



Universitat Jaume I

Escuela Superior de Tecnología y Ciencias Experimentales

Grado en Ingeniería Química

Diseño de un reactor fotocatalítico para la degradación de contaminantes emergentes presentes en el efluente de una Estación Depuradora de Aguas Residuales

Trabajo Fin de Grado

Autora:

Carla Martínez Castillo

Tutor:

Sergio Mestre Beltrán

Castellón, julio de 2020

0. RESUMEN

La presencia de contaminantes emergentes en aguas residuales y superficiales supone un gran riesgo tanto para los ecosistemas acuáticos, como para el medio ambiente y en consecuencia, para la salud humana. Ante la ineficiencia de los procesos convencionales en las plantas depuradoras, una de las tecnologías que resulta más atractiva para la descontaminación y desinfección del agua es la degradación fotocatalítica utilizando dióxido de titanio (TiO_2) como fotocatalizador.

La fotocatalisis heterogénea es un proceso que se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante (visible o ultravioleta) por un fotocatalizador, el cual promueve la reacción de fotooxidación.

El principal objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es llevar a cabo el diseño y dimensionamiento de un reactor fotocatalítico para la degradación de contaminantes emergentes presentes en el efluente de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR). El caudal de agua residual a tratar en el tratamiento terciario avanzado es de $23.581 \text{ m}^3/\text{día}$.

Para llevar a cabo el diseño del reactor se han utilizado tres sustancias modelo: isoproturon, simazina y propazina. Los pesticidas seleccionados son contaminantes altamente representativos, tanto desde el punto de vista de su toxicidad como por su presencia habitual. La concentración inicial de cada contaminante es de $1 \mu\text{g/L}$ y con este tratamiento se persigue alcanzar una conversión mínima del 70%, anticipándose a una posible legislación futura.

Para seleccionar la configuración más adecuada, se realizaron estudios preliminares en un reactor de geometría sencilla para predecir la cantidad óptima de catalizador, el efecto que tiene la potencia de la lámpara sobre la degradación de los pesticidas seleccionados y las dimensiones del reactor.

Así mismo, se llevó a cabo el modelado de este reactor estableciendo una serie de consideraciones que permiten la resolución de los siguientes modelos. Por un lado, la emisión de la radiación de la lámpara mediante el modelo de fuente de emisión esférica lineal (LSSE).

Por otro lado, el modelo de absorción y dispersión de la radiación en coordenadas cilíndricas, denominado “Modelo de Seis Flujos”, el cual consiste en un sistema de ecuaciones diferenciales que permiten predecir la velocidad volumétrica local de absorción de fotones (LVRPA).

Posteriormente se obtuvo una ecuación cinética que describe la dependencia de la velocidad de reacción con la concentración de los contaminantes; no obstante, se determinó que la velocidad de reacción también depende del campo de radiación. Por este motivo fue necesario establecer una ecuación cinética que estuviera en función de la radiación absorbida, la cual se evalúa a través de la velocidad volumétrica de absorción de fotones (LVRPA).

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se realiza un diseño más exhaustivo del reactor para tratar el caudal de agua residual deseado.

Por último, se llevó a cabo un estudio económico con el propósito de estimar y evaluar las inversiones necesarias junto con los costes de operación, de manera que se implemente el proyecto de la forma más eficiente posible tanto en costes como en recursos.

1. ÍNDICE GENERAL

0. RESUMEN
1. ÍNDICE GENERAL
2. MEMORIA
3. ANEXOS
4. PLANOS
5. PLIEGO DE CONDICIONES
6. ESTADO DE MEDICIONES
7. PRESUPUESTO

2. MEMORIA

ÍNDICE

1. OBJETIVO	3
2. JUSTIFICACIÓN	4
3. ALCANCE	5
4. ANTECEDENTES	6
4.1 AGUAS RESIDUALES.....	6
4.2 CONTAMINANTES EMERGENTES	7
4.2.1 PROPIEDADES DE LOS CONTAMINANTES A DEGRADAR.....	8
4.3 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS	9
4.4 PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN (PAOs).....	11
4.4.1 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA	13
4.4.2 FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA	16
4.5 DIÓXIDO DE TITANIO (TiO ₂) COMO FOTOCATALIZADOR	18
4.6 DESINFECCIÓN MEDIANTE LUZ ULTRAVIOLETA	21
4.6.1 LÁMPARA DE AMALGAMA DE BAJA PRESIÓN	23
4.7 REACTORES FOTOCATALÍTICOS	24
4.7.1 CONFIGURACIÓN DEL FOTOCATALIZADOR	24
4.7.2 CONFIGURACIÓN DEL FOTORREACTOR	25
4.8 PARÁMETROS QUE AFECTAN AL PROCESO FOTOCATALÍTICO	26
4.8.1 CONCENTRACIÓN DE AGENTE OXIDANTE.....	26
4.8.2 CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTE	27
4.8.3 CONCENTRACIÓN DE CATALIZADOR.....	27
4.8.4 pH DEL MEDIO	28
4.8.5 TEMPERATURA.....	29
5. NORMAS Y REFERENCIAS	31
5.1 DISPOSICIONES LEGALES Y NORMAS APLICADAS	31
5.2 BIBLIOGRAFÍA	31
5.3 PROGRAMAS INFORMÁTICOS	36
5.4 PLAN DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	36
6. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS	37
6.1 DEFINICIONES	37
6.2 NOMENCLATURA	38
6.3 ACRÓNIMOS.....	41
7. REQUISITOS DE DISEÑO	42
7.1 CARACTERÍSTICAS DE LA CORRIENTE DE AGUA RESIDUAL	43

7.2 CARACTERÍSTICAS DEL CATALIZADOR	43
8. ANÁLISIS DE SOLUCIONES	44
9. RESULTADOS FINALES	48
10. PLANIFICACIÓN	52
11. ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE LOS DOCUMENTOS BÁSICOS.....	53
12. ESTUDIO DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA.....	54
12.1 RESUMEN DEL PRESUPUESTO	54
12.2 PRESUPUESTO DE EXPLOTACIÓN	55
12.2.1 INVERSIÓN INICIAL.....	56
12.2.2 GASTOS DIRECTOS	56
12.2.3 GASTOS INDIRECTOS	59
12.2.4 GASTOS TOTALES	59
12.2.5 AMORTIZACIÓN	60
12.2.6 BENEFICIOS	62
12.2.7 FLUJO DE CAJA	65
12.2.8 VALOR ACTUAL NETO (VAN)	66
12.2.9 TASA INTERNA DE RENTABILIDAD (TIR).....	67
12.2.10 PERIODO DE RETORNO (PR)	69
12.2.11 CONCLUSIÓN	69

1. OBJETIVO

La aplicación de procesos de oxidación avanzada para la eliminación de los contaminantes emergentes es crucial para conseguir un alto rendimiento de descontaminación del agua.

El objetivo principal de este proyecto es diseñar y dimensionar un reactor fotocatalítico para la degradación de tres contaminantes emergentes altamente representativos, tanto desde el punto de vista de su toxicidad como por su presencia habitual.

Dentro del objetivo general, el presente trabajo ha tenido como objetivos específicos:

1. Evaluar la eficiencia del reactor fotocatalítico en base a la eliminación de los compuestos emergentes seleccionados que están presentes en el agua residual.
2. Evaluar mediante la simulación matemática el efecto de cada uno de los parámetros evaluados sobre la conversión.
3. Identificar la distribución de las fuentes artificiales de UV más favorable.
4. Estimar y evaluar las inversiones necesarias junto con los costes de operación, de manera que se implemente el proyecto de la forma más eficiente posible tanto en costes como en recursos.

2. JUSTIFICACIÓN

La realización del presente trabajo surge de la necesidad de realizar un proyecto de carácter profesional, ligado al ámbito laboral habitual de un graduado en Ingeniería Química.

En este proyecto se propone la ampliación de una Estación Depuradora de Aguas Residuales localizada en la Comunidad Valenciana, incluyendo un tratamiento terciario avanzado, debido a que el efluente a la salida del decantador está depurado biológicamente pero no químicamente. La incorporación de este reactor fotocatalítico permite conseguir un alto rendimiento de descontaminación del agua gracias a la eliminación de contaminantes emergentes, principalmente, pesticidas que son las sustancias que predominan en esta zona dedicada al sector hortofrutícola.

3. ALCANCE

El presente proyecto tiene como finalidad presentar el diseño y dimensionamiento de un reactor fotocatalítico para la degradación de contaminantes emergentes presentes en el efluente de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR). El caudal de agua a tratar es de 983 m³/h y los contaminantes que se han utilizado como modelo son el isoproturon, la simazina y la propazina; trabajando con concentraciones iniciales de 1 µg/L de cada compuesto.

La degradación de las sustancias seleccionadas se realiza mediante un proceso de fotocátalisis heterogénea, utilizando TiO₂ como fotocatalizador que se encuentra suspendido en la disolución.

El proyecto no se centra en el estudio profundo del fotocatalizador empleado, sino que principalmente se centra en cómo se ha hecho el diseño y la construcción del reactor fotocatalítico, explicando en todo momento detalladamente cual ha sido el motivo de proceder a realizar el diseño de una manera u otra.

Por tanto, el alcance del proyecto será:

- ❖ Diseñar y dimensionar el reactor fotocatalítico.
- ❖ Evaluar el efecto que tienen las fuentes artificiales de UV sobre la conversión y distribuir las en el reactor de manera que se obtenga la configuración óptima.
- ❖ Realizar un estudio económico que incluya los costes de construcción y funcionamiento del proceso.

Mediante este proyecto se logra alcanzar una conversión mínima del 70%, permitiendo de esta manera conseguir un alto rendimiento de descontaminación del agua.

4. ANTECEDENTES

Actualmente existe un creciente interés en la protección y conservación de los recursos naturales con el fin de preservar el medio ambiente. Entre estos recursos se destaca en primer lugar el agua ya que a pesar de ser la sustancia más abundante en la Tierra tan solo un 3% es agua dulce, por lo tanto no toda está disponible para su uso. Este hecho, sumando el problema que está acechando al agua por la presencia de contaminantes emergentes ha fomentado un creciente interés para desarrollar nuevas tecnologías para la reutilización y gestión del agua dulce.

4.1 AGUAS RESIDUALES

La generación de aguas residuales es una consecuencia inevitable de las actividades humanas. Estas acciones introducen materias o formas de energía que implican una alteración perjudicial de la calidad de las aguas originales en relación con los usos posteriores o con su función ecológica.

Las aguas residuales pueden descender de diferentes orígenes. Según la directiva europea, los distintos tipos de aguas residuales son:

- ❖ Aguas residuales domésticas

Son aguas procedentes de las áreas residenciales (desechos humanos, baños, cocina) y de actividades domésticas, de establecimientos comerciales y de instituciones tales como hospitales, escuelas, universidades, etc.

Las aguas residuales domésticas contienen, principalmente, contaminantes orgánicos tanto disueltos como en suspensión.

- ❖ Aguas residuales industriales

Son aguas originadas en los procesos productivos de empresas o locales utilizados para efectuar actividades comerciales o industriales, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escurrentía.

La cantidad y composición de ellas varían de una instalación a otra, dependiendo de la actividad productiva y de muchos otros factores. Este tipo de agua residual se caracteriza por contener sustancias tóxicas de naturaleza orgánica e inorgánica, compuestos químicos y metales pesados. Pueden ser depuradas en las propias instalaciones industriales pero, en ocasiones, se realiza un tratamiento previo en la propia instalación para luego ser evacuadas al colector municipal.

❖ Aguas residuales urbanas

Son las aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con las de escorrentía pluvial. Son estas aguas residuales urbanas las que realmente llegan a la estación depuradora y serán objeto del tratamiento y depuración.

4.2 CONTAMINANTES EMERGENTES

Los contaminantes emergentes son compuestos de distinto origen y naturaleza química que se encuentran en el medio ambiente en bajas concentraciones, por lo que han pasado en gran medida inadvertidos, y la mayoría siguen sin estar regulados o reglamentados. No obstante, ahora están siendo ampliamente detectados y aún a bajas concentraciones pueden causar efectos adversos sobre los ecosistemas.

Una de las principales fuentes de contaminantes emergentes son las aguas residuales que no reciben tratamiento alguno y los efluentes de plantas depuradoras, las cuales no están diseñadas para degradar estos productos químicos, por lo que entran en el medio acuático en pequeñas cantidades pero con el tiempo se acumulan en el entorno encontrándose concentraciones preocupantes de tales productos.

Los posibles efectos perjudiciales para el ecosistema y la salud humana de estos contaminantes son todavía desconocidos, aunque depende de la concentración, de su persistencia en el medio, y del mecanismo de eliminación, entre otros factores.

Los contaminantes emergentes comprenden una amplia gama de compuestos químicos, entre ellos cabe destacar los productos farmacéuticos y de higiene personal, drogas ilícitas, pesticidas, hormonas, etc.

Muchos de éstos son clasificados como disruptores endocrinos, esto implica que la exposición a estos contaminantes puede generar alteraciones en el desarrollo y comportamiento de los organismos vivos.⁴

Para el presente trabajo, se van a utilizar tres contaminantes emergentes; isoproturon, simazina y propazina.

4.2.1 PROPIEDADES DE LOS CONTAMINANTES A DEGRADAR

La contaminación derivada del uso de plaguicidas en la agricultura se caracteriza por ser muy dispersa y difícil de controlar ya que muchos son solubles en agua, por lo que afectan a regiones alejadas del lugar de su aplicación. Además, la presencia de estos compuestos en las aguas superficiales o subterráneas provoca serias consecuencias ambientales y para la salud humana.

La Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) define un pesticida como “cualquier sustancia o mezcla de sustancias que se emplee para prevenir, destruir, repeler o mitigar una plaga”. Dentro de los pesticidas según el organismo al que atacan se encuentran los herbicidas, fungicidas e insecticidas. Las sustancias empleadas en este trabajo son herbicidas, que son sustancias químicas capaces de inhibir o interrumpir el desarrollo de plantas indeseadas mediante el ataque a una o más funciones vitales, obteniendo como resultado la muerte de los mismos.

Entre los plaguicidas en los que se centra este estudio se encuentran la simazina y el isoproturon; los cuales están incluidos en la lista de sustancias prioritarias en el campo de la política de aguas de la directiva 2008/105/CE de la Unión Europea, en la que se indican valores de concentración máximos admisibles en las aguas superficiales.

El isoproturon es un plaguicida perteneciente a la familia de las fenilureas y consiste en un anillo aromático con una cadena alquílica y un grupo ureico. La simazina y la propazina son herbicidas que pertenecen al grupo de la triazina y su estructura molecular solo difiere en la cadena alquílica unida al N-exocíclico.

⁴ Stuart, M. Lapworth, D. Crane, E. Hart, A. (2012). “Review of risk from potential emerging contaminants in UK groundwater” en *Science of the Total Environment*, vol. 416, p. 1-21.

