemático de Sistema completo de Desinfección con Luz Ultravioleta, para uso domiciliario rural.



Figura 6.6 Fotografía del reactor ultravioleta Karalakis 1.0 operando, conectado a estanque en altura.



Figura 6.7 Ventana del Reactor Karalakis 1.0 se aprecia en azul la lámpara encendida.



Figura 6.8 Llave de paso del agua al final del proceso de desinfección.

Un sistema completo de desinfección de aguas consiste básicamente en: la fuente del agua en el dibujo se indica con la letra A (estanque, un pozo, etc.), un sistema de filtrado para eliminar cualquier material particulado y lodos B, finalmente el flujo de agua pasa por el Reactor Ultravioleta C, que es donde se elimina todo componente microbiológico del agua ya sea, bacteria, virus, hongos, etc. La figura 6.6 es una fotografía de la puesta en marcha del sistema Karalakis 1.0 esquematizada en la figura 6.5, al sistema se le incluyó una ventana de acrílico debidamente aislada que permite ver a simple vista si la lámpara está o no encendida, figura 6.7. Finalmente, la figura 6.8 muestra la salida del agua por la llave de paso, la cual se puede beber o usar directamente, ya que está desinfectada.

7. Aplicación y Resultados de la simulación.

Se caracterizarán los dos sistemas descritos en el capítulo anterior, según las dimensiones de estos, principalmente el radio interno de las paredes del reactor, el radio de la o las lámparas, el largo del cilindro, la potencia eléctrica de las lámparas en este caso 87 watts con un factor de efectividad UVC de un 30%, para una transmitancia del agua de 95%, es decir, $T = 0,95$. Siguiendo la metodología y ecuaciones presentadas en el capítulo 5, se mostrarán además resultados para equipos de 3 y 4 lámparas para mostrar las capacidades del método de simulación, en todas las simulaciones se usará un valor de transmitancia de 95%, a menos que se indique explícitamente otro valor.

7.1 Reactor lámpara única.

7.1.1 Intensidad en función de la Posición Radial.

La ecuación 5.1 nos permite conocer el comportamiento del valor de la intensidad UVC, según la posición radial en el reactor, considere que estamos estudiando la intensidad en el Plano Transversal Medio descrito en la figura 3.3. La siguiente tabla indica los valores de R y R_l para el reactor Karalakis 1.0 descrito en el capítulo 6, las características de las lámparas están en la Tabla 6.1.

Figura 7.1 Intensidad de Radiación UVC en función de la posición radial dentro del reactor de radio 1.3 [cm].

KARALAKIS 1,0		
R_l	1,3	cm
R	5	cm

La grafica de la figura 7.1 muestra los resultados al evaluar la ecuación 5.1 aplicada al reactor Karalakis 1.0, cuyos valores para R y R_l aparecen en la tabla 7.1. Aplicando la ecuación 5.2 podemos generar una matriz que represente los valores de intensidad en el

Plano Transversal Medio, esta puede ser graficada e identificar los niveles de iso intensidad según su distribución espacial, como lo muestra la figura 7.2.

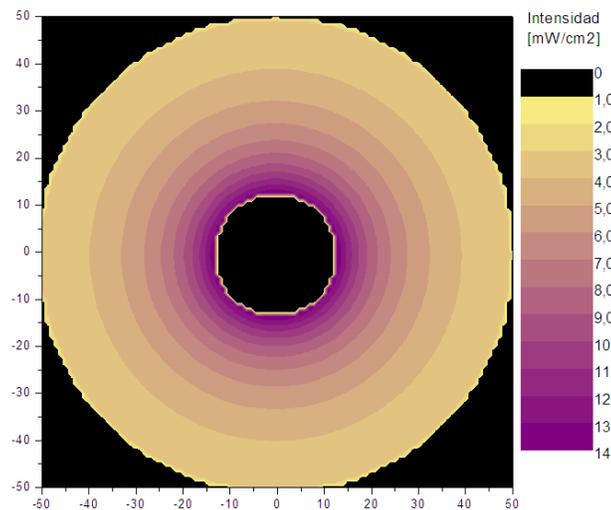


Figura 7.2 Intensidad en el Plano Transversal Medio del Reactor cilíndrico de Lámpara única, se pueden distinguir las zonas de iso intensidad.

7.1.2 Tiempo de Residencia para diferentes valores del Caudal.

La ecuación 5.10 que indica la distribución de velocidades del fluido en el reactor, y la ecuación 5.13 que muestra el tiempo de residencia $t(r)$ en función de la posición radial en el reactor, nos permiten conocer las posiciones para los mínimos y máximos de tiempos de residencia. Es importante conocer la posición donde habría dicho mínimo, ya que es en esta posición radial, donde llegaría la mínima dosis germicida a las partículas de fluido que por allí pasen. Una vez identificada esta posición radial (radio donde el tiempo de residencia es mínimo) podemos definir una zona radial de mayor velocidad de fluido que es lo mismo que decir una zona radial donde las partículas tienen menor tiempo de residencia.

Para nuestro caso, evaluaremos el comportamiento de los tiempos de residencia $t(r)$ y las posiciones radiales de los tiempos de residencia mínimos, para caudales de 1 a 15 [m³/Hr], identificaremos los valores de estos tiempos de residencia mínimos. Podemos graficar el comportamiento de la función tiempo de residencia (Ec. 5.3) para diferentes valores del caudal en el intervalo ya mencionado. En la grafica de la figura 7.3 las líneas rojas son tangentes al Tiempo de Residencia Mínimo, que es indicado por un punto negro, este tiene

siempre la misma posición radial. Se muestran además algunos valores de estos Tiempo de Residencia Mínimo, para tres casos de caudal.

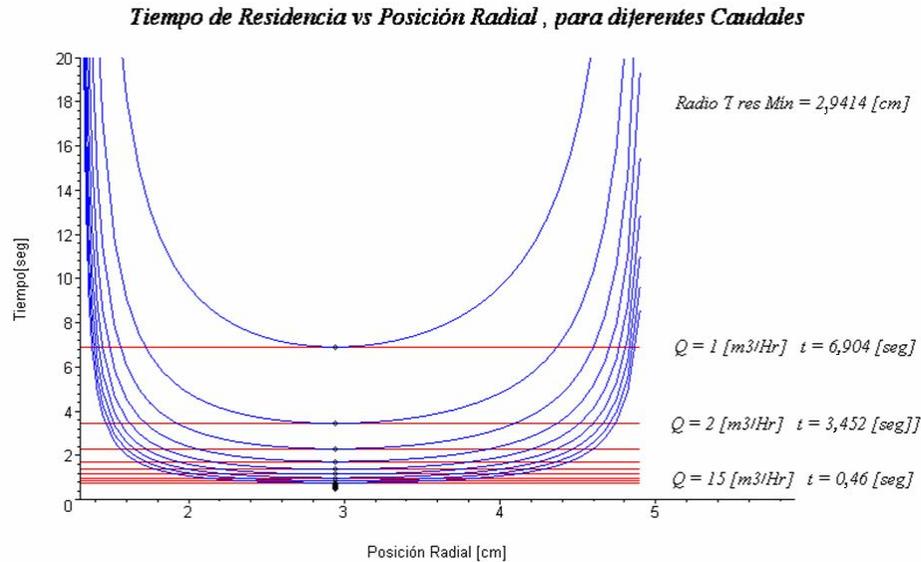


Figura 7.3 Grafica de Tiempo de Residencia $t(r)$ según la posición radial.

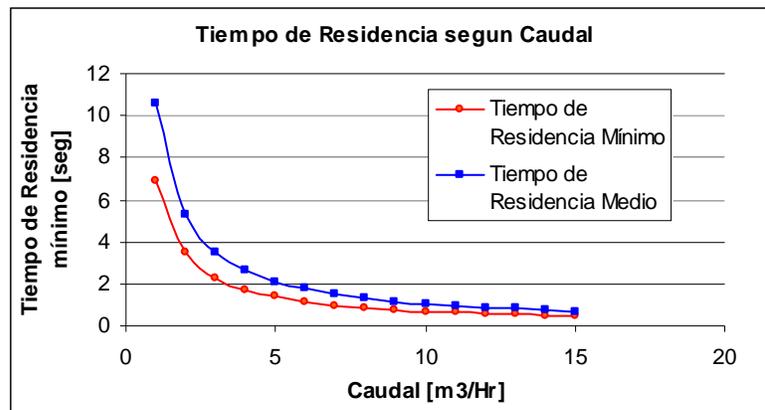


Figura 7.4 Comparación entre Tiempo de Residencia Medio t_{medio} y el Tiempo de Residencia Medio para caudales entre 1 a 15 [m³/Hr].

Con la ecuación 4.6 se definió el Tiempo de Residencia medio t_{medio} , el cual compararemos con el tiempo de residencia mínimo otorgado por el análisis de la ecuación 5.13, esta comparación se realizará para caudales entre 1 a 15 [m³/Hr] y se muestra en la figura 7.4.

7.1.3 Dosis función de la Posición Radial.

La dosis germicida según la posición radial $D(r)$, podemos expresarla considerando la ecuación 5.14. Graficaremos entonces la Dosis Germicida $D(r)$ proporcionada por el reactor según su posición radial, figura 7.5. En la grafica de la figura 7.5 las líneas azules son tangentes al valor de dosis mínima definidas como D_{\min} en la ecuación 5.15, que es indicado por un punto negro, este tiene siempre la misma posición radial. Se muestran además algunos valores de estas dosis mínimas D_{\min} para cuatro casos de caudal. Al igual que en la grafica de la figura 7.3 se calculo el valor para caudales de 1 a 15 m^3/Hr . Con la ecuación 4.10 podemos determinar la Dosis Germicida Promedio para diferentes valores del Caudal. Compararemos la Dosis Promedio y la Dosis mínima para diferentes Caudales entre 1 y 15 $[\text{m}^3/\text{Hr}]$, esta comparación se aprecia en la grafica de la figura 7.6.

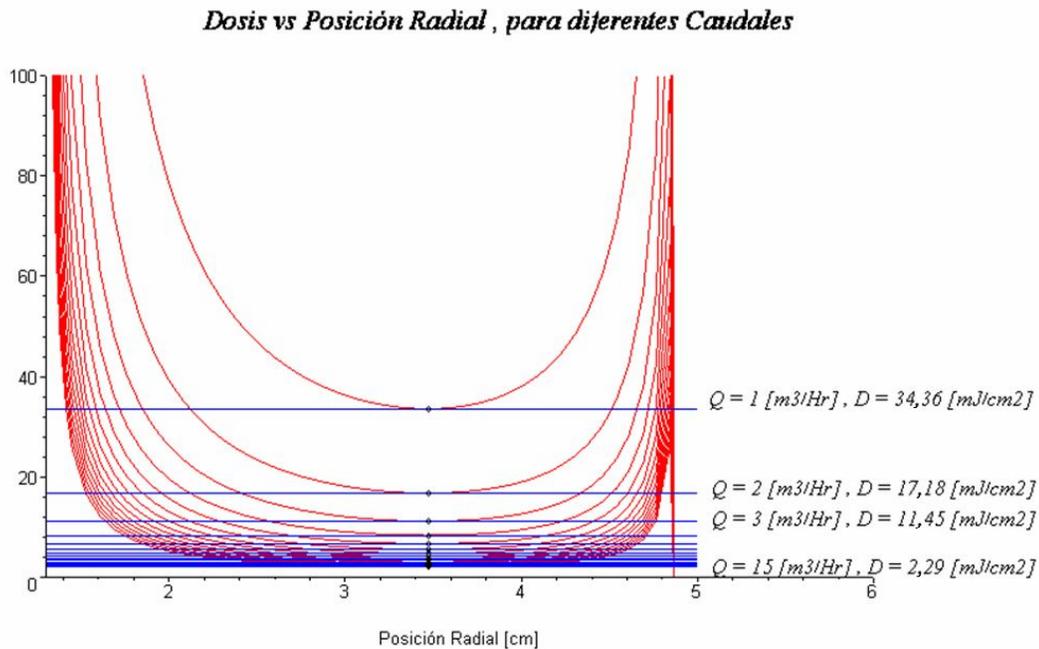


Figura 7.5 Grafica de Dosis en función de la posición radial $D(r)$, para caudales de 1 a 15 $[\text{m}^3/\text{Hr}]$.

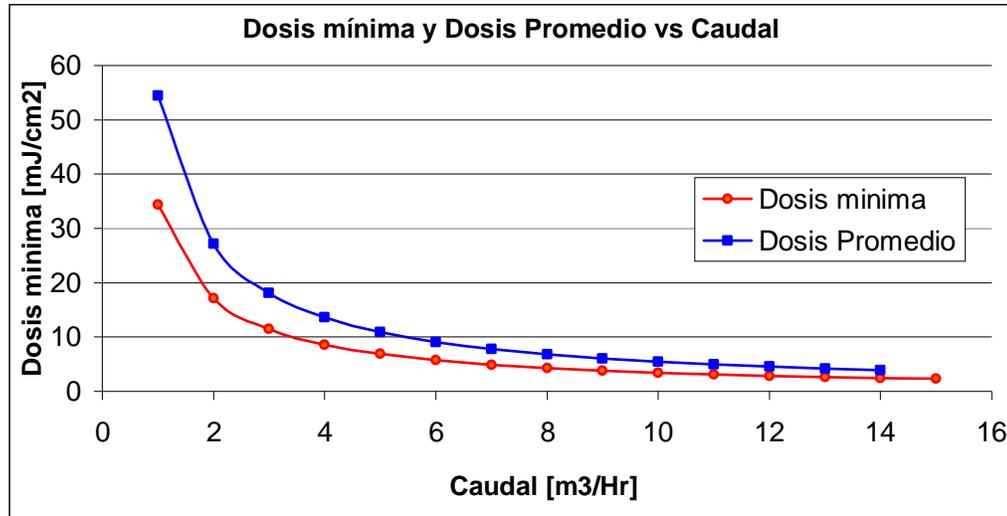


Figura 7.6 Comparación entre Tiempo de Residencia Medio t_{medio} y el Tiempo de Residencia promedio para caudales entre 1 a 15 [m³/Hr].

7.1.4 Dosis en función de la transmitancia y de la posición Radial.

La transmitancia del agua también es relevante, en general estos sistemas trabajan con valores entre 80% y 98 %, es decir, $T = 0,8$ y $T = 0,98$. Podemos graficar entonces la función dosis en función de la posición radial $D(r)$, para diferentes valores de la transmitancia T . Es posible también identificar los puntos de dosis mínima, para diferentes valores de T , se grafica conservando un valor constante de Caudal, en este caso 1 [m³/Hr], figura 7.7.

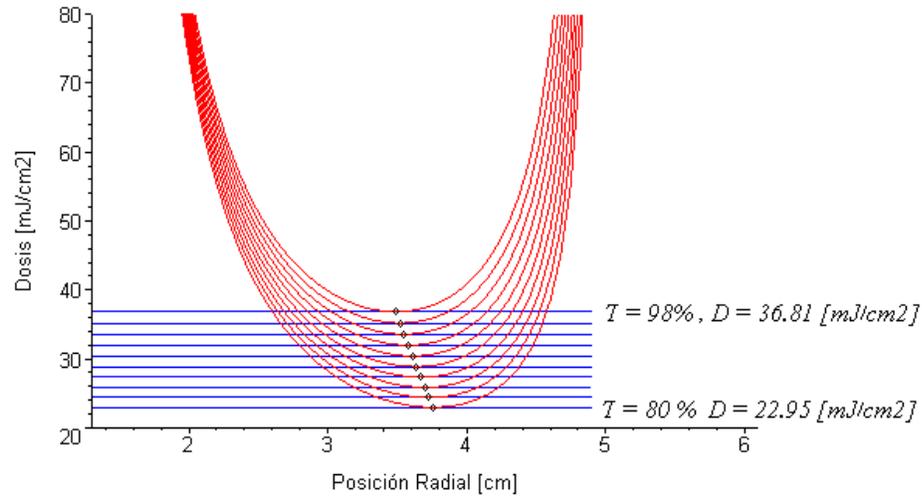


Figura 7.7 Dosis en función de la posición radial, para valores de transmitancia entre un 80% y 98%.

En la figura 7.7 las líneas azules son tangentes al punto mínimo de dosis, que es representado por los correspondientes círculos negros, se aprecia que la posición radial de la dosis mínima no es la misma para diferentes transmitancias. Se muestran además los valores de dosis mínima para dos valores de transmitancia, En la tabla 7.1 se aprecia que el valor de χ llamado Factor de Rango en la sección 5.1.4 varía según el valor de transmitancia, lo que también podemos ver en la gráfica correspondiente, figura 7.2.

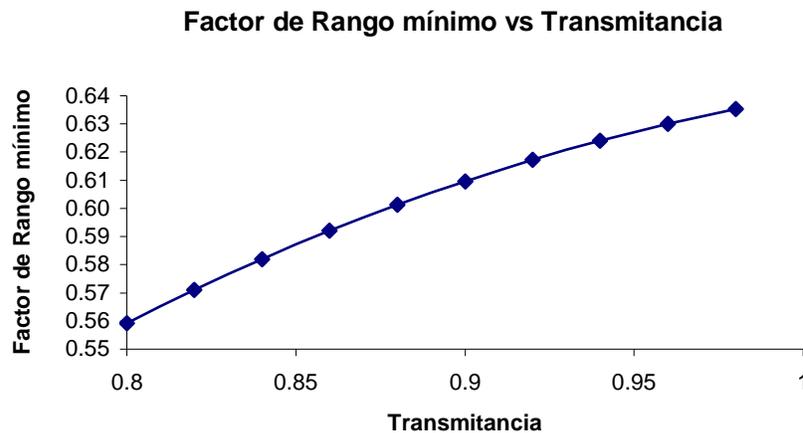


Figura 7.8, Dependencia del Factor de rango mínimo χ en función de la transmitancia, para transmitancias entre 0.9 y 0.98.

Tabla 7.1 Comparación Dosis mínima y Dosis promedio para diferentes valores de Transmitancia, entre un 80% y 98%.

Transmitancia	Dosis min mJ/cm ²	Dosis prom mJ/cm ²	$\chi = D_{\min} / D_{\text{Prom}}$
0,8	22,95	41,04	0,56
0,82	24,38	42,69	0,57
0,84	25,84	44,40	0,58
0,86	27,33	46,16	0,59
0,88	28,85	47,98	0,60
0,9	30,39	49,85	0,61
0,92	31,96	51,79	0,62
0,94	33,56	53,78	0,62
0,96	35,18	55,83	0,63
0,98	36,81	57,95	0,64

7.1.5 Distribución espacial de la Dosis.

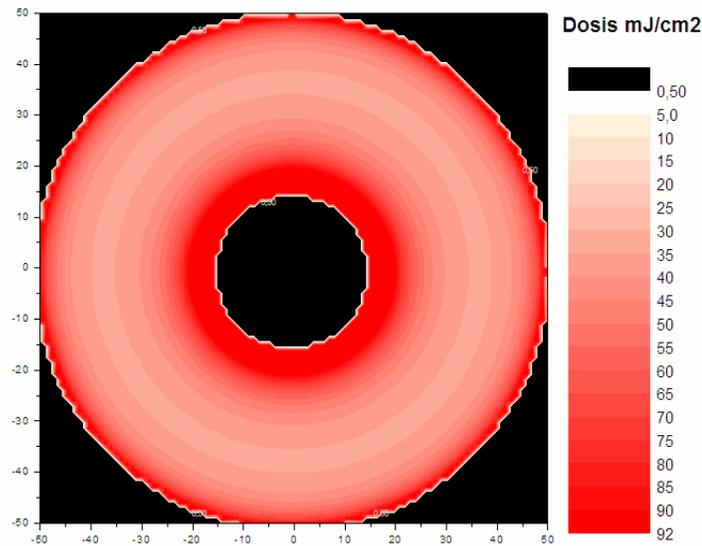


Figura 7.9 Distribución Espacial de la Dosis. Las regiones mas rojas indican un valor mas alto de Dosis, la dosis mínima se encuentra en un radio de valor $r = 3.53$ cm.