Por lo tanto, se espera que la simazina y la propazina sigan mecanismos de degradación similares con tasas parecidas.

Los herbicidas seleccionados están considerados compuestos tóxicos y su degradación en el medio es lenta, por lo que pueden considerarse persistentes.

En la *Figura M.4.1* se muestra la estructura molecular de los contaminantes emergentes utilizados como modelos.

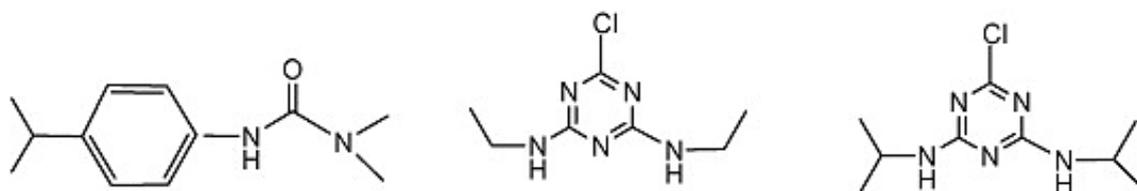


Figura M.4.1 Estructura molecular del isoproturon, simazina y propazina, respectivamente.²⁶

4.3 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS

Los procesos y tecnologías disponibles para el tratamiento de residuos en agua son muy diversos y se pueden dividir en los siguientes grupos generales:

- ❖ **Pretratamiento:** son procesos que se utilizan para eliminar todos aquellos sólidos o sustancias que no vayan a poder ser eliminados en las etapas posteriores de tratamiento y que fundamentalmente provocaran problemas en las mismas.
- ❖ **Procesos físicos o primarios:** estos tratamientos consisten en operaciones unitarias de separación en las cuales no se produce una alteración de la estructura química del contaminante, lo que permite la recuperación y en algunos casos la reutilización de los subproductos generados durante el proceso.

Estas técnicas tienen como objetivo reducir por medios físicos el contenido de partículas en suspensión en el agua.

²⁶ Li Puma, G. Toepfer, B. Gora, A. (2007). "Photocatalytic oxidation of multicomponent systems of herbicides: scale-up of laboratory kinetics rate data to plan scale" en *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 124, issues. 3-4, p. 124-132.

- ❖ Procesos biológicos o secundarios: son un conjunto de procesos biológicos empleados para eliminar la materia orgánica biodegradable, tanto en medio aerobio como anaerobio.

En estos procesos se utilizan microorganismos para degradar la materia orgánica presente, el agua se hace circular a través de un lecho de arena que contiene un film de microorganismos, estos aprovechan la materia orgánica del efluente como nutrientes y generan subproductos inertes que pueden ser eliminados posteriormente.¹

Estos métodos biológicos son susceptibles a los contaminantes emergentes, ya que pueden resultar tóxicos para los microorganismos y por tanto resulta imposible su biodegradación.

- ❖ Procesos químicos o terciarios: son procesos que se utilizan para eliminar los microorganismos patógenos que quedan en el efluente tras las fases de los tratamientos anteriores.

En la actualidad existen tres subgrupos de tratamientos químicos que son:

- Procesos de oxidación clásicos.
- Procesos electroquímicos.
- Procesos de oxidación avanzada (POAs).

En estos casos, en los que los procesos convencionales (coagulación/floculación/sedimentación, filtración, adsorción empleando carbón activo y cloración) no son capaces de eliminar eficazmente los contaminantes emergentes debido a que presentan una elevada estabilidad química y/o baja biodegradabilidad, se hace necesario utilizar tratamientos alternativos como los llamados “Procesos de Oxidación Avanzada”. Estos recursos tecnológicos producen especies altamente oxidantes, como el radical hidroxilo, dando lugar a la eliminación total o parcial de compuestos resistentes a los tratamientos convencionales.

¹ Terán Solíz, M. (2016). *Estudio de la aplicación de procesos de oxidación avanzada a aguas contaminadas*. Trabajo Final de Grado. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

4.4 PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN (PAOs)

Los procesos avanzados de oxidación están basados en procesos físico-químicos que pueden producir cambios fundamentales en la estructura química de los contaminantes, generando especies muy oxidantes. Entre estos procesos, aquellos que implican la formación de radicales hidroxilos ($OH \cdot$) son los de mayor implantación, ya que después del flúor, son los agentes oxidantes más energéticos y son responsables de la inactivación bacteriana. Además, estas especies son extremadamente reactivas (potencial de oxidación 2.8V) (véase *Tabla M.4.1*).

Tabla M.4.1 Potenciales redox de algunos agentes oxidantes.

ESPECIE	E° (V, 25°C)
Flúor	3,03
Radical hidroxilo	2,80
Oxígeno atómico	2,42
Ozono	2,07
Peróxido de hidrógeno	1,78
Radical perhidroxilo	1,70
Permanganato	1,68
Dióxido de cloro	1,57
Ácido hipocloroso	1,49
Cloro	1,36
Bromo	1,09
Yodo	0,54

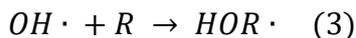
Los radicales hidroxilos pueden generarse por métodos fotoquímicos o utilizando otras fuentes de energía. Si la degradación sucede por excitación directa de la luz, es llamada fotólisis, mientras que si usa sensibilizadores, éstos son compuestos inorgánicos u orgánicos que absorben la radiación ultravioleta y producen los radicales hidroxilos ($OH \cdot$), así como el anión radical super-óxido ($O_2^{\cdot-}$).

Éstos se pueden formar a partir del oxígeno, del peróxido de hidrógeno e incluso sólo a partir del agua. Una vez producido el radical hidroxilo, cuando reacciona se reduce a agua.

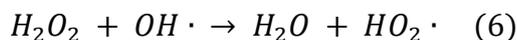
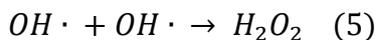
Los radicales $OH \cdot$ generados en disolución son de gran efectividad para el proceso de oxidación de compuestos orgánicos principalmente por abstracción de hidrógeno y formación de radicales orgánicos libres (reacción 1). Estos pueden reaccionar, a su vez, con moléculas de oxígeno formando un radical peroxil (reacción 2). Incluso pueden iniciarse una serie de reacciones de degradación oxidativa, alcanzando en algunos casos la mineralización completa de la materia orgánica.



Estos radicales pueden actuar frente a los compuestos orgánicos mediante otros mecanismos de reacción como la adición electrofílica (reacción 3) o la transferencia de electrones (reacción 4).



De igual forma se producen radicales menos reactivos como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) mediante recombinaciones entre radicales hidroxilos (reacción 5), o se puede formar el radical hidroperóxido ($HO_2 \cdot$) en presencia de exceso de peróxido de hidrógeno (reacción 6).



Las ventajas que presentan estas nuevas tecnologías o procesos de oxidación avanzada con respecto a los métodos convencionales son las siguientes:

- ❖ No sólo cambian de fase al contaminante sino que lo transforman químicamente.

- ❖ Capacidad para realizar una profunda mineralización (destrucción) del contaminante orgánico y convertirlo en producto inocuo. También es posible convertir compuestos inorgánicos en compuestos menos perjudiciales mediante el proceso de oxidación.
- ❖ El alto poder oxidante del radical $OH \cdot$ permite una mineralización completa o casi completa de la mayoría de las sustancias químicas. Mientras que en las tecnologías convencionales al no utilizarse especies tan fuertemente oxidantes no se logra una completa oxidación del contaminante.
- ❖ No suelen generar residuos ni subproductos que posteriormente requieran de un tratamiento.
- ❖ Muy útiles para eliminar contaminantes refractarios que resisten a otros métodos de tratamiento.
- ❖ Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración.

En muchos de los procesos de oxidación avanzada, el uso de reactivos caros y el elevado consumo eléctrico durante el desarrollo del proceso y/o para la utilización de lámparas para generar radiación UV son los principales inconvenientes. Sin embargo, suponen un importante ahorro energético si se comparan con otros métodos como la oxidación húmeda o la incineración. Por otra parte, el uso de estas nuevas tecnologías no excluye la utilización de tratamientos más económicos como la biodegradación.

4.4.1 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA

La versatilidad de los POAs se debe a que existen diferentes formas de generar el radical hidroxilo dependiendo de los requerimientos específicos de cada residual. En la *Figura M.4.2* se muestra una manera de clasificar estos procesos.

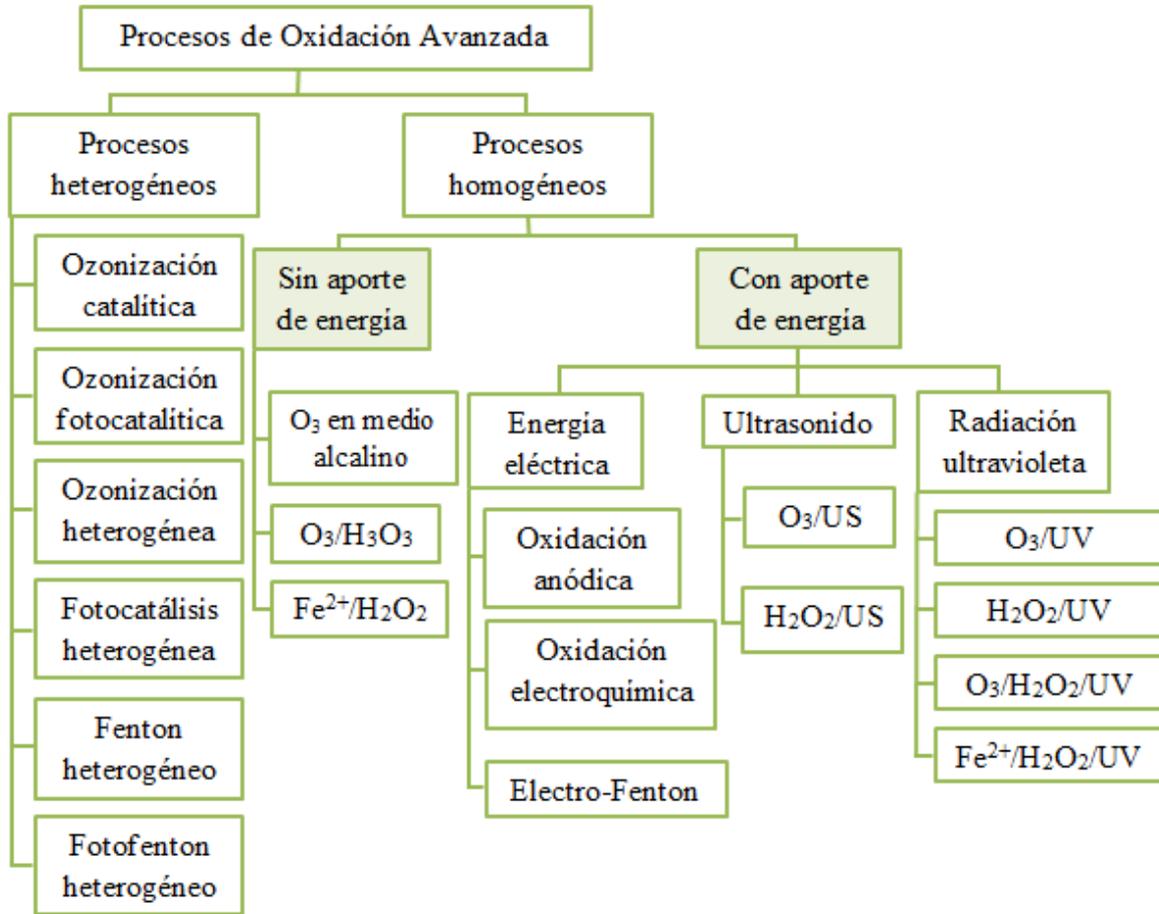
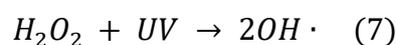


Figura M.4.2 Clasificación de los procesos de oxidación avanzada.

Los procesos fotoquímicos empleados para el tratamiento de aguas contaminadas con sustancias emergentes se basan en proporcionar energía de una determinada longitud de onda a la reacción. La energía radiante es absorbida por moléculas en forma de unidades cuánticas, fotones, dando lugar a una serie de reacciones en cadena si estos contienen la energía requerida para excitar electrones específicos y formar radicales libres. Estos radicales libres pueden generarse electrónicamente desde el estado excitado de la molécula orgánica hacia el oxígeno molecular, originándose el radical superóxido ($O_2^{\cdot-}$), o hacia otro reactivo químico menos común como el ozono, en cuyo caso se producen radicales hidroxilo (OH^{\cdot}). El ozono se produce y se descompone fotoquímicamente por luz UV, el átomo de oxígeno radical resultante de la descomposición del ozono reacciona con el agua generando agua oxigenada que se descompone en radicales hidroxilo (reacción 7).



Una fracción de los átomos de oxígeno estará en un estado electrónico excitado y podrá reaccionar directamente con el agua para generar radicales hidroxilo.

De igual forma, los radicales hidroxilo pueden producirse combinando peróxido de hidrógeno y ozono, evitando así usar luz UV (reacción 8).



Los métodos basados en la acción de la luz utilizan normalmente radiación ultravioleta (UV) debido a la mayor energía de sus fotones como indica la ecuación de Plank (*ecuación M.4.1*):

$$E_\lambda = \frac{hc}{\lambda} \quad (M.4.1)$$

Donde E_λ es la energía de un fotón asociada a la longitud de onda (λ) de la radiación; h es la constante de Plank y c es la velocidad de la luz. Se deben considerar tres aspectos fundamentales en el momento de analizar la efectividad de un determinado método fotoquímico:

- ❖ Capacidad de absorber radiación de la longitud de onda incidente por parte de los compuestos a degradar.
- ❖ Rendimiento cuántico de los mismos.
- ❖ Estabilidad y simplicidad de los productos de fotodegradación.

El rendimiento cuántico (Φ) se define como la relación entre el número de moléculas del compuesto que reacciona y el número de fotones absorbidos por el compuesto en un período determinado de tiempo.¹⁰

¹⁰ Blanco Gálvez, J. et al. (2001). *Diseño de reactores para fotocatalisis: Evaluación comparativa de las distintas opciones*. Madrid: CYTED. 243-266.

4.4.2 FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA

La fotocatalisis heterogénea es un proceso de oxidación avanzada fotoquímico, que se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante (visible o UV) por un sólido, que normalmente es un semiconductor de banda ancha. Cuando la absorción es directa, los fotones son absorbidos por el semiconductor y cuando es indirecta, la excitación inicial se produce en moléculas adsorbidas en la superficie del fotocatalizador, que a su vez son capaces de inyectar electrones al semiconductor.⁶ El proceso de fotocatalisis heterogénea se genera cuando un semiconductor absorbe energía radiante en forma de fotones, los cuales deben tener una energía igual o superior al ancho de banda prohibido del material (band gap). En el ancho de banda prohibido no se encuentra ningún electrón, ya que es un espacio de paso de electrones desde la banda de valencia a la banda de conducción.

En la *Figura M.4.3* se muestra un esquema general del proceso sobre una partícula semiconductor excitada con luz de una longitud de onda superior al band gap (E_g).

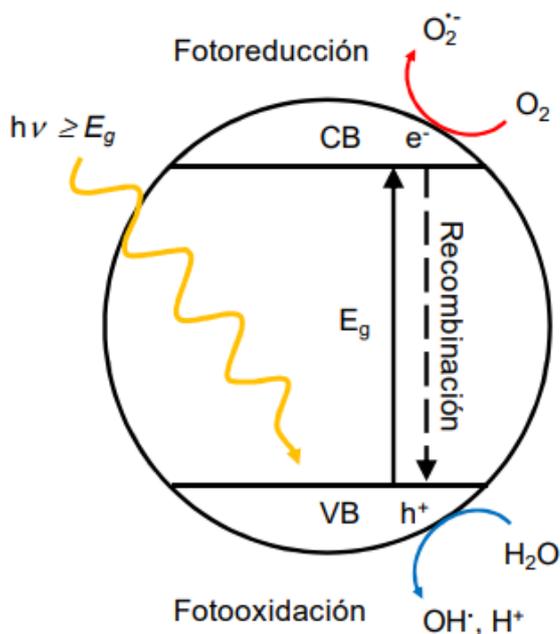
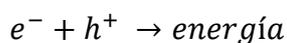
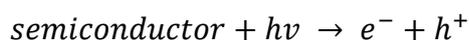


Figura M.4.3 Representación del proceso fotocatalítico heterogéneo en una partícula semiconductor.

⁶ Herrman, J.M (1999). "Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants" en *Catalysis Today*, vol. 53, p. 115-129.

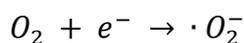
Como se puede observar en el esquema, la radiación UV con energía mayor o igual al band gap del material provoca la excitación de un electrón de la banda de valencia (VB) del semiconductor a la banda de conducción (CB), creando un hueco en la banda de valencia (VB). De este modo se forman pares electrón-hueco (e^-/h^+) cuya vida media es del orden de los nanosegundos, por lo que en este tiempo deben migrar a la superficie del catalizador y reaccionar con las especies adsorbidas. En el caso de que no logren separarse o reaccionar con las especies de la superficie se recombinan, disipándose la energía.



Para que el proceso fotocatalítico se lleve a cabo, los huecos generados en la banda de valencia del sólido deben reaccionar con especies dadoras de electrones, como son las moléculas de agua o iones hidroxilos unidos a la superficie del catalizador, produciendo así los radicales hidroxilo ($OH\cdot$), que son especies muy reactivas, responsables de la degradación de la materia orgánica.



Por su parte, los electrones que llegan a la banda de conducción, deben reaccionar con una especie aceptora de electrones como el O_2 , dando lugar a radicales ($O_2^{\cdot-}$), que participan adicionalmente en la oxidación de la materia orgánica.



Las principales ventajas de la fotocatalisis heterogénea se pueden resumir en los siguientes puntos:

- ❖ El aporte de energía necesario es muy pequeño ya que las condiciones de operación son generalmente a temperatura ambiente y presión atmosférica.

- ❖ La fuente de excitación puede ser radiación solar o lámparas de baja potencia, minimizando el consumo energético.
- ❖ Alto poder oxidativo y baja selectividad, lo que permite degradar sustancias tóxicas hasta compuestos totalmente inocuos. En el caso de sustancias orgánicas los subproductos que se obtienen son agua, CO₂ y simples ácidos inorgánicos.
- ❖ El proceso es capaz de eliminar una mezcla compleja de contaminantes.
- ❖ La reacción también funciona en el caso de metales pesados, siendo posible reducir metales a un estado en el cual su toxicidad se ve sustancialmente reducida.
- ❖ Los compuestos orgánicos son destruidos en un único proceso sin necesidad de ser extraídos previamente del medio en el que se encuentran disueltos.
- ❖ El proceso se puede combinar con otros tratamientos, como podría ser el biológico.
- ❖ Es una técnica versátil, es decir, de fácil adaptación a condiciones de operación variables.

4.5 DIÓXIDO DE TITANIO (TiO₂) COMO FOTOCATALIZADOR

Un fotocatalizador es definido como una sustancia que es activada por la absorción de fotones y ayuda a acelerar una reacción, sin que este se consuma durante la reacción.¹⁸ En los procesos fotocatalíticos se emplean diferentes catalizadores, los cuales deben tener un ancho de banda que permita que sea activado mediante radiación en el rango UV o incluso pudiendo llegar a usarse radiación solar. Además, uno de sus atributos fundamentales es tener un potencial de banda de conducción lo suficientemente positivo para oxidar los hidroxilos y en el caso de la banda de valencia, lo suficientemente negativo como para reducir el oxígeno.

A continuación se muestra una gráfica (*Figura M.4.4*) de diversos semiconductores utilizados actualmente en la fotocatalisis heterogénea para comprobar su actividad fotocatalítica y se indica también el ancho de banda de cada uno.

¹⁸ Alvarado Rolon, O. (2014). *Modelado matemático y simulación de un reactor fotocatalítico para la oxidación selectiva de alcohol bencílico*. Tesis. México: Universidad Autónoma del Estado de México.

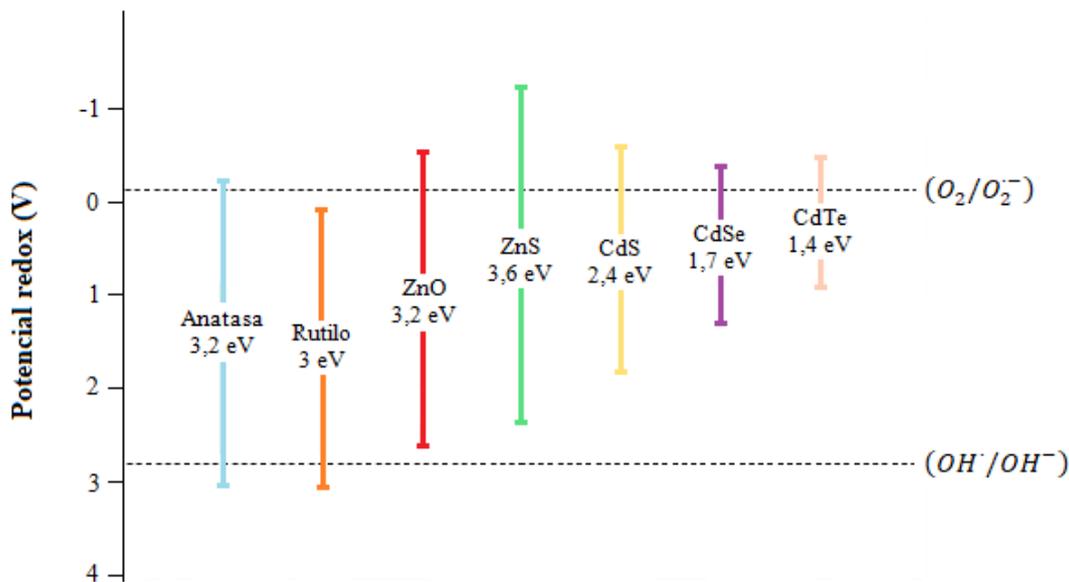


Figura M.4.4 Potencial redox de algunos semiconductores y su ancho de banda.

En la *Figura M.4.4* se aprecia que los semiconductores más empleados presentan bandas de valencia con un potencial oxidante de +1 a +3,5 V y bandas de conducción con un potencial de reducción que varía entre +0,5 y -1,5 V. De entre todos los fotocatalizadores, las dos formas alotrópicas naturales del TiO_2 , anatasa y rutilo, son las que se ajustan mejor a los pares redox $(\text{O}_2/\text{O}_2^-)$ y $(\text{OH}^-/\text{OH}^-)$.

Aunque existen fotocatalizadores con características similares, el dióxido de titanio es el más utilizado debido en buena medida a que presenta unas cualidades que le confieren cierta ventaja sobre el resto: unas excelentes propiedades ópticas y electrónicas, estabilidad química, baja toxicidad, elevada eficiencia y coste reducido.

El óxido de titanio (IV) o dióxido de titanio es un semiconductor de la familia de los óxidos de metales de transición y existen tres formas alotrópicas, anatasa, brookita, rutilo y muchas otras formas cristalinas que pueden obtenerse de la síntesis de este óxido a alta presión. Todas sus fases están constituidas por octaedros TiO_6 ligeramente elongados que se unen compartiendo vértices o aristas. En la anatasa los octaedros comparten vértices, dando una estructura tetragonal, en el rutilo el octaedro comparte aristas, dando estructuras tetragonales, y en la brookita se comparten ambos, aristas y vértices, para dar una estructura ortorrómbica (*Figura M.4.5*). Pero en el campo de las aplicaciones fotocatalíticas sólo se emplean la anatasa y el rutilo.

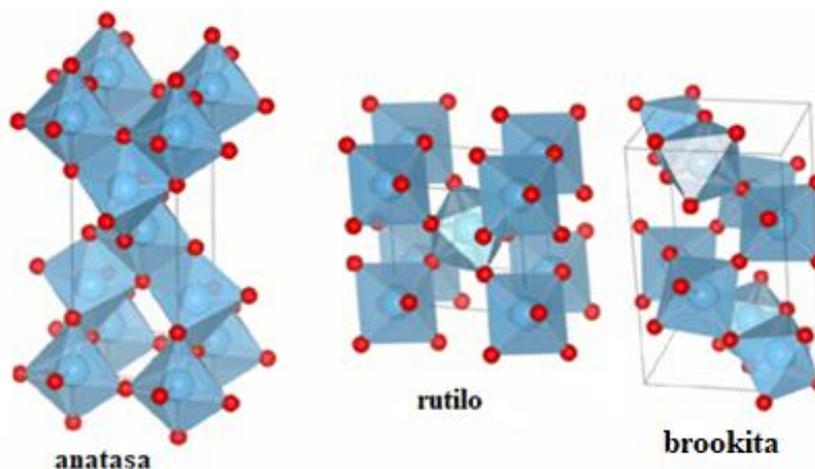


Figura M.4.5 Estructura cristalina de las distintas formas alotrópicas del TiO_2 .²⁵

Cuando el tamaño de las partículas de las dos fases es el mismo, la fase anatasa es la más estable termodinámicamente a los tamaños inferiores a 11 nm; mientras que predomina la fase rutilo cuando el tamaño de las partículas es mayor a 35 nm. El valor de energía de la banda prohibida es de aproximadamente 3,23 eV para la anatasa y de 3,02 eV para el rutilo.

La anatasa suele presentar mejor eficiencia fotocatalítica y rendimiento cuántico, porque presenta mayor superficie activa y densidad de sitios activos en la superficie para la adsorción de sustancias y catálisis.

El dióxido de titanio es un semiconductor sensible a la luz, que absorbe radiación electromagnética cerca de la región UV. Es anfótero; no es atacado por la mayoría de los agentes orgánicos e inorgánicos y se disuelve en ácido sulfúrico concentrado. Es el material semiconductor más resistente a la corrosión química y a la fotocorrosión. Por otra parte, el TiO_2 no se degrada en los ciclos catalíticos repetidos de los que constan las fotocatalisis heterogéneas.¹²

²⁵ Prieto Mahaney, O. (2009). *Estudio sobre las dependencias intrínsecas de las actividades fotocatalíticas sobre las propiedades estructurales y físicas de fotocatalizadores de óxido de titanio (IV)*. Universidad de Hokkaido.

¹² Anexo I. "Uso del dióxido de Titanio (TiO_2) como catalizador". Máster Universitario en Ingeniería del Agua. 2010. E.U. Politécnica, Universidad de Sevilla.

El catalizador más empleado para este proceso es el producido por la compañía alemana Evonik-Degussa, con el nombre Aeroxide P25. El TiO₂-P25 contiene un 70-80% de anatasa y un 20-30% de rutilo; además posee una excelente actividad fotocatalítica y una elevada eficiencia; ésta última se atribuye a la mezcla entre rutilo y anatasa que favorece la transferencia de electrones entre la banda de conducción de la anatasa a la del rutilo, mejorando la separación de cargas y por tanto la fotoactividad.

El dióxido de titanio P25 tiene las propiedades físico-químicas que se muestran en la *Tabla M.4.2*.

Tabla M.4.2 Especificaciones del catalizador comercial P25.

PROPIEDADES	AEROXIDE P25
Área específica (m ² /g)	50
pH en suspensión (4% p/v)	3,5-4,5
Tamaño de partícula	~ 20 nm*
Densidad aparente (g/L)	~ 130
Pérdida de peso a 150 °C, 2 h (%)	< 1,5
Pérdida por ignición (%)	< 2,0
Pureza, TiO ₂ (%)	> 99,5

*Tamaño de partícula cristalina primario.

Los potenciales de banda de valencia y de conducción de este material se han calculado en +2,9 y -0,3 V, respectivamente, a pH=0.

4.6 DESINFECCIÓN MEDIANTE LUZ ULTRAVIOLETA

La luz ultravioleta es la porción del espectro electromagnético que se encuentra entre los rayos X y la luz visible. La característica principal de la luz UV es que un intervalo específico de sus longitudes de onda, el comprendido entre los 200 y los 300 nm, se clasifica como germicida, es decir, puede inactivar microorganismos como bacterias, virus y protozoos. Esta capacidad ha permitido que sea una alternativa de desinfección para aguas potables y residuales puesto que consigue la inactivación, en pocos segundos, de los microorganismos presentes en la misma sin la producción de subproductos dañinos.

La desinfección ultravioleta inactiva los microorganismos por absorción de la luz, la cual origina una reacción fotoquímica que altera los compuestos moleculares esenciales en la función celular. La desinfección tiene lugar como consecuencia de la inactivación del ácido desoxirribonucleico (ADN) de los microorganismos. Los ácidos nucleicos son los puntos de ataque de la radiación UV.²¹

El espectro ultravioleta se define en cuatro regiones:

- ❖ UV al vacío entre 100 y 200 nm.
- ❖ UVC entre 200 y 280 nm.
- ❖ UVB entre 280 y 315 nm.
- ❖ UVA entre 315 y 400 nm.

La radiación más eficaz es la UV de onda corta con una longitud de onda alrededor de los 253,7 nm, como podemos ver en la *Figura M.4.6*. El alcance efectivo de estas radiaciones llega hasta 30 cm desde la lámpara.