La figura 7.9 muestra la distribución espacial en el Plano Transversal Medio del reactor, calculando el valor de dosis en cada punto radial, considerando la intensidad en ese punto $I(r)$ y el tiempo de residencia allí $t(r)$ según la ecuación 5.14. Se aprecia que en las

paredes del reactor la dosis tiene un alto valor, esto es debido a la viscosidad del agua ya que por estar en contacto con la pared su velocidad tiende a cero, es decir, el tiempo de residencia es muy alto, lo que compensa la pérdida de intensidad debido a la distancia a la fuente de luz UVC.

7.1.6 Factor de Rango mínimo para la Dosis.

En el caso práctico se simplifica el cálculo de la Dosis germicida de un sistema, determinando la Dosis Promedio según la ecuación 4.9, podemos entonces obtener un valor para el Rango de Dosis mínima proporcionada por el equipo a partir del cálculo de la dosis promedio según la ecuación 5.16, $D_{\min} = \chi D_{\text{prom}}$.

Para el caso de la presente implementación del modelo donde la transmitancia del agua es de 95 %, es decir $T = 0.95$, el valor de χ es: $\chi = 0.63$.

7.1.7 Histograma para valores de Dosis.

Con todos los puntos espaciales en el Plano transversal medio en los cuales calculamos el valor de dosis en dichos puntos, que en este caso son 10^3 , podemos realizar un histograma, el cual nos mostrará la distribución estadística de los valores de Dosis. Con esto podremos saber cual es el valor de dosis que más veces se repite en los puntos espaciales calculados, es decir, que valor de dosis recibe la mayoría de las partículas de agua.

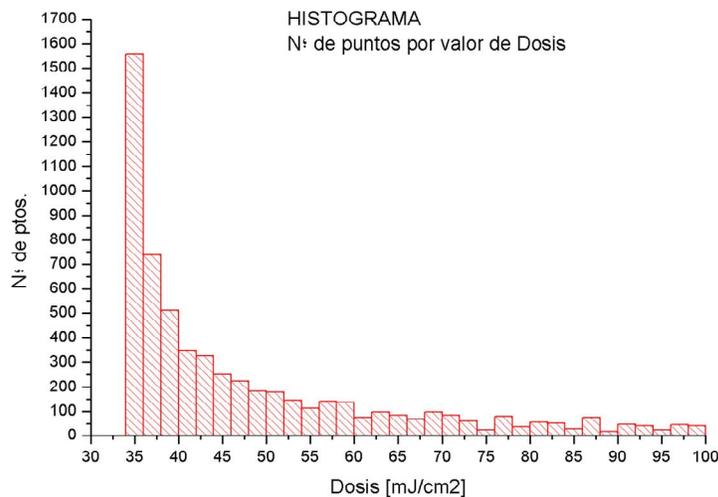


Figura 7.10 Histograma de Numero de Puntos espaciales para los valores de Dosis en el Reactor.

De la figura 7.10 podemos decir de su grafica que la mayor cantidad de puntos espaciales en el Plano Transversal Medio se encuentra entre 33 y 36 [mJ/cm²], que es donde se encuentra el valor de la dosis mínima según la simulación, con lo que podemos definir un sistema y su capacidad germicida según el valor de la dosis mínima.

7.1.8 Contribución de la reflexión en las paredes internas.

Realizaremos el calculo suponiendo que el reactor en sus paredes internas es de un material que refleja la radiación ultravioleta en un 25% de la radiación incidente. El calculo de Dosis se realizará suponiendo un caudal de $Q = 1$ [m³/Hr].

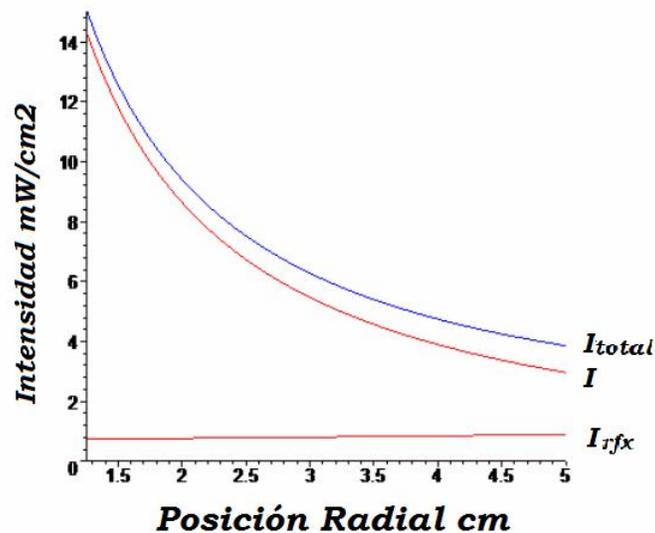


Figura 7.11 Distribución radial de la intensidad en el plano transversal medio, se indican, la curva de Intensidad que sale de la lámpara I , la curva de intensidad que rebota en las paredes I_{rfx} y la intensidad total de la suma de ambas curvas $I_{Total} = I + I_{rfx}$.

En la figura 7.12 se aprecia la diferencia entre sistemas con y sin reflexión, lo mismo en la figura 7.13 pero en este caso para distribución espacial de la dosis, los resultados numéricos para los valores de dosis e intensidades en ambos casos se aprecian en la tabla 7.1

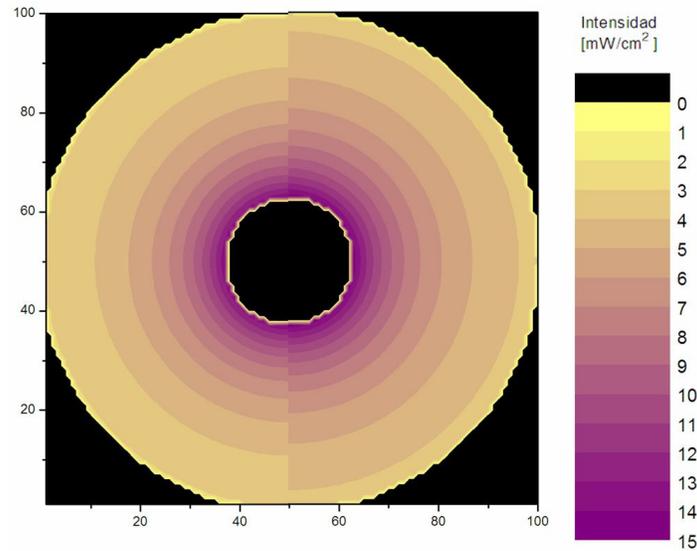


Figura 7.12, Distribución espacial de intensidades en el Plano transversal medio, la mitad izquierda tiene menos intensidad que la mitad derecha (mas claro menor intensidad), esto es porque la mitad derecha incluye la contribución por intensidad reflejada, la escala está en unidades de mW/cm^2 .

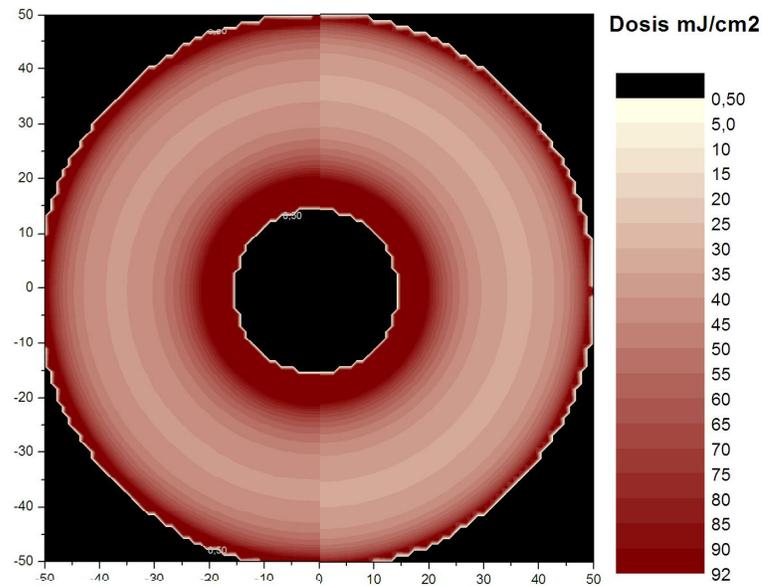


Figura 7.13, Grafico que representa la distribución espacial de la dosis en el Plano transversal medio, se aprecia que la mitad izquierda tiene menos dosis que la mitad derecha, esto es porque la mitad derecha incluye en la simulación la contribución por intensidad reflejada, la escala de colores está en unidades de mJ/cm^2 .

Tabla 7.2 Diferencias para el valor de Dosis mínima según la ecuación 5.17 para casos con y sin reflexión interna.

	Dosis prom mJ/cm ²	Dosis min. mJ/cm ²
sin Ref	54,80	34,36
con Ref	65,94	39,52
% Aumento	20,33	15,00

La mayor cantidad de puntos espaciales en el Plano Transversal Medio se encuentra en el intervalo 38 y 42 [mJ/cm²], que es donde se encuentra el valor de la dosis mínima según el método analítico (ecuación 5.17), con lo que podemos definir un sistema y su capacidad germicida según el valor de la dosis mínima.

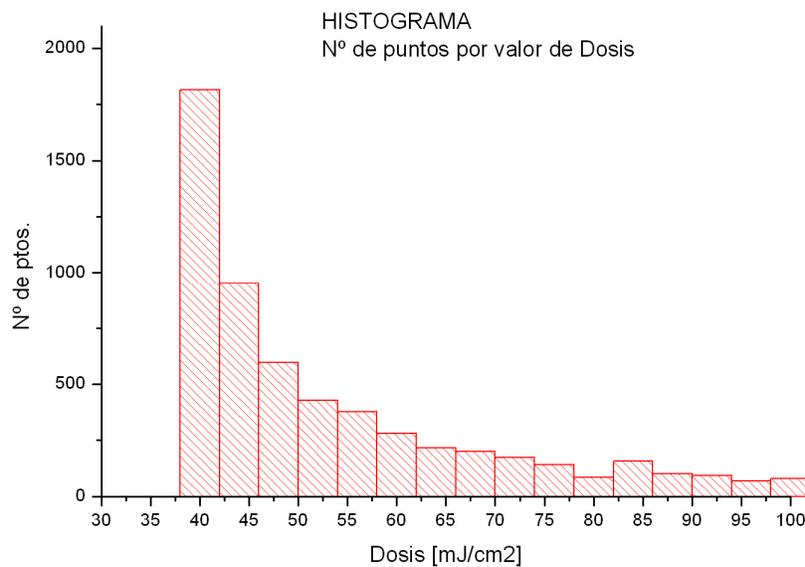


Figura 7.14 Histograma de Numero de Puntos espaciales para los valores de Dosis en el Reactor.