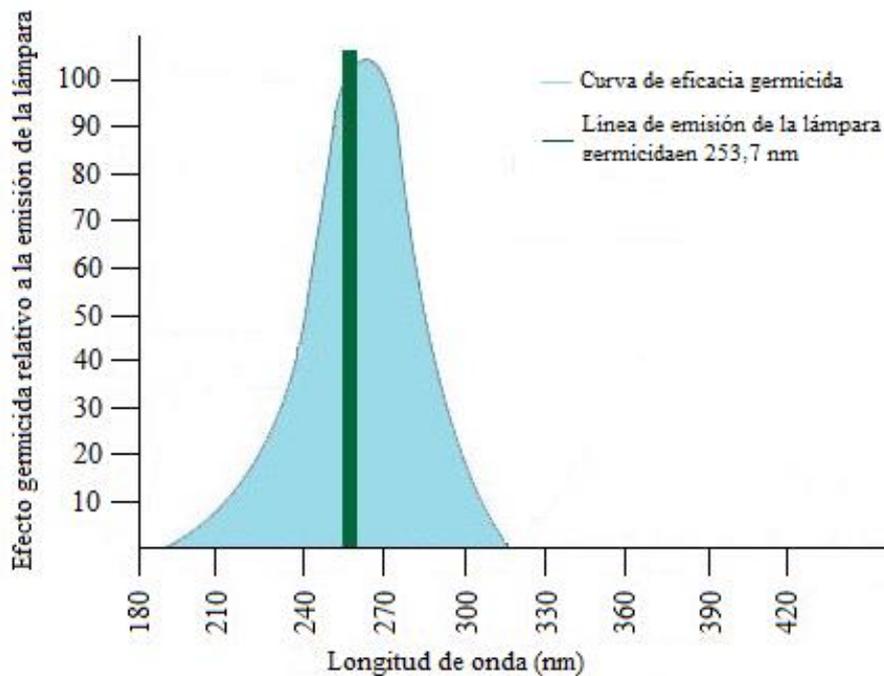


Figura M.4.6 Eficacia germicida de la Radiación Ultravioleta.

²¹ Sinnott, R.K “Chemical Engineering Design” en Elsevier Butterworth Heinemann, vol.6, p.637.

En los procesos de fotocatalisis heterogénea la radiación puede aportarse mediante iluminación artificial (lámparas) o natural (radiación solar). No obstante, con el uso de estas últimas hay cantidades significativas de UVB y UVC que no alcanzan la Tierra debido a la absorción de radiación de longitud de onda corta por la capa de ozono. Por ello, se emplean fuentes artificiales de UV que ofrecen una mayor concentración de luz.

Generalmente en estos procesos se utilizan lámparas de mercurio de baja presión pero se han utilizado lámparas de amalgama de baja presión debido a que permiten una alta emisión de UV, una mayor estabilidad sobre un amplio rango de temperaturas y una duración de vida más larga. Este tipo de lámparas contienen en su interior una aleación de mercurio con otros metales y funcionan haciendo pasar una corriente eléctrica mediante un arco eléctrico que se encuentra en el interior de la lámpara. La radiación ultravioleta resulta del flujo de electrones del vapor de mercurio ionizado, entre los electrodos de la lámpara.

4.6.1 LÁMPARA DE AMALGAMA DE BAJA PRESIÓN

Este tipo de lámparas tienen un diseño lineal y delgado con distintas longitudes y un diámetro que puede variar entre 15 y 32 mm. Operan de forma óptima a una temperatura de pared de lámpara de 90-120°C, por lo que habrá que eliminar el calor generado por la lámpara de manera que no impida un buen control de la temperatura en la zona de reacción. Por lo que para la eliminación de este calor se refrigera la lámpara con aire, y en caso de ser necesario se refrigera aún más a la cámara de reacción mediante una camisa externa por la que circule otro fluido refrigerante.

Aproximadamente el 45% de la energía eléctrica consumida por la lámpara se convierte en energía UVC de la longitud de onda de 254 nm. La irradiancia UVC de estas fuentes varía entre 110 y 1.160 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ y tienen una vida útil de 17.000 h.

Estas lámparas están recubiertas por una funda de sílice vítrea para aislarlas térmicamente del agua permitiendo así controlar la temperatura óptima de operación de las lámparas independientemente de la temperatura del agua. En este caso se ha empleado una funda de cuarzo natural dopado con 0,01-0,02% de dióxido de titanio, debido a que previene la formación de ozono cuando la radiación con una longitud de onda de 185 nm interacciona con el oxígeno. La vida útil de las fundas es aproximadamente de 4 a 8 años.

Por otro lado, la limpieza de las lámparas ultravioleta de baja presión es fundamental para garantizar la máxima salida de UV disponible para la descontaminación y minimizar el consumo de energía. Esto se puede realizar de dos formas diferentes. Una forma consiste en extraer el banco ultravioleta entero y depositarlo en una plataforma de lavado con agua, y después en el interior de un baño ácido agitado con aire. Sin embargo, el método más válido es usando la limpieza automática de las fundas incorporando soluciones químicas ya que ahorra tiempo y dinero al operario.

4.7 REACTORES FOTOCATALÍTICOS

4.7.1 CONFIGURACIÓN DEL FOTOCATALIZADOR

Dentro de la fotocatalisis heterogénea, utilizando como semiconductor el TiO_2 , la configuración de un reactor fotocatalítico puede contener el catalizador fijo o inmovilizado (impregnado a una superficie) o el catalizador suspendido en una disolución (Figura M.4.7).

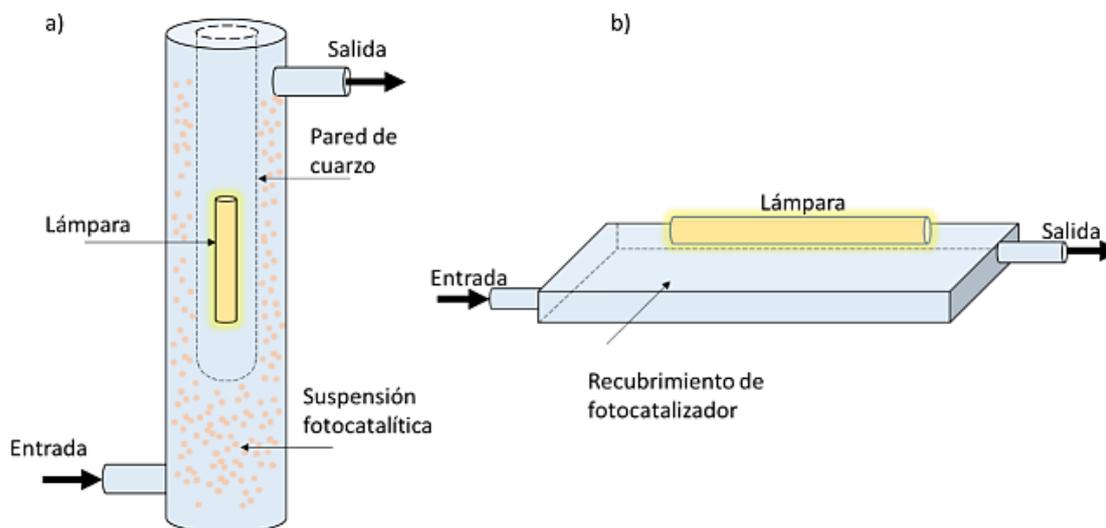


Figura M.4.7 a) Reactor fotocatalítico en suspensión, b) Reactor de fotocatalizador fijo.²⁴

²⁴ Domínguez Arvizu, J.L. (2017). *Determinación de la velocidad de absorción volumétrica local de fotones en el espectro visible del fotocatalizador NiFe_2O_4 en suspensión acuosa*. Tesis. México: Centro de investigación en materiales avanzados departamento de estudios de posgrado.

Cuando se utiliza el catalizador fijado a una superficie inerte, el área superficial expuesta a la radiación disminuye notablemente, reduciéndose el número de sitios activos y se dificulta la transferencia de masa, surgiendo limitaciones de difusión. Este efecto es más intenso cuando se aumenta la potencia de iluminación y la velocidad de reacción no crece al hacerlo el flujo de fotones, debido al desaprovechamiento energético de una buena parte de la fuente de radiación. Otro de los problemas que presenta este sistema es el aumento de la pérdida de carga del reactor, lo que supone la necesidad de instalar sistemas de bombeo de mayor potencia que conlleva a un incremento en los costes energéticos. Sin embargo, emplear el sistema inmovilizado resulta práctico por su fácil separación del agua y su recuperación en unas condiciones óptimas que permiten su reutilización.

Con respecto a los reactores que emplean el catalizador en suspensión, éstos presentan un área superficial del fotocatalizador suficiente para favorecer la transferencia de masa, lo que ayuda a la difusión de las especies químicas hacia la superficie de las partículas del fotocatalizador. No obstante, en estos sistemas es complicado alcanzar una iluminación homogénea en todas las partículas del semiconductor debido principalmente a que la penetración de la radiación en la suspensión es limitada, y también porque las partículas cercanas a la fuente de radiación hacen sombras que no permiten la iluminación de aquellas partículas más alejadas. Además, la operación con el catalizador en suspensión requiere un tratamiento posterior para la separación y recuperación del fotocatalizador al terminar cada tratamiento fotocatalítico, lo que supondría un coste adicional.

Especialmente necesario es tener una actividad fotocatalítica eficiente, ya que beneficia la interacción de los contaminantes con la superficie del semiconductor y éstos pueden ser degradados mediante diferentes mecanismos de reacción. De este modo, se prefiere la utilización del fotocatalizador en suspensión, aunque ello requiera un paso adicional para su posterior separación del agua.

4.7.2 CONFIGURACIÓN DEL FOTORREACTOR

Existen varios factores importantes a la hora de elegir la geometría del fotorreactor, pero es fundamental tener en cuenta que tanto en los reactores en suspensión como en reactores con el fotocatalizador fijo la profundidad de penetración de la luz está limitada por la absorción de las partículas de catalizador.

Por consiguiente, es necesario determinar cuánta luz es absorbida y la eficiencia final del proceso fotocatalítico para así escoger la geometría más adecuada.

A continuación se plantean diferentes configuraciones para el reactor fotocatalítico, empleando el catalizador en suspensión:

- ❖ Reactor anular: este tipo de reactores están formados por dos cilindros concéntricos que definen una región anular por donde circula la solución a tratar con el catalizador en suspensión. El cilindro interior es transparente a un intervalo específico de longitud de onda y en el interior se coloca la fuente de radiación, consiguiendo así un campo irradiado simétrico. Esta geometría permite un aprovechamiento máximo en cuanto a área catalítica irradiada.
- ❖ Reactor de flujo ascendente: en el cual varias lámparas son colocadas en forma perpendicular al flujo de la suspensión.
- ❖ Reactor con vórtice inducido: en este caso, el cilindro interior gira provocando torbellinos en el flujo para facilitar la irradiación homogénea del catalizador.

De acuerdo con lo establecido en la literatura, los fotorreactores con una configuración anular son los que dan mejores resultados en cuanto al rendimiento energético.

4.8 PARÁMETROS QUE AFECTAN AL PROCESO FOTOCATALÍTICO

En este apartado se describen los parámetros de operación que resultan determinantes en la eficiencia del proceso debido a la influencia que tienen en la velocidad de degradación.

4.8.1 CONCENTRACIÓN DE AGENTE OXIDANTE

Los agentes oxidantes son imprescindibles para la reacción de oxidación ya que pueden mejorar la eficiencia del proceso fotocatalítico facilitando la captura de los electrones generados en la banda de conducción del semiconductor y disminuyendo, por tanto, la probabilidad de recombinación del par e^-/h^+ . A su vez, estos tienen la función de mantener la reacción equilibrada evitando la acumulación de electrones en la superficie del TiO_2 . Aunque el oxígeno es el oxidante más empleado habitualmente, también se puede hacer

uso de otros oxidantes químicos adicionales, como H_2O_2 , BrO_3^- o $S_2O_8^{2-}$. No obstante, en este trabajo, se ha empleado únicamente el O_2 como oxidante, debido a que, además de poseer una buena eficiencia como aceptor de e^- , su disponibilidad es muy elevada y tiene un bajo coste dado que puede ser obtenido directamente del aire atmosférico. Asimismo, el oxígeno no compite con las moléculas de contaminantes durante la etapa de adsorción en la superficie del TiO_2 , ya que los centros activos superficiales en los que se produce la reducción y la oxidación son distintos.

4.8.2 CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTE

Los sustratos a oxidar se suelen encontrar en efluentes de plantas de tratamientos de aguas residuales en niveles de concentración muy bajos (ng- μ g/L); el Grupo de Vertidos Industriales y Laboratorio de la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS), informa que las concentraciones máximas de simazina, propazina e isoproturon a la entrada de una EDAR son de 0,164 μ g/L, 0,095 μ g/L y 0,360 μ g/L, respectivamente.¹³ Sin embargo, a la salida de las estaciones depuradoras se continúan detectando estos plaguicidas, y alguno de ellos con cargas superiores a los valores iniciales, destacando el caso de la simazina que alcanza una concentración media de 0,318 μ g/L.

En el presente proyecto se ha decidido trabajar con concentraciones iniciales de 1 μ g/L de cada compuesto, que es un compromiso entre una concentración lo suficientemente alta para poder seguir una cinética de degradación y lo suficientemente baja como para simular las condiciones reales encontradas en las estaciones depuradoras.

4.8.3 CONCENTRACIÓN DE CATALIZADOR

En procesos fotocatalíticos heterogéneos en los que los reactores trabajan con el TiO_2 en suspensión, la dosificación del catalizador es un parámetro de gran importancia puesto que puede afectar a la velocidad de degradación de los contaminantes emergentes.

¹³ Marín Galvín, R. et al. (2009). "Contaminación convencional, sustancias prioritarias y contaminantes emergentes en saneamientos públicos españoles" en las XXIX Jornadas Técnicas de la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS). Gijón.

Generalmente a medida que aumenta la concentración de catalizador se observa un aumento de la velocidad de fotodegradación. No obstante, al incrementar la carga del catalizador a un cierto valor, la velocidad de reacción disminuye y se hace constante e independiente de la concentración de TiO_2 , como consecuencia de la disminución del grado de iluminación alcanzado en el interior del reactor.

Este límite coincide con la concentración de catalizador para la cual todas las partículas, es decir, toda la superficie expuesta, están iluminadas. En este contexto, una concentración muy elevada de sólido catalítico, creará un grado de turbidez que provocará que la radiación penetre sólo hasta una cierta distancia (paso óptico) inferior a la profundidad del reactor por efecto de la dispersión de la luz (“light scattering”). En estas condiciones, el exceso de concentración de catalizador provoca un efecto “pantalla” que da lugar a una disminución de la eficiencia fotónica del proceso.⁹ Teniendo en cuenta lo anterior, es recomendable trabajar con una carga de fotocatalizador cercana al punto donde se alcanza el estado estacionario.

En este trabajo se ha escogido una concentración de 0,4 g/L de catalizador, que es congruente con lo reportado en la literatura para el catalizador TiO_2 Degussa P-25 y este tipo de reactores⁸; no obstante, la concentración del fotocatalizador depende íntimamente de la intensidad de la fuente de luz y las dimensiones del fotorreactor por lo que una vez se conozcan estas propiedades será necesario encontrar el valor óptimo de éste.

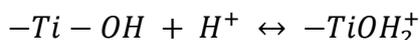
4.8.4 pH DEL MEDIO

El pH afecta a las propiedades superficiales del catalizador, así como a la carga superficial de las partículas, y por tanto al tamaño de los compuestos a degradar.

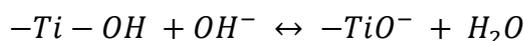
⁹ Carbajo Olleros, J. (2013). *Aplicación de la fotocatalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO_2* . Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.

⁸ Li Puma, G. Khor, J.N. Brucato, A. (2004) “Modeling of an annular photocatalytic reactor for water purification: Oxidation of pesticides” en *Environmental Science & Technology*, vol. 38, issue. 13, p. 3737-3745.

El valor del pH en el que la superficie de un óxido metálico tiene carga neutra, es el punto de carga cero o punto isoeléctrico (pH_{pzc}). En el caso del dióxido de titanio, el valor del PZC se encuentra en el rango entre 5,6 y 6,8. De manera que cuando el pH sea inferior al punto de carga cero ($\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$), la superficie catalítica estará cargada positivamente:



Mientras que cuando el pH de la disolución sea superior al valor del punto isoeléctrico ($\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$), la superficie del TiO_2 estará cargada negativamente:



Estos dos estados afectarán a la adsorción y desorción de los reactantes e intermedios de reacción sobre la superficie del catalizador y al estado de agregación del catalizador, y por tanto a la eficiencia fotocatalítica.

Dado que la mayoría de los autores concluyen que no existen apenas diferencias significativas en la velocidad de fotorreacción a pH no muy alejados del punto de carga cero, en el rango entre 4 y 9; se ha seleccionado un valor de pH de 7,56, que corresponde al pH original del agua residual que sale del decantador secundario de la EDAR y se introducirá en el reactor fotocatalítico. Se trata de un valor cercano al utilizado en un trabajo similar realizado y referenciado en la literatura,⁸ donde la degradación de estos herbicidas da resultados óptimos a un pH de 7. Además justar el pH supondría un coste adicional en el proceso fotocatalítico.

4.8.5 TEMPERATURA

Los procesos fotocatalíticos presentan la ventaja de poder operar a temperatura ambiente ya que a causa del mecanismo fotónico no se requieren elevadas temperaturas. Operar a temperaturas elevadas ($> 80^\circ\text{C}$) resulta negativo para el proceso fotocatalítico al promover la recombinación de cargas y desfavorecer la adsorción de moléculas orgánicas en la superficie del TiO_2 .

⁸ Li Puma, G. Khor, J.N. Brucato, A. (2004) "Modeling of an annular photocatalytic reactor for water purification: Oxidation of pesticides" en Environmental Science & Technology, vol. 38, issue. 13, p. 3737-3745.

Por el contrario, al trabajar con temperaturas muy bajas (≤ 0 °C) la etapa limitante del proceso será la desorción de los distintos productos intermedios y finales de reacción.⁹ Como consecuencia, el rango óptimo de temperaturas se localiza entre los 20 y los 80 °C.¹⁷

El hecho de que los procesos fotocatalíticos puedan funcionar a temperatura ambiente hace que sean atractivos para la purificación fotocatalítica del agua al no precisar un aporte energético adicional, lo que mejora considerablemente la economía del proceso.

Por todo ello, se ha decidido que la temperatura de trabajo es la ambiental, oscilando alrededor de los 20°C. Se ha utilizado este valor como media de referencia para todo el año, aunque en invierno puede bajar a los 16°C y en verano puede estar entorno los 22-23°C. Este valor está en el rango óptimo de temperaturas de operación del proceso fotocatalítico.

⁹ Carbajo Olleros, J. (2013). *Aplicación de la fotocatalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO₂*. Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.

¹⁷ Malato, S. et al. (2003). "Effect of operating parameters on the testing of new industrial titania catalysts at solar pilot plant scale" en *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 42, issue 4, p. 349-357.

5. NORMAS Y REFERENCIAS

5.1 DISPOSICIONES LEGALES Y NORMAS APLICADAS

Durante la realización de este proyecto se han tenido presentes las siguientes normas:

- ❖ REAL DECRETO 1627/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud laboral en los lugares de trabajo.
- ❖ Directiva 2013/39/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 12 de agosto de 2013 por la que se modifican las Directivas 2000/60/CE y 2008/105/CE en cuanto a las sustancias prioritarias en el ámbito de la política de aguas.
- ❖ REAL DECRETO 508/2007, de 20 de abril, por el que se regula el suministro de información sobre emisiones del Reglamento E-PRTR y de las autorizaciones ambientales integradas.
- ❖ Ley 31/1995, del 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- ❖ Normas Tubular Exchanger Manufacturers Association (T.E.M.A) para el diseño del intercambiador de calor de coraza y haz de tubos.
- ❖ UNE-EN ISO 5455 – Dibujos técnicos. Escalas. (ISO 5455:/979).
- ❖ UNE 157001-2014, “Criterios generales para la elaboración de los documentos que constituyen un proyecto técnico”.
- ❖ UNE 1032 – Documentación técnica de productos. Escritura.
- ❖ UNE 1032 – Dibujos técnicos. Principios generales de representación.

5.2 BIBLIOGRAFÍA

La bibliografía utilizada durante la realización del proyecto es la siguiente:

- ¹ TERÁN SOLÍZ, M. (2016). *Estudio de la aplicación de procesos de oxidación avanzada a aguas contaminadas*. Trabajo Final de Grado. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

- ² SUÁREZ, J. Y JÁCOME, A. (2007). *Eliminación de nitrógeno de las aguas residuales. Procesos de nitrificación y desnitrificación*. Tratamientos avanzados de depuración. Universidad de da Coruña.
- ³ METCALF & EDDY, INC. (2004). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Mc Graw Hill, New York.
- ⁴ STUART, M. LAPWORTH, D. CRANE, E. HART, A. (2012). “Review of risk from potential emerging contaminants in UK groundwater” en *Science of the Total Environment*, vol. 416, p. 1-21.
- ⁵ HERNÁNDEZ MUÑOZ, A. HERNÁNDEZ LEHMANN, A. GALÁN MARTÍNEZ, P. (2000). *Manual de depuración Uralita. Sistemas para depuración de aguas residuales en núcleos de hasta 20.000 habitantes*. Thomson Paraninfo, Spain.
- ⁶ HERRMAN, J.M. (1999). “Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants” en *Catalysis Today*, vol. 53, p. 115-129.
- ⁷ GIMÉNEZ, J. CURCÓ, D. QUERAL, M.A. (1999). “Photocatalytic treatment of phenol and 2,4-dicholophenol in a solar plant in the way to scaling-up” en *Catalysis Today*, vol.54, p. 229-243.
- ⁸ LI PUMA, G. KHOR, J.N. BRUCATO, A. (2004). “Modeling of an annular photocatalytic reactor for water purification: Oxidation of pesticides” en *Environmental Science & Technology*, vol. 38, issue. 13, p. 3737-3745.
- ⁹ CARBAJO OLLEROS, J. (2013). *Aplicación de la fotocatalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO2*. Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
- ¹⁰ BLANCO GÁLVEZ, J. et al. (2001). *Diseño de reactores para fotocatalisis: Evaluación comparativa de las distintas opciones*. Madrid: CYTED. 243-266.
- ¹¹ LI PUMA, G. PUDDU, V. GORA, A. TOEPFER, B. (2006). “Photocatalytic oxidation of herbicides in single-component and multicomponent systems: reaction kinetics analysis” en *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 65, issues. 1-2, p. 1-10.

¹² Anexo I. “Uso del dióxido de Titanio (TiO₂) como catalizador”. Máster Universitario en Ingeniería del Agua. 2010. E.U. Politécnica, Universidad de Sevilla.

¹³ MARÍN GALVÍN, R. et al. (2009). “Contaminación convencional, sustancias prioritarias y contaminantes emergentes en saneamientos públicos españoles” en las XXIX Jornadas Técnicas de la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS). Gijón.

¹⁴ MARÍN GALVÍN, R. (2016). “Contaminantes emergentes y metales pesados en aguas residuales: un caso de estudio”. Emacsa. Disponible en <http://www.emacsa.es/wp-content/uploads/2014/02/RETEMA193-2016-68-74.pdf>

¹⁵ PELIZZETI, E. et al. (1992). “Identification of photocatalytic degradation pathways of 2-Cl-s-triazine herbicides and detection of their decomposition intermediates” en *Chemosphere*, vol. 24, issue 7, p. 891-910.

¹⁶ CRAIG, S. TURCHI, D. OLLIS, F. (1989). “Mixed reactant photocatalysis: intermediates and mutual rate inhibition” en *Journal of Catalysis*, vol. 119, issue 2, p. 483-496.

¹⁷ MALATO, S. et al. (2003). “Effect of operating parameters on the testing of new industrial titania catalysts at solar pilot plant scale” en *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 42, issue 4, p. 349-357.

¹⁸ ALVARADO ROLON, O. (2014). *Modelado matemático y simulación de un reactor fotocatalítico para la oxidación selectiva de alcohol bencílico*. Tesis. México: Universidad Autónoma del Estado de México.

¹⁹ DE LASA, H. SERRANO, B. SALAICES, M. (2005). “Photocatalytic reaction engineering”. Nueva York: Springer Science-h Business Media, LLC.

²⁰ HERNÁNDEZ MUÑOZ, A. (2001). *Depuración y desinfección de aguas residuales*. Madrid: Colegio de ingeniero de caminos, canales y puertos.

²¹ SINNOTT, R.K. “Chemical Engineering Design” en Elsevier Butterworth Heinemann, vol.6, p.637.

²² Coulson, J.M. Richardson, J.F. (2005). “Chemical Engineering Design” en Elsevier Butterworth Heinemann, vol.6, Fourth edition.

²³ ANTONIO BARBA, J. (2003). *Operaciones básicas de transmisión de calor*. Universitat Jaume I materials.

²⁴ DOMÍNGUEZ ARVIZU, J.L. (2017). *Determinación de la velocidad de absorción volumétrica local de fotones en el espectro visible del fotocatalizador NiFe₂O₄ en suspensión acuosa*. Tesis. México: Centro de investigación en materiales avanzados departamento de estudios de posgrado.

²⁵ PRIETO MAHANEY, O. (2009). *Estudio sobre las dependencias intrínsecas de las actividades fotocatalíticas sobre las propiedades estructurales y físicas de fotocatalizadores de óxido de titanio (IV)*. Universidad de Hokkaido.

²⁶ LI PUMA, G. TOEPFER, B. GORA, A. (2007). “Photocatalytic oxidation of multicomponent systems of herbicides: scale-up of laboratory kinetics rate data to plan scale” en Applied Catalysis B: Environmental, vol. 124, issues. 3-4, p. 124-132.

²⁷ HAMMOCK GARY, L. (2011). *Cross-Flow, Staggered-Tube Heat Exchanger Analysis for High Enthalpy Flows*. Tesis Doctoral. Knoxville: Universidad de Tennessee.

²⁸ KIM, J. et al. (2015). “Acoustic resonance and pressure drop through a staggered tube bundle in a compact heat exchanger” en Elsevier Butterworth Heinemann, vol.91, p.63-67.

²⁹ GORA, A. TOEPFER, B. PUDDU, V. LI PUMA, G. (2006). “Photocatalytic oxidation of herbicides in single-component and multicomponent systems: Reaction kinetics analysis” en Applied Catalysis B: Environmental, vol. 65, issues 1-2, p. 1-10.

²⁹ GONZÁLVEZ MACIÁ, J.M. (2019). *Frío y climatización*. Universitat Politècnica de Valencia.

³⁰ Apuntes EQ1031 Proyectos de Ingeniería.

³¹ MAS ORTEGA, J.G. (2016). *Análisis coste/beneficio aplicado a los procesos de depuración y reutilización*. Trabajo Fin de Máster. Alicante: Universitat d’Alacant.

- ³² XUE, X.D. FU, J.F. ZHU, W.F, GUO, X.C. (2008). *Desalination*, vol.225, p.29-40.
- ³³ FERNÁNDEZ-IBAÑEZ, P. BLANCO, J. MALATO, F.J. (2003). *Water Research*, vol.37, p. 3180-3188.
- ³⁴ COMOS, J.A. (2014). “Reutilización de las aguas depuradas en la vega de Valencia” en Aplicación de lodos y aguas regeneradas en agricultura. 1ª Jornada sobre el aprovechamiento de recursos disponibles en una EDAR. Valencia.
- ³⁵ GORA, A. TOEPFER, B. LI PUMA, G. (2006). “Photocatalytic oxidation of multicomponent solutions of herbicides: Reaction kinetics analysis with explicit photon absorption effects” en *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 68, p. 171-180.
- ³⁶ WARHEIT, DB. et al. (2007). “Desarrollo de un conjunto básico de pruebas de toxicidad utilizando partículas ultrafinas de TiO₂ como componente del manejo del riesgo de nanopartículas” en *Toxicology Letters*, vol.171, issue. 3, p. 99-110.
- ³⁷ PASSALÍA, C. (2010). *Modelado de un reactor fotocatalítico para la eliminación de contaminantes del aire*. Tesis Doctoral. México: Universidad Nacional del Litoral.

Así mismo, también se han consultado las páginas web citadas a continuación:

³⁸ https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2018/199194/TFG_OsmanIndustries_parte11.pdf

³⁹ http://www.emacsa.es/download/idi/Ponencia%20E-PRTR-Definitiva%20_7_.pdf

⁴⁰ <http://www.thermopedia.com/content/1211/>

⁴¹ https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/75442/ILUMINACION_GIE-3_2en1.pdf?sequence=1

⁴² <https://www.ingenierosindustriales.com/calculo-de-cargas-termicas-de-climatizacion/>

⁴³ <https://ingenieriacolaborativa.com/espesor-placa-tubular-de-un-intercambiador-de-calor/>

⁴⁴ <http://maquinariasyequiposindustriales.blogspot.com/2014/03/relacion-diametro-tuberia-caudal.html>

5.3 PROGRAMAS INFORMÁTICOS

Los programas informáticos empleados durante la realización del proyecto son los siguientes:

- ❖ Microsoft Word 2016
- ❖ Microsoft Excel 2016
- ❖ Microsoft Visio 2016
- ❖ Paint
- ❖ Autodesk Inventor 2019
- ❖ Autocad 2016
- ❖ Scilab 6.0.1
- ❖ Adobe Illustrator CC
- ❖ Octave 5.2.0

5.4 PLAN DE GESTIÓN DE LA CALIDAD

Todos los materiales que se empleen en la realización de las obras deberán cumplir las condiciones que se establezcan en todos los documentos que forman parte del presente proyecto.

6. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

Para facilitar la lectura y comprensión del presente proyecto, se procede a detallar las definiciones de términos complejos. Además, también se incluyen las abreviaturas y magnitudes empleadas.

6.1 DEFINICIONES

A continuación se definirán algunos conceptos que son importantes para el modelado de reactor fotocatalíticos.