7.1.9 Resultados para sistema Karalakis 1.0.

En este caso no se considera el aporte de reflexión, ya que el reactor que estamos modelando Karalakis 1.0 y su superficie interna no es reflectante, en general se considera para reactores de acero inoxidable u otros materiales con un coeficiente de reflexión considerable.

Tabla 7.3 Resultados de valores para Sistema de Lámpara única KARALAKIS 1.0, para diferentes valores de Caudal

	Caudal m ³ /Hr			
	1	5	10	15
Intensidad Promedio mW/cm ²	5.2	5.2	5.2	5.2
Tiempo de Residencia Medio seg.	10.5	2.1	1.1	0.7
Dosis Promedio mJ/cm ²	54.8	10.9	5.7	3.6
Tempo de Residencia mínimo seg.	6.9	1.4	0.7	0.5
Dosis Mínima mJ/cm ²	34.4	6.8	3.4	2.3

Tabla 7.4 Resultados de valores de Dosis nominal mínima para Sistema de Lámpara única KARALAKIS 1.0, para diferentes valores de Caudal y de transmitancia.

KARALAKIS 1.0				
Caudal m ³ /Hr	1	5	10	15
% Transmitancia	Dosis mJ/cm ²			
98	36.81	7.36	3.68	2.45
97	35.99	7.2	3.6	2.4
95	34.36	6.87	3.44	2.29
92	31.96	6.39	3.2	2.13
90	30.92	6.08	3.03	2.03

7.2 Reactores Multilámpara.

7.2.1 Distribución espacial de la intensidad.

Con la ecuación 5.27 podemos determinar una matriz que nos dé los valores de intensidad en el plano transversal medio para equipos multilámpara, conociendo entre otros valores ya mencionados las coordenadas de las lámparas, considere que estamos trabajando con una transmitancia de 95% es decir $T = 0.95$. Se Presentan dos gráficos de distribución de intensidad, el primero para un equipo de tres lámparas y el segundo dos lámparas ambos de diámetro 15 cm.

Las siguientes figuras grafican la matriz de intensidades para un sistema de tres y dos lámparas, los valores del eje z representan el valor de la intensidad en función de su posición en el Plano Transversal Medio, las escala de colores corresponde a blanco para valores de alta intensidad y violeta para baja intensidad, se incluye además una representación en función de la escala de colores para representar la intensidad en el plano.

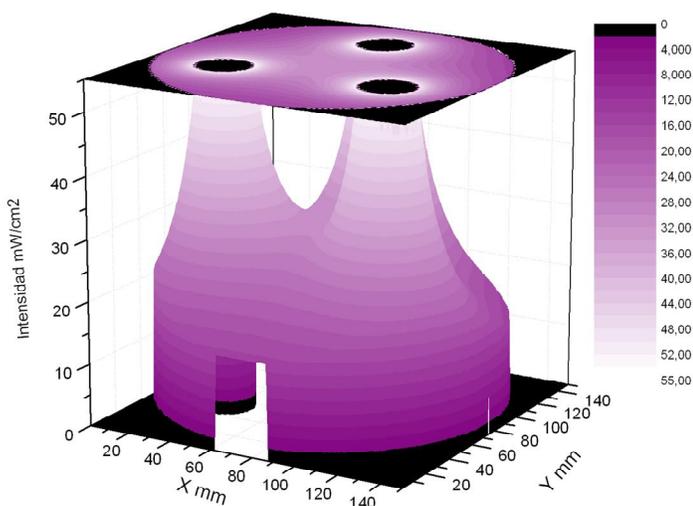


Figura 7.15, Gráfico para un sistema de tres lámparas.

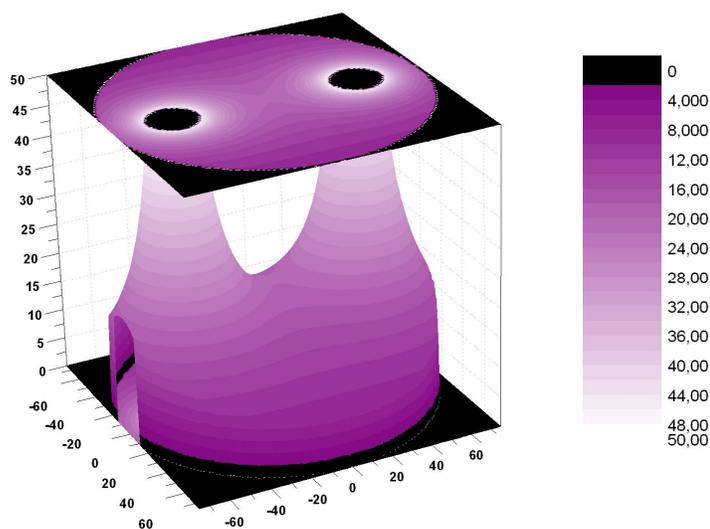


Figura 7.16, Gráfico para un sistema de dos lámparas.

7.2.2 Contribución de la Reflexión en las paredes internas.

Aplicando la ecuación 5.20, 5.24 y 5.25 para la radiación en el Plano Transversal Medio de un sistema multilámparas por ejemplo uno de 2 lámparas, tenemos la siguiente distribución de intensidades considerando en un caso sólo la radiación emitida por las lámparas y en el otro añadiendo el aporte a la intensidad total debido a la reflexión.

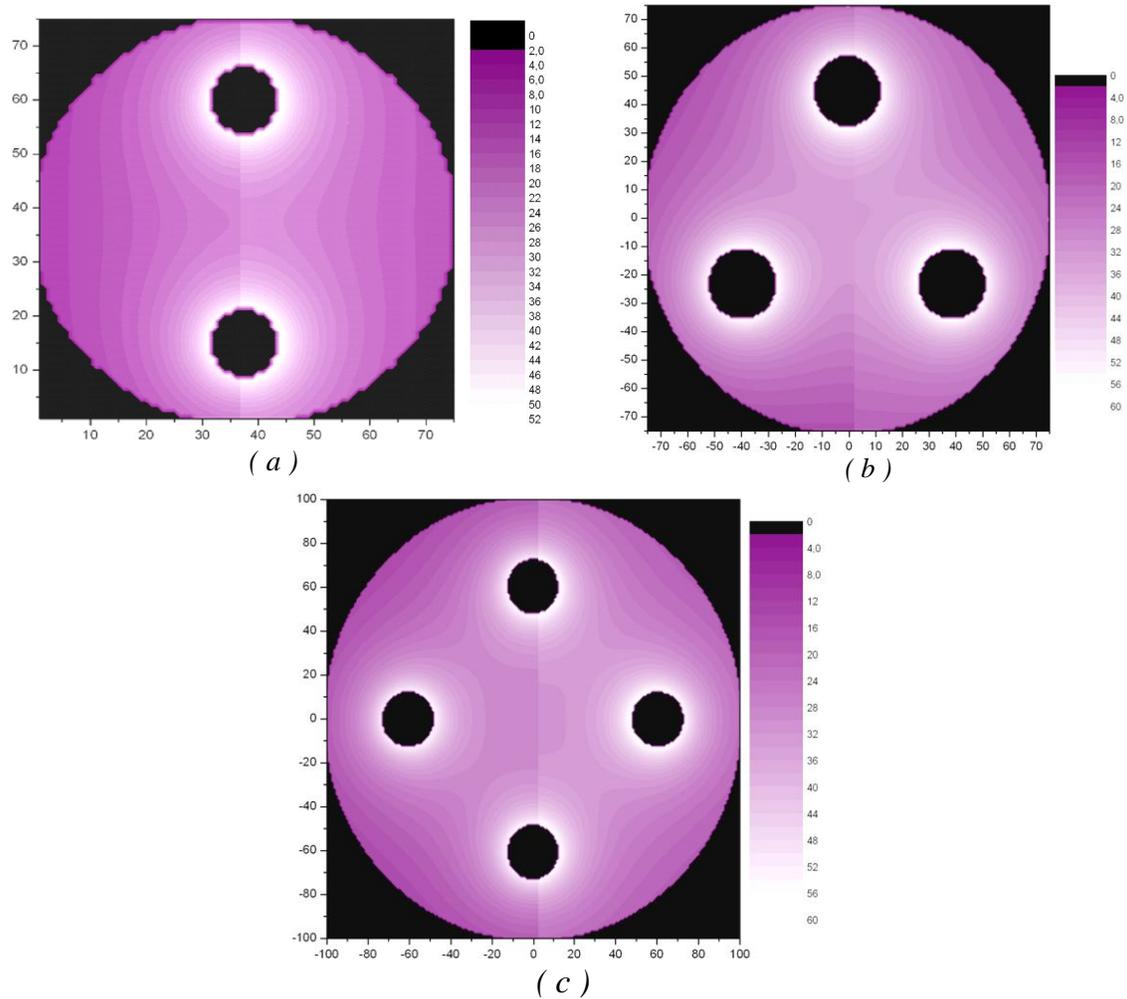


Figura 17, Comparación de la distribución espacial de la intensidad UVC en el caso en que no se considera la reflexión en las paredes internas (mitad izquierda) y en el caso en que si se considera la reflexión (mitad derecha), *a* equipo de 2 lámparas, *b* equipo de 3 lámparas, *c* equipo de 4 lámparas.

El porcentaje de aporte a la dosis promedio en el reactor según el equipo y su número de lámparas se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 7.4 Resultados para el Cálculo de la intensidad Promedio en el reactor para los casos con y sin aporte de la reflexión.

	I_{prom} mW/cm ² sin Reflexión	I_{prom} mW/cm ² con Reflexión	% Aporte Reflexión
1 lámpara	34,36	39,52	15,02
2 lámparas	18,36	21,54	17,31
3 lámparas	27,87	32,24	15,68
4 lámparas	27,15	31,24	15,06
Aporte Promedio de la Reflexión			15,77

7.2.3 Dosis Germicida para sistema marca Hidro-UV modelo HO-UV287.

Este tipo de reactores se caracterizará por una Dosis nominal que será la Dosis mínima que podría proporcionar el reactor ecuación 5.17, el modelo expuesto en el capítulo 5 nos permite la implementación de las ecuaciones con Algoritmo Computacional, el cual permite obtener además los resultados para la Dosis Promedio ecuaciones 5.28 y 4.10, la Intensidad Promedio en el Sistema ecuación 5.28, permite conocer también los tiempos de Residencia Promedio según el Caudal ecuación 4.6, todo lo anterior para un determinado valor de Transmitancia, que en este caso será de un 95% es decir para un $T = 0.95$ y considerando un aporte de la reflexión interna de un 15% al valor de la intensidad promedio en reactor, además de considerar un valor del Coeficiente de Rango mínimo de $\chi = 0.63$ como se muestra en 7.1.6.

Podemos elaborar una tabla que nos ayude a conocer según el caudal y la transmitancia la dosis nominal del equipo marca Hidro-UV modelo HO-UV287, ver tabla 7.5

Tabla 7.5 Dosis nominal de equipo marca Hidro-UV modelo HO-UV287, para diferentes caudales y transmitancias.

HO-UV287 HidroUV				
Caudal m3/Hr	5	10	20	30
% Transmitancia	Dosis		mJ/cm2	
98	160,78	80,39	40,19	26,8
97	155,42	77,1	38,86	25,9
95	145,39	72,7	36,35	24,23
92	131,55	65,94	32,97	21,98
90	123,78	61,9	30,95	20,63

8. Medición de intensidad de radiación UVC en los sistemas.

8.1 Sensores a utilizar.

8.1.1 Detector UVC desarrollado en el Laboratorio de Óptica y Semiconductores Usach (SLOSC).

Se ha desarrollado un equipo basado en un fotodiodo de silicio sensible a la radiación ultravioleta. El principio básico de un fotodiodo es que entrega pequeñas cantidades de corriente en función de la cantidad de radiación que incide en este. Debido a la alta sensibilidad de estos sensores a otros rangos del espectro, sobre todo el visible e infrarrojo, este tiene acoplado un filtro óptico, que permitirá que el fotodiodo entregue corriente solo cuando incida la radiación con la longitud de onda requerida, que en este caso son 254 nm. Considerando el respectivo sistema electrónico asociado a la medición podremos asociar la corriente a un valor de intensidad en unidades de $[mW/cm^2]$, comparando con un sensor ya calibrado por el fabricante.

El circuito análogo para la medición de radiación consiste en un regulador de voltaje, y un amplificador operacional para el detector. El circuito se describe en la Figura 8.1.

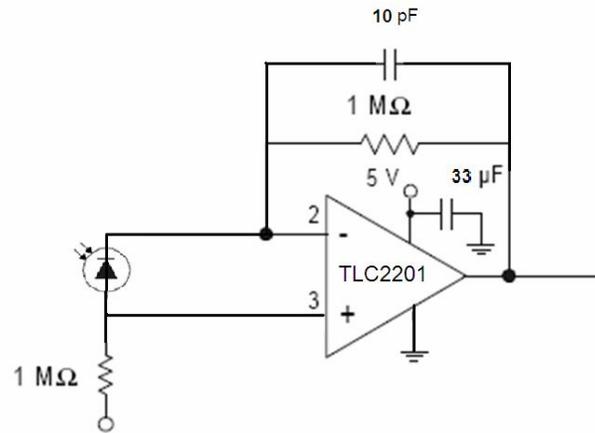


Figura 8.1 Diagrama de Circuito Asociado a foto diodo receptor de la Radiación UVC, el amplificador operacional TL071 debe ir con su respectivo regulador de voltaje.

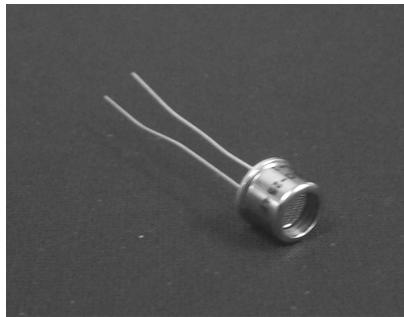


Figura 8.2 Fotodiodo con Filtro UVC.



Figura 8.3 Detector UVC, se aprecia el cabezal donde se ubica el fotodiodo, la caja que contiene el sistema electrónico y la pantalla que indica el valor de radiación según su calibración.

8.1.2 Detector UVC marca SGLux modelo SENSOR MONITOR 5.0 .

El "Sensor Monitor 5,0" es un módulo de medición y control para el monitoreo y la automatización de los procesos de irradiación UVC. Muestra la información de radiación en el fotodiodo, a través de un display digital y por medio de puerto de comunicación RS232 (Puerto Serie) envía datos de la medición cada segundo, permitiendo registrarlos, para hacer un monitoreo temporal del comportamiento de la radiación. Permite además realizar mediciones en Reactores Ultravioleta en Funcionamiento, es decir, puede medir radiación en el agua en tratamiento.



Figura 8.4 Fotodiodo detector de UVC y sistema de encapsulado (Cabezal) para medición en un Reactor Ultravioleta con agua.

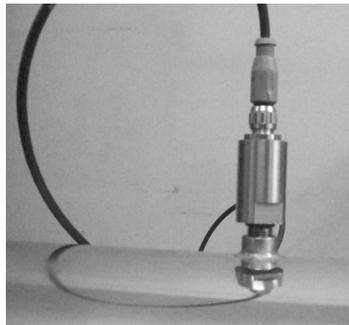


Figura 8.5 Cabezal del Detector UVC instalado en Reactor Ultravioleta Hidro-UV modelo HO-UV287.

Es necesario desarrollar un software que permita captar los datos enviados al puerto Serie y generar un archivo de texto con estos, para su posterior análisis. Se desarrollo un programa que cumple dicho objetivo, figura 8.6.



Figura 8.6 Ventana de ejecución del programa desarrollado para captar los datos enviados al puerto Serie por el sistema SENSOR MONITOR 5.0.

8.2 Montajes Experimentales para la medición de radiación UVC.

8.2.1 Montaje Sensor marca SgLux.

El modelo permite obtener un valor teórico de la intensidad en diferentes puntos del Plano Transversal Medio del reactor, para el caso del equipo Hidro-UV modelo HO-UV287, mediremos en el mismo sistema ya que su diseño incluye una ventana donde instalar el Sensor Monitor 5.0 según indica la figura 8.5, esta ventana coincide con la ubicación del Plano Transversal Medio. Las mediciones se realizaron procediendo de la siguiente manera: El modelo simulará la intensidad en el reactor HO-UV287 pero con una sola lámpara, serán dos simulaciones una para cada posición de la lámpara, según indica la figura 8.6.

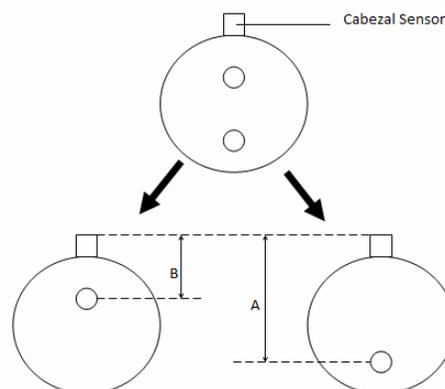


Figura 8.7, El equipo HO-UV287 puede usarse en dos configuraciones diferentes para efectos de validación de la medición y simulación.

El equipo Hidro-UV HO-UV287 funciona con lámparas de Hg de baja presión, en este caso mediremos con la lámpara marca Light Tech de 87 watts de potencia eléctrica y un 30% de efectividad UVC en la potencia según el fabricante. Se activa el sensor y la captura de datos en el computador para los primeros minutos luego de encendida.

5.2.2 Montaje Sensor SLOSC.

Debido a que el equipo Karalakis 1.0 no cuenta con un sistema para instalar un sensor que mida la radiación en las paredes internas, mediremos la radiación emitida por la lámpara encendiéndola fuera del cilindro del reactor, el diseño permite desmontar la lámpara del sistema, tal como lo muestra la Figura 8.8. Se ubica el sensor a la misma distancia R que se encuentra la pared interna del reactor con la superficie de la lámpara, tal como cuando el reactor ultravioleta esta funcionando.

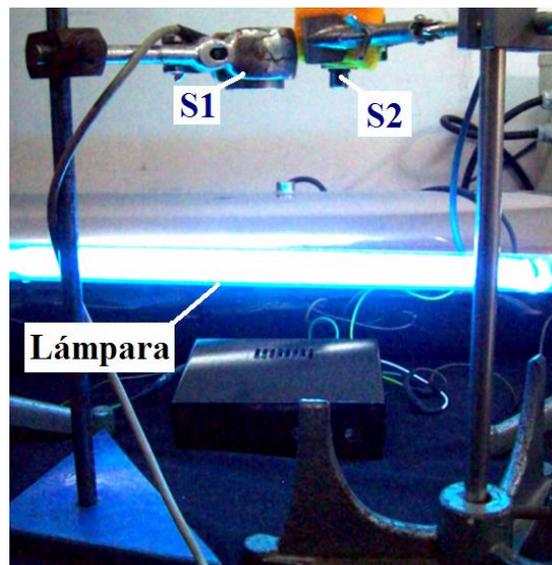


Figura 8.8 Montaje de Sensor Monitor 5.0 marca SgLux y Sensor SLOSC, para su respectiva calibración, Medición de la lámpara Phillips TUV 15W SLV.