Velocidad volumétrica local de absorción de fotones (LVRPA): es la cantidad de moles de fotones absorbidos por el catalizador por unidad de volumen y unidad de tiempo, en un punto dado dentro del reactor. Esta cantidad es importante porque es proporcional al número de huecos y electrones formados dentro de las partículas de catalizador, las cuales son responsables de llevar a cabo las reacciones de oxidación/reducción.

Contaminantes emergentes (CEs): son compuestos orgánicos de origen sintético o natural que tienen el potencial de llegar al medio ambiente causando efectos adversos sobre los ecosistemas y en consecuencia, en la salud humana, estando hoy en día la mayoría de ellos no regulados.

Coordenada acimutal (θ): es el ángulo que la proyección del vector de posición sobre el plano XY forma con el eje X.

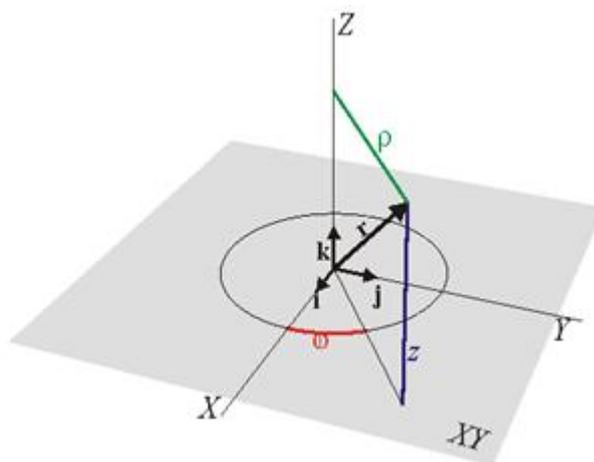


Figura M.6.1 Esquematización de las coordenadas cilíndricas y cartesianas.

Luz ultravioleta: la luz ultravioleta es la porción del espectro electromagnético que se encuentra entre la luz visible y los rayos X. El espectro ultravioleta está dividido en tres áreas designadas: UV-A, UV-B y UV-C. La longitud de onda comprendida entre los 200 y los 300 nm, que pertenece a la región UV-C, se clasifica como germicida, es decir, puede inactivar microorganismos como bacterias, virus y protozoos.

Fotocatalizador: un fotocatalizador es definido como una sustancia que es activada por la absorción de fotones y ayuda a acelerar una reacción, sin que este se consuma durante la reacción.

Coefficiente de absorción (κ_λ): representa la fracción de la radiación incidente que es absorbida por las partículas de fotocatalizador a lo largo del camino del haz de radiación.

Coefficiente de dispersión de fotones (σ_λ): es la fracción de fotones que son dispersados por las partículas de catalizador.

Coefficiente de dispersión de albedo (ω): es el grado de dispersión en el medio de reacción. Cabe destacar que la dispersión de albedo debe ser evaluada empleando los coeficientes de dispersión y de absorción determinados experimentalmente bajo las condiciones prevalecientes en la suspensión.

6.2 NOMENCLATURA

En la *tabla M.6.3* se muestra la simbología empleada en el proyecto.

Tabla M.6.3 Simbología empleada.

LETRA	SIGNIFICADO	Uds.
C_{cat}	Concentración de catalizador	kg/m^3
C_j	Concentración de sustrato	kg/m^3
C_{jo}	Concentración inicial de sustrato	kg/m^3
H	Longitud del reactor	m
I_0	Intensidad de la radiación	W/m^2
I_λ	Intensidad de radiación espectral	$W/m^3 \cdot nm$
K_j	Constante de adsorción en modelo L-H	L/mol

Diseño de un reactor fotocatalítico para la degradación de contaminantes emergentes presentes en el efluente de una Estación Depuradora de Aguas Residuales

LETRA	SIGNIFICADO	Uds.
S_1	Emisión de la radiación de la lámpara	W/m
k_j	Constante cinética en modelo L-H	mol/L·min
k_T	Constante cinética independiente de la radiación absorbida	mol/s·m ³ ·W ^{0.5}
r_j	Velocidad de la reacción	mol/s·m ³
r_l	Radio de la lámpara	m
r	Coordenada radial	-
z	Coordenada axial	m
z^*	Coordenada axial adimensional	-
L	Longitud de la lámpara	m
LVRPA	Velocidad volumétrica de absorción de fotones	W/m ³
p_b	Probabilidad de radiación hacia atrás	-
p_f	Probabilidad de radiación hacia adelante	-
p_s	Probabilidad de radiación hacia los lados	-
R	Radio externo del anillo	m
a	Parámetro del modelo de seis flujos	-
b	Parámetro del modelo de seis flujos	-
V	Volumen total de fluido	m ³
V_r	Volumen del reactor	m ³
ω_{corr}	Parámetro del modelo de seis flujos	-
γ	Parámetro del modelo de seis flujos	-
τ	Espesor óptico	-
α	Parámetro geométrico	-
β	Parámetro geométrico	-
δ	Espesor del anillo	m
η	Relación entre el radio interno y el radio externo del anillo	-
Φ	Función de fase de dispersión	-
λ	Longitud de onda de radiación	m
φ	Ángulo de dispersión	-
κ	Coefficiente de absorción específico	m ² /kg
σ	Coefficiente de dispersión específico	m ² /kg
ω	Albedo de dispersión	-
τ_{app}	Espesor óptico aparente	-
ξ	Coordenada radial del espacio de reacción	m
ξ^*	Coordenada radial adimensional del espacio de reacción	-
θ	Coordenada acimutal	rad

LETRA	SIGNIFICADO	Uds.
v	Velocidad del fluido	m/s
ρ	Densidad del fluido	kg/m ³
μ	Viscosidad dinámica	kg/m·s
D_e	Diámetro equivalente	m
T	Temperatura	°C
Re	Número de Reynolds	-
Q	Caudal del agua	m ³ /s
D_{ot}	Diámetro externo de una lámpara	m
p	Distancia entre los centros de lámparas adyacentes	m
S_c	Área de la sección transversal del reactor	m ²
N_{ft}	Número de filas de tubos en el espacio de reacción	-
χ	Factor de corrección	-
f	Factor de fricción	-
v_{max}	Velocidad máxima del fluido	m/s
p_L	Distancia entre centros de fuentes en la dirección y del plano normal al flujo	m
p_T	Distancia entre centros de fuentes en la dirección z del plano normal al flujo	m
P_L	Distancia adimensional entre centros de fuentes en la dirección y del plano normal al flujo	-
P_T	Distancia adimensional entre centros de fuentes en la dirección z del plano normal al flujo	-
ΔP	Caída de presión	N/m ²
D	Diámetro de la coraza	m
l	Longitud del reactor	m
d	Diámetro de la lámpara	m
N	Número de lámparas ultravioletas	-
q	Carga térmica	W
P	Potencia	W
m^a	Caudal másico del fluido	kg/s
C_p^a	Calor específico del fluido	J/kg·°C
T_{salida}^a	Temperatura de salida del fluido	°C
$T_{entrada}^a$	Temperatura de entrada del fluido	°C

6.3 ACRÓNIMOS

En la *tabla M.6.4* se recogen los acrónimos utilizados en el presente proyecto.

Tabla M.6.4 Acrónimos utilizados.

ACRÓNIMO	SIGNIFICADO
LVRPA	Velocidad volumétrica de absorción de fotones
SFM	Modelo de seis flujos
LSSE	Fuente de emisión esférica lineal
CEs	Contaminantes emergentes
BC	Banda de conducción de alta energía
BV	Banda de valencia de baja energía
L-H	Modelo de Langmuir Hinshelwood
RTE	Ecuación de transferencia de la radiación
UV	Radiación ultravioleta
EDAR	Estación Depuradora de Aguas Residuales

7. REQUISITOS DE DISEÑO

En el presente proyecto se realiza el diseño y dimensionamiento de un reactor fotocatalítico para su aplicación como tratamiento terciario de una EDAR localizada en un municipio de la provincia de Castellón. Por lo tanto, el agua residual que se va a tratar ya cumple con los valores límites medioambientales marcados por el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo. Sin embargo, el efluente a la salida del decantador secundario está depurado biológicamente pero no químicamente, por lo que la incorporación de dicho equipo en la planta depuradora permite conseguir un alto rendimiento de descontaminación del agua gracias a la eliminación de contaminantes emergentes.

Para el diseño del reactor, se han fijado previamente una serie de condiciones de entrada de acuerdo con lo recopilado en la literatura. Estas condiciones iniciales se recogen en la *Tabla M.7.1*.

Tabla M.7.1 Condiciones de entrada del agua residual al reactor.

CARACTERÍSTICA	VALOR	UNIDADES
$C_{0isoproturón}$	1	$\mu\text{g/L}$
$C_{0simazina}$	1	$\mu\text{g/L}$
$C_{0propazina}$	1	$\mu\text{g/L}$
C_{TiO_2}	0,40	g/L
T_0	20	$^{\circ}\text{C}$
pH	7,56	-

Los contaminantes emergentes que se han utilizado como modelo son la propazina, la simazina y el isoproturon. Las sustancias seleccionadas son altamente representativas, tanto desde el punto de vista de su toxicidad como por su presencia habitual, y con este tratamiento se persigue alcanzar una conversión mínima del 70%, anticipándose a una posible legislación futura.

Así mismo, para llevar a cabo el presente proyecto será necesario conocer las características de la corriente alimento y el catalizador que se va a emplear en el proceso de fotocatalisis.

7.1 CARACTERÍSTICAS DE LA CORRIENTE DE AGUA RESIDUAL

La corriente de agua residual inicialmente se encuentra a una temperatura de 20 °C, siendo el caudal de agua que se alimenta en el reactor de 23.581 m³/día. Dado que el caudal a tratar es grande, la temperatura de superficie del sistema de lámparas a 105 °C no modifica prácticamente la temperatura del agua, por lo que se puede aproximar a un proceso isoterma. Las propiedades del agua se muestran en la *Tabla M.7.2*.

Tabla M.7.2 Propiedades de la corriente de agua a su temperatura.

PROPIEDADES	VALOR
T (°C)	20
T ₀ (°C)	20
C _p (J/(kg·°C))	4.186
ρ (kg/m ³)	998,29
μ (kg/m·s)	0,001
pH	7,56

7.2 CARACTERÍSTICAS DEL CATALIZADOR

El catalizador se presenta con un tamaño de partícula de aproximadamente 20 nm. Además, se dispone de suspensión comercial de TiO₂-P25 ya preparada y se bombea a un mezclador antes del reactor.

8. ANÁLISIS DE SOLUCIONES

La configuración del reactor fotocatalítico para poder tratar el caudal de entrada de la planta depuradora requiere un sistema de lámparas UV. Las fuentes pueden estar distribuidas en su interior de distintas maneras:

- ❖ En el punto donde finaliza el campo de radiación de una lámpara empieza el de otra.
- ❖ El campo de radiación de cada una de las lámparas se solapa parcialmente con otro.
- ❖ El campo de radiación de cada una de las lámparas se solapa totalmente con otro.

La velocidad de oxidación fotocatalítica de los contaminantes seleccionados se relaciona fuertemente con la velocidad volumétrica local de absorción de fotones (LVRPA), es por ello que optimizar este parámetro es de especial importancia. Por lo que, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los análisis mostrados en el documento Anexos 2.1-2.6, se procede a estudiar las opciones disponibles.

Primeramente se distribuyen las fuentes de manera que en el punto donde finaliza el campo de radiación de una lámpara empiece el de otra (véase *Figura M.8.1*). De modo que la configuración del reactor se asemeja a un conjunto de reactores anulares acumulados de la forma más compacta posible en serie y en paralelo.

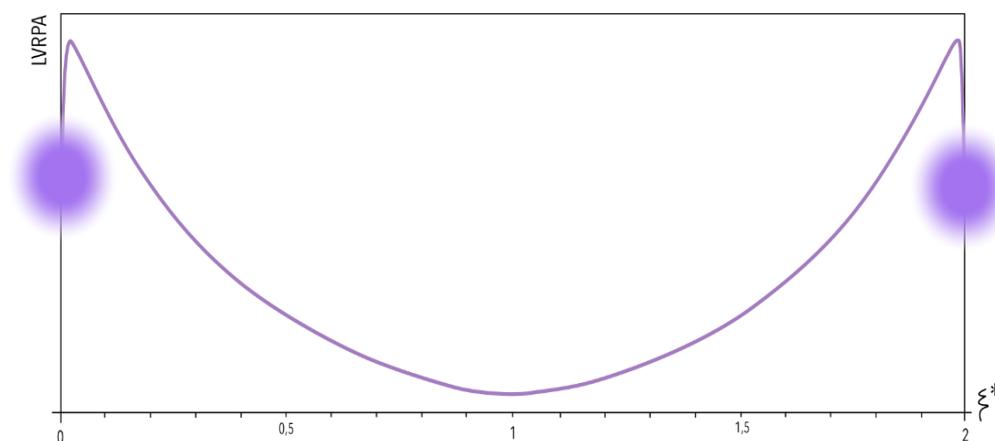


Figura M.8.1 Esquemización de la distribución de la LVRPA de dos lámparas adyacentes.

Seguidamente, se evalúa el efecto de la LVRPA y se determina el caudal a tratar con el objeto de conseguir una conversión mínima del 70%. A la hora de realizar los cálculos se considera que el reactor multitubular se puede descomponer en varios reactores anulares en paralelo, cada uno independiente del otro.

En la *Tabla M.8.1* se muestran los resultados del apilamiento de un conjunto de reactores de 30 cm de espesor, para distintas longitudes.

Tabla M.8.1 Valores de los parámetros característicos de un reactor con dicha configuración.

LONGITUD (m)	10	15	20
Caudal a tratar en cada reactor anular, Q (L/min)	15,1	28	43,3
Irradiancia (W/m ²)	80,893	121,34	161,785
Número de lámparas necesarias	1.085	585	379
Radio del reactor multitubular (m)	11,392	8,232	5,704

De acuerdo con lo recopilado en la literatura una de las geometrías de fotorreactores que han sido estudiadas y se han aplicado con eficacias de aceptables a buenas en la reducción de los innumerables compuestos de interés han sido: reactores anulares y multianulares.³⁷

Sin embargo, en vista de los resultados expuestos en la *Tabla M.8.1*, esta configuración no es adecuada a escala industrial. Por lo tanto, se decide modificar la distribución de las lámparas de manera que el campo de radiación de cada una se solape parcial o totalmente con otro, de modo que se pueda tratar un caudal mayor en un mismo espacio, y como consecuencia, se reduzca el diámetro del reactor multitubular.

Analizando los resultados obtenidos previamente en el documento anexos “2.5 Efecto de la carga de fotocatalizador” que muestran que la ecuación de la LVRPA es lineal con respecto a la intensidad, se supondría que los campos de radiación son linealmente aditivos.