8.3 Resultados Mediciones.

8.3.1 Equipo marca Hidro-UV modelo HO-UV287, sensor marca SgLux modelo Sensor Monitor 5.0.

Debido a la característica de la ventana en donde se ubica el sensor, deberemos considerar entre otros factores geométricos del diseño, sus magnitudes, el grosor de la lamina de acero inoxidable que constituye al cilindro del reactor y la real posición en la que queda el fotodiodo respecto del borde de la zona interior del reactor en donde esta el fluido y se realiza la simulación computacional con el modelo expuesto^[17].

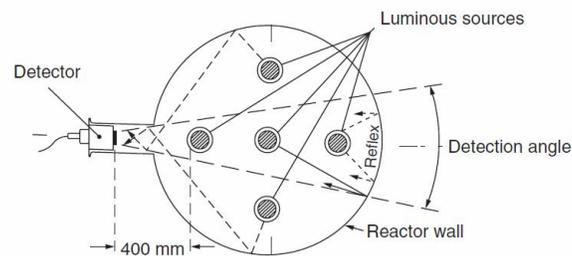


Figura 8.9 Esquema típico de localización de un detector UVC en un Reactor cilíndrico.

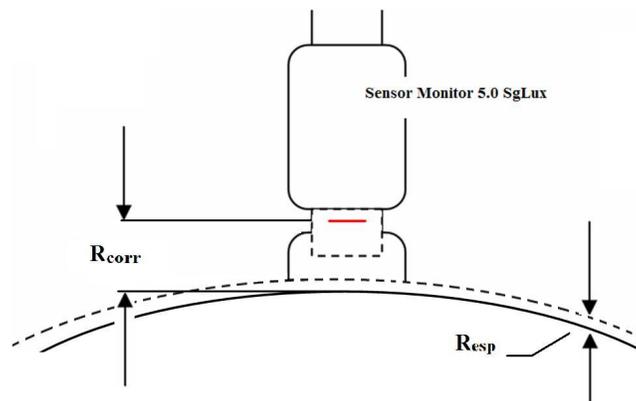


Figura 8.10 Se indican las consideraciones geométricas para la corrección en la medición de intensidad.

El factor de corrección R_{corr} correspondiente a cada diseño debe ser considerado para obtener una medida real de la intensidad en el borde. En nuestro caso la simulación determina la radiación en el interior del reactor, el equipo a verificar tiene las correcciones

según la figura 8.10, donde se considera la distancia del fotodiodo al borde del interior del reactor R_{corr} y además el espesor del material del que esta compuesta la pared del reactor R_{esp} , aplicadas en la ecuación 8.1.

$$I_{corr} = I_{Simulacion} \frac{10^{-aR_{corr}}}{R_{corr}} \quad (8.1)$$

La verificación de la valides en la medición se realiza comparando el valor de la intensidad medida experimentalmente I_{Sensor} con el valor obtenido en la simulación con su respectiva corrección I_{corr} , esto se aprecia claramente en la figura 8.13.

El grafico de la figura 8.12 indica el comportamiento de la lámpara desde que es encendida, se aprecia que la intensidad aumenta rápidamente, esto es debido al sistema de ballast y partidores asociados al circuito, para luego decaer y alcanzar el equilibrio análogamente a un sistema críticamente amortiguado hasta que llega al equilibrio y permanece marcando 1.25 mW/cm^2 de intensidad en el borde del reactor para la lámpara en posición A. En el grafico de la figura 8.13 que indica el comportamiento de la lámpara desde que es encendida, se aprecia que la intensidad permanece marcando 6.75 mW/cm^2 de intensidad en el borde del reactor para la lámpara en posición B.

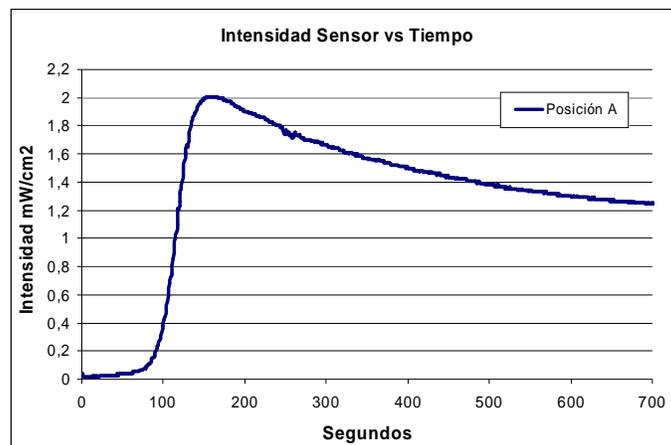


Figura 8.12 Comportamiento temporal desde el encendido de lámparas de 87 watts, posición A.

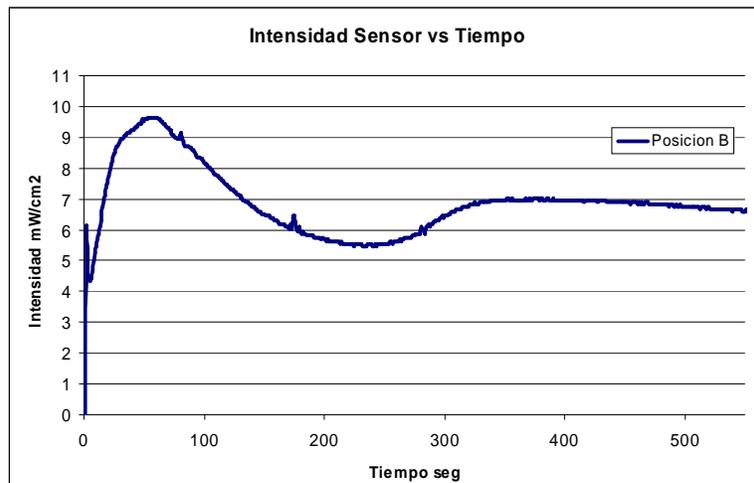


Figura 8.13 Comportamiento temporal desde el encendido de lámparas de 87 watts, posición B.

Según la matriz resultante de la simulación computacional, la Grafica de la figura 8.14 permite identificar el valor de la intensidad en el sensor según la Posición de la lámpara A o B de acuerdo a la figura 8.7, además muestra la comparación entre los valores de la simulación con los de la medición.

Figura 8.14 Distribución espacial de Intensidades para montaje de medición de intensidad UVC con Sensor Monitor 5.0.

	Intensidad Simulacion mW/cm ²	Intensidad Sensor mW/cm ²
Posición A	1,37	1,25
Posición B	6,54	6,75

8.3.2 Equipo Karalakis 1.0, lámpara Phillips TUV 15W SLV , sensor SLOSC.

El detector descrito en la figura 8.2 puede ser conectado a un convertidor análogo digital con el objetivo de recolectar los valores de intensidad emitida por la lámpara en función del tiempo, desde el proceso de encendido hasta que alcance una emisión de intensidad constante. En este caso se utilizara el conversor análogo digital MCP3208, para comunicarnos con el computador a través del puerto paralelo DB25H, estos datos serán recogidos y graficados por un software desarrollado en Visual Basic en el Laboratorio de Óptica y Semiconductores Usach.

El grafico de la figura 8.15 indica el comportamiento de la lámpara desde que es encendida, se aprecia que la intensidad aumenta rápidamente, esto es debido al sistema de ballast y partidores asociados al circuito, para luego permanecer marcando 1.25 mW/cm^2 de intensidad constante.

Tabla 8.2 Comparaciones de valore intensidad en caso de la simulación y en caso de la medición experimental.

	Intensidad Simulación	Intensidad Sensor
mW/cm^2	0,92	1,24

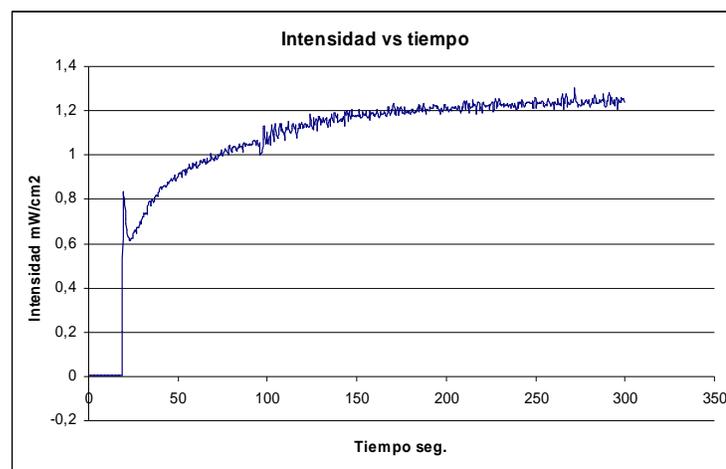


Figura 8.15, Comportamiento temporal desde el encendido de lámparas de 15 Watts, posición B.

8.3.3 Lámpara 87 watts marca Light – Tech, comparación con y sin funda de cuarzo.

Con el objetivo de conocer empíricamente cuanto afecta la funda de cuarzo a la cantidad de radiación emitida, en el equipo Hidro – UV modelo HO-UV287, mediremos la intensidad de radiación emitida por la lámpara instalada afuera del reactor, para una distancia constante de igual manera como se indica en la figura 8.8

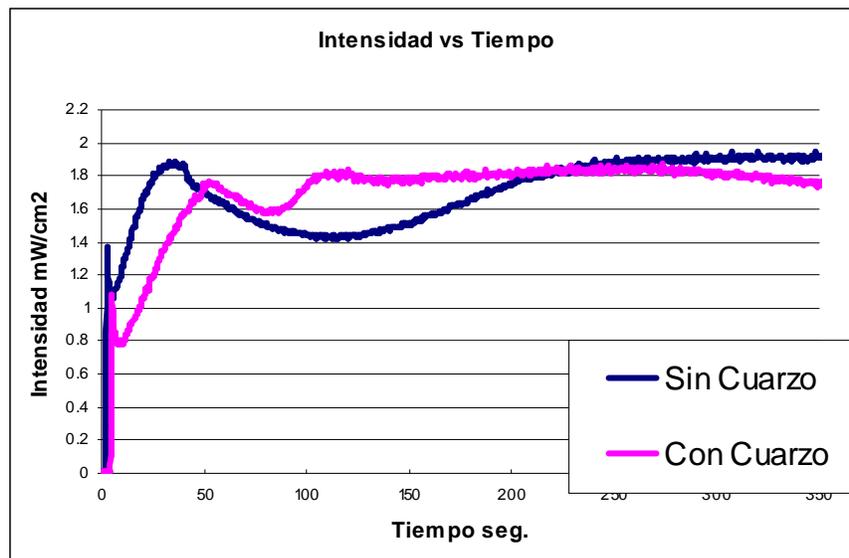


Figura 8.16 Grafica de Intensidad en el Sensor vs tiempo, desde que se enciende la lámpara hasta que alcanza el equilibrio, medido con y sin funda de cuarzo.