³⁷ Passalía, C. (2010). *Modelado de un reactor fotocatalítico para la eliminación de contaminantes del aire*. Tesis Doctoral. México: Universidad Nacional del Litoral.

En la *Figura M.8.2* puede apreciarse el solapamiento del campo de radiación de dos lámparas adyacentes, que tiene lugar en las dos opciones restantes.

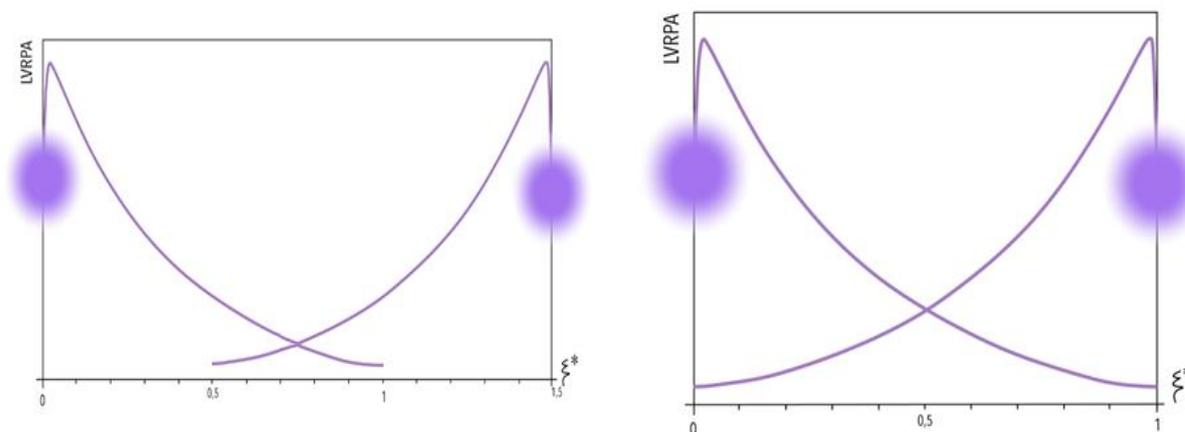


Figura M.8.2 Esquematización del solapamiento parcial y total, respectivamente, del campo de radiación de dos lámparas adyacentes.

Una de las complicaciones que se presentan, es la de obtener un diseño en el que la superficie del catalizador reciba un flujo de radiación uniforme, o en el que, al menos, todas las zonas del reactor reciban radiación, de modo que se maximice la LVRPA, y así conseguir una mayor eficiencia en el proceso.

En la *Figura M.8.2* se observa que con un solapamiento total del campo de radiación de dos lámparas adyacentes se consigue en el punto más desfavorable ($\xi^*=0,5$) un valor mayor de la LVRPA que en el punto más desfavorable cuando el solapamiento es parcial ($\xi^*=0,75$).

Por todo ello, se decide descartar la primera de estas dos posibles opciones, puesto que se tienen unas condiciones de iluminación menores, y en consecuencia, la factibilidad del proceso es menor.

Dada la nueva distribución de las lámparas, la configuración del reactor multitubular se asemeja a un conjunto de reactores con geometría hexagonal compacta acumulados de la forma más compacta posible en serie y en paralelo.

Finalmente, se diseña el fotorreactor de modo que las lámparas estén distribuidas de forma que el campo de radiación de una fuente ultravioleta se solape totalmente con otro.

En el documento Anexos 2.7-2.9 se muestran los cálculos pertinentes a la LVRPA, a la vez que se determina el porcentaje de conversión que se alcanza en los distintos puntos comprendidos en la corona cilíndrica del reactor.

9. RESULTADOS FINALES

Una vez realizado el análisis de soluciones, donde se han estudiado las distintas posibles opciones a la hora de distribuir las lámparas UV en el interior del reactor multitubular, y tras realizar los cálculos mostrados en el documento “2 Anexos 2. Diseño del fotorreactor”, se exponen los resultados obtenidos.

En el reactor fotocatalítico se puede tratar un caudal de aproximadamente $21.053 \frac{L}{min}$, un 28,56% más que el caudal de entrada. De manera que se tiene este margen de seguridad, ya que puede darse alguna anomalía que provoque un aumento del caudal y, además, también se debe tener en cuenta que el rendimiento de los equipos nunca es el máximo.

Así mismo, mediante este tratamiento se consigue una degradación mínima de los contaminantes emergentes seleccionados del 70%.

En la *Tabla M.9.1* se recogen los resultados obtenidos para el diseño del fotorreactor.

Tabla M.9.1 Características del reactor fotocatalítico.

REACTOR FOTOCATALÍTICO	
Caudal a tratar (L/min)	16.376
Longitud del reactor multitubular (m)	17
Diámetro interno del reactor multitubular (m)	3,56
Diámetro externo del reactor multitubular (m)	3,565
Número de lámparas UV	121
Longitud lámparas UV (m)	17
Diámetro lámparas UV (m)	0,032
ΔP (atm)	$6,800 \cdot 10^{-6}$
Carga térmica por iluminación (W)	844.428

Finalmente, haciendo uso del programa Autodesk Inventor 2019, se muestra en la *Figura M.9.1* el diseño del fotorreactor.

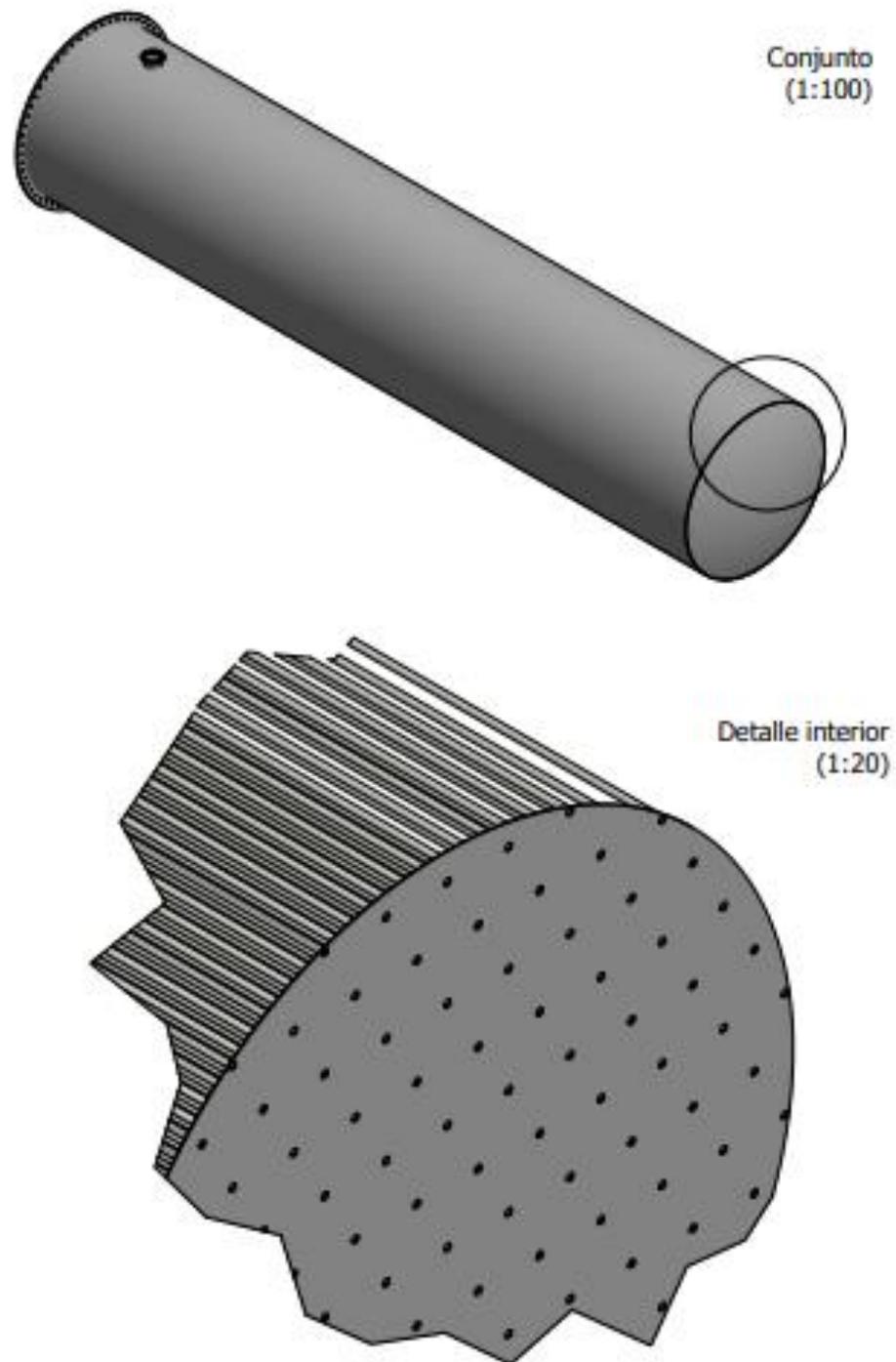


Figura M.9.1 Vistas generales del fotorreactor.

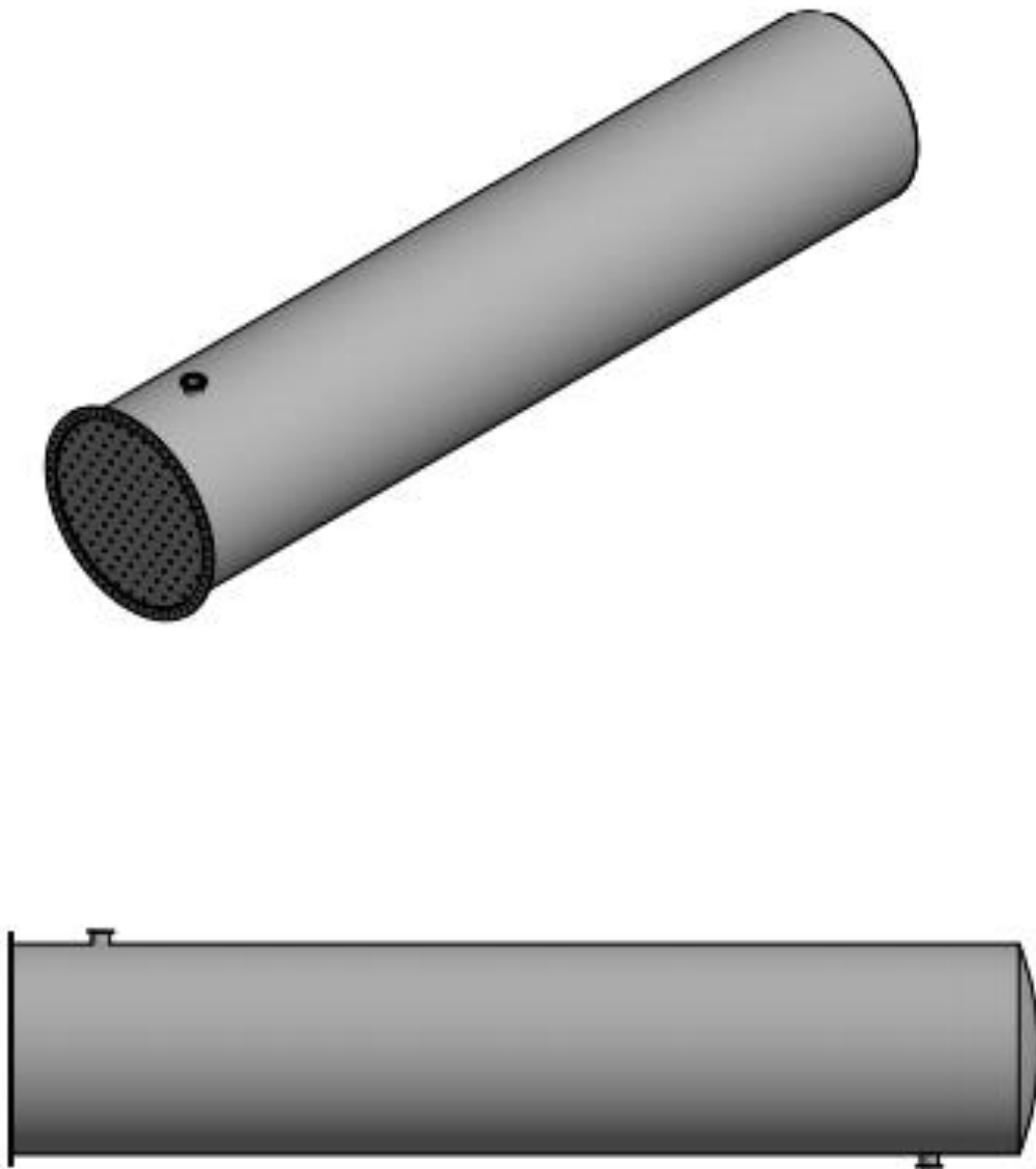
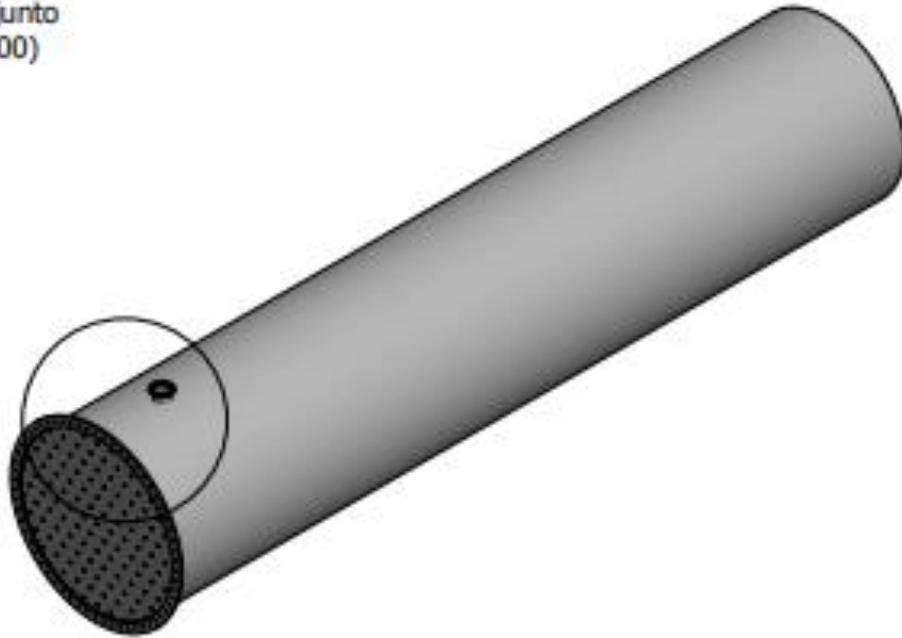


Figura M.9.1 Vistas generales del fotorreactor.