El gráfico de la figura 8.16 indica el comportamiento de la lámpara desde que es encendida, en dos casos, con la lámpara sin la envoltura de cuarzo, y el segundo caso con dicha envoltura, se aprecia que la intensidad aumenta más rápidamente en el caso en que hay funda de cuarzo, esto es debido a que gracias a la funda, la temperatura óptima de irradiación de la lámpara se alcanza más rápido. Lo importante es que se verifica que el cuarzo absorbe sólo alrededor de un 10% de la radiación UVC, según la gráfica de la figura 4.7.

Los valores de la comparación de ambos casos con y sin cuarzo se aprecian en la siguiente tabla.

Tabla 8.3 Comparación intensidad de la lámpara con y sin cuarzo.

	Sin Cuarzo	Con Cuarzo	Transmitancia Cuarzo
Intensidad mW/cm ²	1,9	1,75	92,11

9. Análisis de Resultados.

9.1 Cinética de inactivación microbiana.

Existen estudios que nos muestran el comportamiento de la población bacteriana al ser sometida a la dosis UVC conocidas en unidades de mJ/cm², estos análisis microbiológicos han sido realizados específicamente para procesos de desinfección con luz ultravioleta, Las tablas de los valores de Dosis requerida según microorganismo esta disponibles en el Anexo I..

En general la cinética de inactivación microbiana se puede modelar con la Ley de Chick

$$N = N_0 10^{-KD} \quad (9.10)$$

Donde N_0 es la concentración inicial de microbios previa a la aplicación de UV, N es el número de microbios que restan después de la exposición a la luz UV, D es la Dosis germicida, y K es la constante del ritmo de inactivación microbiana. Se observan a menudo desviaciones leves de los datos a la ley de Chick y se les llaman “con cola” y con hombro y cola” según indica la figura 9.1. La reducción de 1 log(N/N₀) corresponde a que un 90% de la población microbiana fue eliminada, 2 log(N/N₀) significan un 99% de reducción y 3 log(N/N₀) un 99.9%. Para distintos valores de Dosis Germicida según el microorganismo.

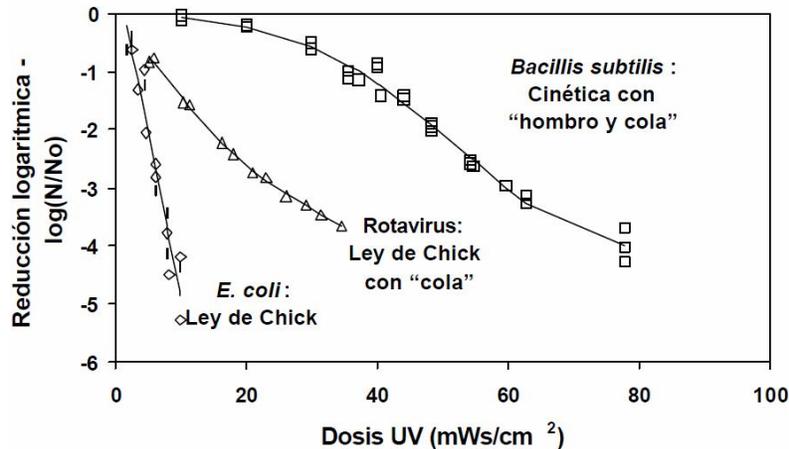


Figura 9.1 La grafica indica el comportamiento de la reducción logarítmica de la población de microorganismos en función de la Dosis aplicada para tres agentes diferentes. ^[1]

9.2 Normas existentes para los valores de la Dosis Germicida.

Varias jurisdicciones en todo el mundo especifican diferentes requisitos de dosis, por ejemplo la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos USEPA, especifica los parámetros en el ULTRAVIOLET DESINFECTION GUIDANCE MANUAL FOR THE FINAL LONG TERM 2 ENHANCED SUFACE WATER TREATMENT RULE. La Regla de Tratamiento de Aguas Superficiales de la USEPA requiere una dosis UV de **21 a 36 mWs/cm²** para brindar una reducción de 2 a 3 log, respectivamente, del virus de la hepatitis A. La norma 55-1991 de la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF) ANSI/NSF define dos estándares para sistemas UV en el punto de uso (POU, por su sigla en ingles) y en el punto de entrada (POE, por su sigla en inglés). El primer estándar define una unidad de desinfección UV de Clase A diseñada para desinfectar virus y bacterias hasta niveles seguros. Las unidades de Clase A deben proveer una dosis de **38 mWs/cm²**. El segundo estándar define una unidad UV de Clase B diseñada para desinfección complementaria de agua pública tratada y desinfectada. Las unidades de Clase B deben proveer una dosis de 16 mWs/cm². La NSF estableció que una dosis de 16 mWs/cm² suministraría una reducción mayor de 2 logaritmos de una bacteria heterotrófica no formadora de esporas y una dosis de **38 mWs/cm²** proveería 4 log de remoción de virus.

Los estados de Utah, New Jersey y Pennsylvania exigen una dosis de 16 mWs/cm², Arizona, Delaware, Massachusetts, Carolina del Norte y Wisconsin exigen el cumplimiento de la Norma ANSI/NSF 55 Clase A. Wisconsin y Pennsylvania especifican UV para el tratamiento de aguas de pozo y el requisito de Wisconsin especifica la necesidad de filtración antes de la aplicación de UV para la remoción de sedimentos y quistes. En Europa, Noruega, Austria y Francia exigen dosis de 16, 30 y 25 mWs/cm², respectivamente. ^[1]

9.3 Efectividad de la Dosis Germicida de los Sistemas Ultravioleta.

El objetivo general de la presente investigación es certificar los reactores según su capacidad germicida, para ello se ha determinado la dosis nominal mínima que proporciona cada reactor al caudal tratado, se ha verificado que los valores de intensidad UVC medidos en los reactores en unidades de mW/cm² estén de acuerdo a la simulación computacional de la implementación del modelo. Con este valor de intensidad podemos entonces obtener un valor empírico para la dosis en reactor de manera indirecta, es decir, conociendo el caudal del agua a tratar y la distribución espacial de la intensidad. La intensidad se conoce midiendo con los respectivos sensores UVC según se describió anteriormente, y el caudal se conoce o con un flujometro, o con el valor de caudal de la bomba si es el caso.

9.3.1 Equipo Karalakis 1.0.

Vemos que un equipo quedará validado para operar si logramos asegurar una dosis germicida de al menos 38 mJ/cm² que cumpliría con la norma de la USEPA para agua potable y de la NSF que es la más exigente de las mencionadas. Según la tabla 7.4 para un caudal de 1 m³/Hr es decir 16 Litros/min aproximadamente, tenemos dosis entre 30.92 mJ/cm² y 36.81 mJ/cm² para transmitancias entre 90% y 98%. En general el agua tratada para consumo humano, luego de ser filtrada tiene una transmitancia de 95% en este valor la dosis proporcionada por el sistema a un caudal de 16 Litros/min es de 34.6 mJ/cm², se puede reducir el caudal para alcanzar la norma que exige 38 mJ/cm² quedando un valor de caudal de 15 Litros/min. Este es el valor óptimo de funcionamiento del sistema Karalakis 1.0 que cumple con las normas ya descritas y asegura una desinfección de más de un

99.99% de la población de E. Coli, un 99% de eliminación del Rotavirus y un 90 de Bacillus Subtillis, según la grafica de la figura 9.1.

9.3.2 Equipo Marca Hidro-UV modelo HO-UV287.

Al igual que en el punto anterior veremos que este sistema pueda operar cumpliendo la dosis mínima de $38\text{mJ}/\text{cm}^2$ para una transmitancia de 95%. Según la tabla 7.5 estamos cerca de dicho valor de dosis $36.35\text{ mJ}/\text{cm}^2$ para un caudal de $20\text{ m}^3/\text{Hr}$, podemos calcular cuanto debemos reducir este valor para asegurar un valor mínimo de $38\text{ mJ}/\text{cm}^2$. Este correspondería a $19\text{ m}^3/\text{Hr}$, es decir 319 litros/min para proporcionar una dosis de $38\text{mJ}/\text{cm}^2$.

10. Conclusiones

Con la metodología desarrollada se ha demostrado que es posible caracterizar un sistema de desinfección ultravioleta, conociendo su geometría, el tipo de lámparas con su ubicación, el tipo de agua y el valor del flujo a tratar, esta caracterización nos permite decidir la configuración optima del sistema de desinfección, es decir, podemos decidir de manera óptima el numero de lámparas a usar y su ubicación de acuerdo a la dosis de desinfección requerida, evitando así sobredimensionar el sistema de desinfección y no desperdiciar energía eléctrica para alimentar mas lámparas de las requeridas, evitando también que la dosis proporcionada sea menor de la requerida y no arriesgando entre otros, la salud de quienes consumirán el agua, o alterando el proceso industrial, agrícola o acuícola para el cual se utilizará el agua tratada.

Referencias

- [1] H. B. Wright y W. L. Cairns Ultraviolet Light. Trojan Technologies Inc. 3020 Gore Road, London, Ontario, Canadá N5V 4T7.
- [2] James R. Bolton, Christine Cotton. The Ultraviolet Desinfection Handbook. Page .2.
- [3] Stanga D, Zdasiuk BJ, Gates FL. Ann Biomed Eng. 1979;7(5-6):451-69. Effect of air nuclei on the adsorption of fibrinogen to silicone rubber.
- [4] Web Trojan Technologies, <http://trojanuv.com/es/acerca-de-trojan/noticias-y-titulares?id=434>+
- [5] BBC World Savers Education. <http://www.bbc.co.uk/spanish/especiales/agua/default.stm>.
- [6] Cristian Frers <http://elmercuriodigital.es/content/view/15304/174/>
- [7] Relación del agua, el saneamiento y la higiene con la salud http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/facts2004/es/index.html
- [8] Ultraviolet Desinfection Guidance Manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule. Figure 2.2, pag 2-7. USEPA nov. 2006.
- [9] Jagger, J. Introduction to research in ultraviolet New Jersey: Prentice-Hall Inc.1967.
- [10] Masschelein Willy J. Ph. D. Ultraviolet Light in Water and Water and Wastewater Sanitation, figure 5, figure 15, page 10, page 16.
- [11] Ultraviolet Desinfection Guidance Manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule. Figure 2.18, pag 2-26. USEPA nov. 2006.
- [12] Masschelein Willy J. Processus Unitaires dans le Traitement de l'Eau potable, CEBEDOC, Liege, Belgium, 1996.
- [13] Catalogo de equipos marca Hidro-UV, Tecsinox Soluciones e ingenieria Ltda.
- [14] S. Kucuk Unluturk, H. Arastoopour, T. Koutchma. Modeling of UV dose distribution in a thin-film UV reactor for processing of apple cider. 2.2.2, Journal of Food Engineering 65 (2004) 125-136.
- [14] Masschelein Willy J. Ph. D. Ultraviolet Light in Water and Water and Wastewater Sanitation, figure 4, page 41.

[15] Zhengcai Ye, UV Desinfection Between Concentric Cylinders. PhD thesis, School of Chemical & Biomolecular Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.

[16] Furon Raymon, Le probleme de l'eau dans le monde, Payot, Paris, pag. 17, Alianza Editorial.

[17] Bolton James R. Calculation of Ultraviolet Fluence rate distribution in annular reactor: Significance of refraction and reflection.

ANEXO I

TABLAS DE DOSIS GERMICIDA EN mJ/cm² SEGÚN MICROORGANISMO.

Las siguientes tablas han sido obtenidas de diferentes publicaciones relacionadas con la desinfección por tecnología ultravioleta.

TABLA I ^[1]

Cuadro 2. Dosis UV en MWs/cm² para inactivar una población microbiana en 1 Log (90%) y 2 Log (99%).

MICROORGANISMOS	REDUCCIÓN LOGARITMICA		MICROORGANISMOS	REDUCCIÓN LOGARITMICA	
	1	2		1	2
BACTERIAS			Coliformes fecales ¹⁰	3.4	6.8
Bacillus anthracis	4.5	8.7	Salmonella enteritidis	4	7.6
Bacillus subtilis, esporas	12	22	Salmonella paratyphi ³	3.2	---
Bacillus subtilis	7.1	11	Salmonella typhi ⁵	2.1	---
Campylobacter jejuni ⁵	1.1	---	Salmonella typhimurium ¹⁰	3	---
Clostridium tetani ¹	12	22	Shigella dysenteriae	2.2	4.2
Corynebacterium diphtheriae ¹	3.4	6.5	Shigella flexneri (paradysenteriae)	1.7	3.4
Escherichia coli	3	6.6	Shigella sonnei ⁵	3	5
Klebsiella terrigena ⁵	2.6	---	Staphylococcus aureus	5	6.6
Legionella pneumophila ⁴	0.9	2.8	Streptococcus faecalis ⁵	4.4	---
Sarcina lutea	20	26.4	Streptococcus pyogenes	2.2	---
Mycobacterium tuberculosis	6	10	Vibrio cholerae (V.comma) ⁶	---	6.5
Pseudomonas aeruginosa ⁶	5.5	10.5	Yersinia enterocolitica ⁵	1.1	---
VIRUS					
MS-2 Coliphage ⁵	18.6	---	Virus de la influenza ²	3.6	6.6
F-specific bacteriophage ²	6.9	---	Virus de la poliometitis ^{5,6,9}	5-8	14
Hepatitis A ^{5,6}	7.3	---	Rotavirus ^{5,6,9,11}	6-15	15-40
PROTOZOARIOS			ALGAS		
Giardia lamblia ^{6,7}	82	---	Verde-Azul ^{1,3}	300	600
Cryptosporidium parvum ⁸	80	120	Chlorella vulgaris ^{1,2}	12	22
LEVADURAS					
Saccharomyces cerevisiae ¹	7.3	13.2			

Referencias: 1. Legan (1980) 2. Jevons (1982) 3. Grocock (1984) 4. Antopol (1979)
5. Wilson et al. (1993) 6. Wolfe (1990) 7. Rice and Hoff (1981) 8. Ransome et al. (1993)
9. Harris et al. (1987) 10. Trojan Technologies Ltd. 11. Battigelli et al. (1993)

~~[1]

TABLA II [18]

TABLE 4.1
 D_{10} UV Inactivation Doses (mJ/cm²) Measured
at 253.7 nm for Various Microbial Groups

Microbial Group	D_{10} UV Dose (mJ/cm ²)
Enteral bacteria	2–8
Cocci and micrococci	1.5–20
Spore formers	4–30
Enteric viruses	5–30
Yeast	2.3–8
Fungi	30–300
Protozoa	60–120
Algae	300–600

ANEXO II

TABLAS DE DOSIS GERMICIDA EN mJ/cm² SEGÚN MICROORGANISMO.

TABLA III^[7]

TABLE 9
1-D₁₀ for Most Relevant Organisms Potentially Present
in Drinking Water

Organism ^a	Value	Organism ^a	Value
<i>Bacterium prodigiosus</i>	7	<i>E. coli</i> (wild strains)	50 ^b
<i>Legionella pneumophila</i>	9.2	Coliforms	50–60 ^b
<i>B. megaterium</i> (vegetative)	11	<i>Bacillus subtilis</i> (spores)	300–400 ^b
<i>Streptococcus viridans</i>	20	<i>Bacterium coli</i>	54
<i>Yersinia enterocolitica</i> (ATCC 23715)	20	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	50–60 ^b
<i>Legionella pneumophila</i>	20–50 ^b	<i>P. aeruginosa</i>	55
<i>Eberthella typhosa</i>	21	Infectious hepatitis virus A (HVA)	58–80
<i>Shigella paradysenteriae</i>	22	Somatic coliphages	60 ^b
<i>Dysentery bacilli</i>	22	<i>Streptococcus lactis</i>	61
<i>Streptococcus hemolyticus</i>	22	<i>Micrococcus candidus</i>	63
Milk (<i>Torula sphaerica</i>)	23	<i>Enterobacter cloacae</i> (ATCC 13047)	65
<i>Serratia marcescens</i>	25	<i>Vibrio cholerae</i>	66
<i>Salmonella typhi</i> (ATCC 19430)	25	<i>Salmonella typhimurium</i>	80
<i>Escherichia coli</i> (ATCC 11229)	25	<i>Enterococcus faecalis</i> (ATCC 19433)	80
<i>Klebsiella pneumoniae</i> (ATCC 4352)	25	<i>Streptococcus faecalis</i>	80 ^b
<i>Proteus vulgaris</i>	27	<i>S. faecalis</i> (wild strains)	82
<i>Bacterium megatherium</i> (spores)	28	Rotavirus(es)	90
<i>Citrobacter freundii</i>	30–40	Adenovirus	300
Poliovirus	32–58	<i>Bacillus subtilis</i> (spores)	80–120
Rheovirus	110	<i>Micrococcus sphaeroides</i>	100
<i>Bacillus paratyphosus</i>	32	<i>Clostridium perfringens</i> (spores)	100–120
Beer brewing yeasts	33	Phagi f-2 (MS-2)	120 ^b
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	34	<i>Chlorella vulgaris</i> (algae)	140 ^b
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	35	<i>Actinomyces</i> (wild strain spores Nocardia)	150–200
Baking yeast	39–60	Phagi f-2	240
<i>S. enteritidis</i>	40	<i>Fusarium</i>	250–350 ^b
<i>Phytomonas tumefaciens</i>	44	Infectious pancreatic necrosis (virus)	600 ^b
<i>Neisseria catarrhalis</i>	44	Tobacco mosaic virus	750 ^b
<i>B. pyocyaneus</i>	44	<i>Giardia lamblia</i> (cysts)	(400–800) ^c
<i>Spirillum rubrum</i>	44	<i>Lamblia</i> -Jarroll (cysts)	700 ^b
<i>B. anthracis</i>	45	<i>L. muris</i> (cysts)	700 ^b
<i>Salmonella typhimurium</i>	48	<i>Cryptosporidium oocysts</i> ^d	7–10 ^c
<i>Aerobacter aeromonas</i>	50 ^b		
<i>E. coli</i> (wild strains)	50		

(continued)

TABLE 9
1-D₁₀ for Most Relevant Organisms Potentially Present
in Drinking Water (Continued)

Organism ^a	Value	Organism ^a	Value
Fungi spores	150–1000	Diatoms	3600–6000
<i>Aspergillus niger</i>	440–1320 ^b	Green algae	3600–6000
Microanimals and parasites	1000 (?)	Blue-green algae (Cyanobacter)	3000

Note: The doses are expressed in joule per square meter, valid for suspensions of single organisms in pure water at pH = 7, at 22°C, in the absence of daylight, and in the linear part of the decay curve. In design, appropriate safety factors will need to be applied. The 1-D₁₀ doses indicated hereafter are the result of a large comparison and compilation of literature.

^a No specific data seem to have been reported for nitrifying–denitrifying bacteria (*Nitrobacter*, *Nitrosomonas*). In case studies on wastewater treatment on a comparative basis, a nitrified effluent needs higher UV doses than a nonnitrified effluent.

^b Specific data evaluated with medium pressure lamps.

^c Data can be variable by a factor of 2 depending on the strain. Medium-pressure broadband emitting lamps can be more effective: 1-D₁₀ in the range of 400 to 800 for *Giardia lamblia* cysts and 7 to 10 for *Cryptosporidium* cysts. (In case of protozoan oocysts, the result can depend on the numbering method: excystation or *in vivo* testing.)

^d For additional information: Bukhari et al., 1999; Clancy et al., 1998; Clancy et al., 2000; Clancy and Hargy, 2001; Hargy et al., 2000.