Conjunto
(1:100)



Detalle exterior
(1:30)

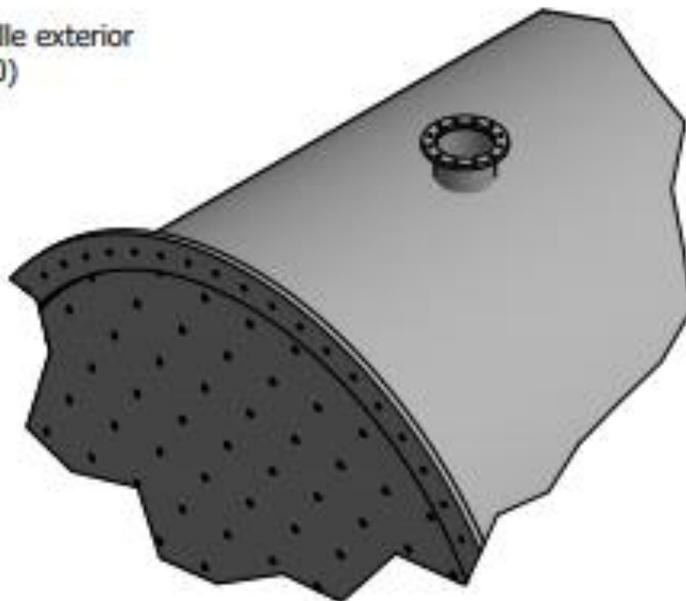


Figura M.9.1 Vistas generales del fotorreactor.

10. PLANIFICACIÓN

La planificación del proyecto es necesaria ya que consiste en la ordenación sistemática de las tareas para lograr finalizar el proyecto en el plazo de tiempo estimado. Esta planificación se realiza mediante el diagrama de Gantt, que es una herramienta gráfica que se emplea para programar tareas a lo largo de un periodo determinado de tiempo y además, gracias a una fácil y cómoda visualización de las acciones a realizar, permite realizar el seguimiento y control del progreso de cada una de las etapas del proyecto.

Para llevar a cabo la planificación se deben tener en cuenta las diferentes tareas que se van a realizar, la duración de cada una y la relación entre las mismas. En la *Tabla M.10.1* se muestran las diferentes fases del proyecto y la duración de las mismas.

Tabla M.10.1 Tareas del presente proyecto.

Actividad	Duración (días)	Inicio	Fin
Aceptación del proyecto	7	27/07/2020	04/08/2020
Adecuación del terreno	2	05/08/2020	06/08/2020
Obra civil de los equipos	20	07/08/2020	03/09/2020
Instalación eléctrica	1	04/09/2020	04/09/2020
Puesta en marcha y pruebas	2	07/09/2020	08/09/2020

En la *Figura M.10.1* se ve detallada dicha planificación mediante el diagrama de Gantt.

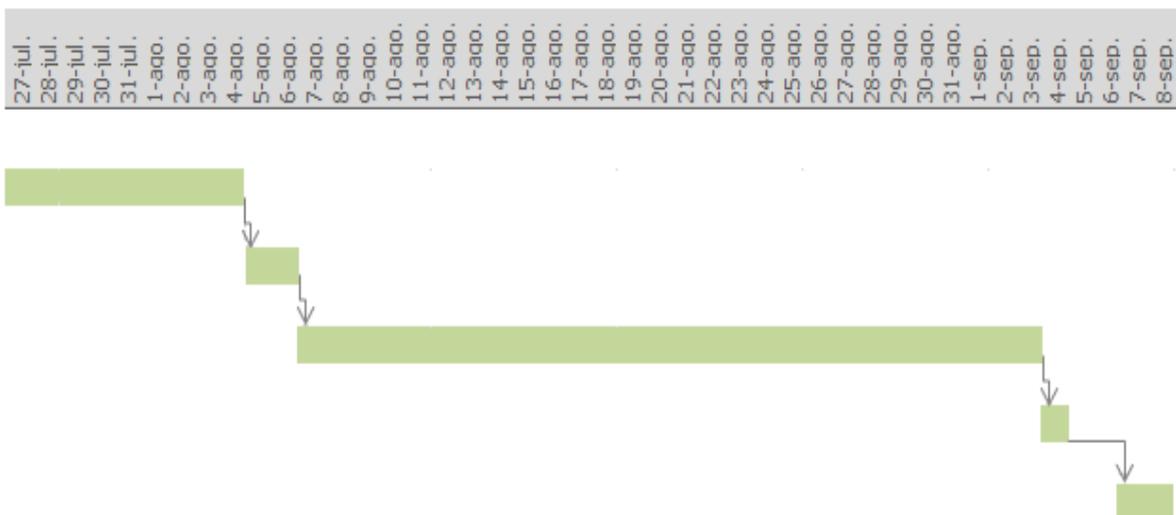


Figura M.10.1 Diagrama de Gantt.

11. ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE LOS DOCUMENTOS BÁSICOS

De acuerdo con lo establecido en la norma UNE 157001 de 2014, “Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico”, el orden de prioridad entre los documentos que constituyen el presente proyecto técnico es el siguiente:

1. Índice General
2. Memoria
3. Anexos
4. Planos
5. Pliego de condiciones
6. Estado de Mediciones
7. Presupuesto

12. ESTUDIO DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA

En el estudio de viabilidad económica se recoge de forma sistematizada toda la información del proyecto perteneciente a los aspectos monetarios. Es imprescindible hacer un análisis de ésta para poder tomar la decisión de emprender.

En el estudio de viabilidad económica se pretende conocer los recursos necesarios para llevar a cabo el proyecto, el coste operativo total del reactor e indicadores económicos que se emplearán para determinar la factibilidad del proyecto.

12.1 RESUMEN DEL PRESUPUESTO

En este apartado se resumen las partes principales del presupuesto del proyecto, que se encuentra detallado en el documento “7. Presupuesto”.

En la *Tabla M.12.1* se recogen las distintas partidas presupuestarias que forman el Presupuesto de Ejecución de Material (PEM) y su valor total.

Tabla M.12.1 Presupuesto de Ejecución de Material.

PARTIDA PRESUPUESTARIA	PRECIO (€)
Materiales	2.023.685,53
Mano de obra	303.552,83
TOTAL	2.327.238,36

Una vez conocido el PEM, se procede a determinar el Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC), el cual corresponde a la suma del PEM, los gastos generales y el beneficio industrial. Los gastos generales constituyen el 13% del PEM y el beneficio industrial corresponde al 6% del PEM.

En la *Tabla M.12.2* se muestra el Presupuesto de Ejecución por Contrata.

Tabla M.12.2 Presupuesto de Ejecución por Contrata.

	COSTE (€)
PEM	2.327.238,36
Gastos generales	302.540,99
Beneficio industrial	139.634,30
TOTAL	2.769.413,65

Finalmente, para el cálculo del presupuesto total, es necesaria la adición al Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC) del impuesto sobre el valor añadido (IVA), que actualmente es del 21%.

En la *Tabla M.12.3* se muestra el presupuesto total.

Tabla M.12.3 Inversión inicial del proyecto.

	COSTE (€)
PEC	2.769.413,65
IVA (21%)	581.576,87
TOTAL	3.350.990,52

El presupuesto total del proyecto “Diseño de un reactor fotocatalítico para la degradación de contaminantes emergentes presentes en el efluente de una Estación Depuradora de Aguas Residuales” asciende a TRES MILLONES TRESCIENTOS CINCUENTA MIL NOVECIENTOS NOVENTA EUROS CON CINCUENTA Y DOS CÉNTIMOS.

12.2 PRESUPUESTO DE EXPLOTACIÓN

El presupuesto de explotación se basa en una previsión de la empresa de los objetivos que se esperan alcanzar en un periodo de tiempo útil. Para su elaboración se debe tener en cuenta que el valor del dinero varía con el tiempo, de modo que se emplea la *ecuación M.12.1* para determinar el valor característico para cada año de explotación. En este caso se va a detallar la previsión durante un periodo de 10 años.

$$\text{Característica} = \text{Característica}_{\text{año } 0} \cdot (1 + \text{IPC})^{\text{año}-1} \quad (\text{M.12.1})$$

Donde,

- ❖ Índice de precios al consumo (IPC) tiene un valor de 2,5%.

Para disponer del presupuesto de explotación es necesario elaborar previamente los presupuestos de ingresos y gastos, estos últimos se dividen en gastos directos e indirectos.

Es necesario fijar los siguientes indicadores para llevar a cabo los cálculos pertinentes al presupuesto.

- ❖ Índice de Precios al Consumo (IPC).
- ❖ Interés nominal (i_n).
- ❖ Interés real (i_r): i_n/IPC .

En la *Tabla M.12.4* se recogen los valores fijados a los indicadores anteriores:

Tabla M.12.4 Índices de consumo.

INDICADORES	
Índice de Precios al Consumo (IPC)	2,5%
Interés nominal (i_n)	3,2%
Interés real (i_r)	1,28%

12.2.1 INVERSIÓN INICIAL

La inversión inicial necesaria para llevar a cabo el proyecto es equivalente al presupuesto total, por lo tanto corresponde a 3.350.990,52 €.

12.2.2 GASTOS DIRECTOS

Los gastos directos corresponden a todo tipo de coste directamente relacionado con el proceso que para este caso es el tratamiento del agua residual. En el presente proyecto, los gastos directos son la cantidad de catalizador (TiO_2 -P25) y agente oxidante a utilizar a lo largo de la línea de tratamiento, y el consumo de energía que tiene lugar por el accionamiento de la maquinaria, en este caso, del reactor.

Los costes de productos químicos involucran el catalizador y el agente oxidante utilizado para llevar a cabo la reacción de fotocatalisis. Para obtener dichos valores se obtuvo inicialmente la concentración de TiO₂-P25 y su consumo anual de acuerdo con las condiciones de operación fijadas a partir de los resultados obtenidos en la sección “2 Anexos 2. Diseño del fotorreactor”. Estos valores se recogen en la *Tabla M.12.5*.

Tabla M.12.5 Consumo de catalizador.

MATERIA PRIMA	CONSUMO DIARIO (kg)	CONSUMO ANUAL (kg)	CONSUMO (kg/m ³ agua)
Dióxido de Titanio	235,81	86.070,65	0,01

El precio del dióxido de titanio Aeroxide P25 se ha determinado mediante un compendio de los suministradores más próximos.

La *Tabla M.12.6* recoge el coste del catalizador para el primer año de operación.

Tabla M.12.6 Coste materia prima.

MATERIA PRIMA	UNIDAD	PRECIO UNITARIO (€/Ud)	CONSUMO ANUAL (Kg/año)	PRECIO (€/año)
Dióxido de Titanio	kg	25	86.070,65	2.151.766,25

En cuanto a la cantidad necesaria de oxígeno puro para oxidar completamente los tres contaminantes emergentes seleccionados, se requiere conocer las reacciones fotoquímicas de dichos contaminantes para realizar el cálculo estequiométrico de cada uno y así determinar los moles de oxígeno que son necesarios aportar por cada mol de herbicida presente en la reacción, de modo que se obtenga la concentración de agente oxidante. Sin embargo, el coste de oxígeno es en función de la dosificación en condiciones de caudal medio y debido a la escasez de información no se puede determinar la cantidad necesaria.

Por otro lado, dentro de los costes energéticos se relacionan los costes de aire y energía; no obstante, para el caso en estudio, no hay consumo de aire por lo cual estos costes se centran en el consumo de energía. Dicho valor está determinado por la energía eléctrica consumida por las lámparas UV, el cual está dado por la potencia que, a su vez, tiene dependencia de las horas que estén encendidas las lámparas.

Para llevar a cabo este cálculo se considera que el equipo opera de forma ininterrumpida en formato 24 por 7, 365 días al año.

En la *Tabla M.12.7* se muestra el consumo eléctrico del reactor fotocatalítico.

Tabla M.12.7 Consumo eléctrico de los elementos.

ELEMENTO	CANTIDAD (Ud)	POTENCIA (kW)	CONSUMO ANUAL (kWh/año)
Lámpara UV	121	675,625	5.918.479,582

El valor de la energía consumida se relaciona con el precio de la electricidad, el cual se determina a partir de la cuota para instalaciones industriales, distinguiendo la cuota diurna de la nocturna, teniendo en cuenta que cada una ocupa 12 horas diarias (véase *Tabla M.12.8*).

Tabla M.12.8 Coste de la electricidad.

	PRECIO (€/kWh)
Cuota diurna	0,06
Cuota nocturna	0,04

En la *Tabla M.12.9* se presenta el coste anual relacionado con el consumo de energía.

Tabla M.12.9 Coste energético de las lámparas UV.

ELEMENTO	CONSUMO ANUAL (kWh/año)	PRECIO (€)
Lámparas UV	5.918.479,582	295.923,98

Los gastos directos para el primer año de operación se recogen en la *Tabla M.12.10*.

Tabla M.12.10 Gastos directos totales.

GASTOS DIRECTOS	UNIDAD	CONSUMO (Ud/año)	GASTO (€/año)
Dióxido de titanio	kg	86.070,65	2.151.766,25
Consumo lámparas UV	kWh	5.918.479,582	295.923,98
TOTAL			2.447.690,23

12.2.3 GASTOS INDIRECTOS

Los gastos indirectos son aquellos costes que no están relacionados con la producción, es decir, tienen un valor fijo independientemente de la cantidad que se produce.

Para el caso evaluado, a parte del mantenimiento del reactor, se requiere el de las lámparas UV instaladas en él, lo cual implica una inspección periódica, con la cual se haga una verificación de que las lámparas estén limpias y en buen estado, además de comprobar las conexiones. Si no funcionan, efectuar el cambio de las lámparas y realizar el ajuste posterior, teniendo en cuenta ello, se prevé el gasto que se muestra en la *Tabla M.12.11*.

Tabla M.12.11 Costes fijos.

	UNIDAD	COSTE (€/año)
Operario de operación y mantenimiento	1	21.000,00
Mantenimiento electromecánico	-	10.000,00
TOTAL		31.000,00

12.2.4 GASTOS TOTALES

El presupuesto de explotación anual es la suma de los gastos directos e indirectos, de modo que los gastos anuales previstos ascienden a 2.478.690,23 €. En la *Tabla M.12.12* se recoge el valor obtenido en cada uno de los gastos que componen los gastos totales.

Tabla M.11.12 Gastos totales.

GASTOS	COSTE (€/año)
Gastos directos	2.447.690,23
Gastos indirectos	31.000,00
TOTAL	2.478.690,23

Una vez determinados los gastos totales, se debe tener en cuenta que el valor del dinero varía con el tiempo. Para determinar la variación de los gastos totales con el tiempo se emplea la *ecuación M.12.2*.

$$Gastos\ totales = Gastos\ totales_{año\ 0} \cdot (1 + IPC)^{año-1} \quad (M.12.2)$$

Donde,

- ❖ Índice de precios al consumo (IPC) tiene un valor de 2,5%.

En la *Tabla M.12.13*, se recogen los resultados obtenidos para cada año correspondientes a los gastos totales del presente proyecto.

Tabla M.12.13 Variación de los gastos totales con los años.

AÑO	GASTOS TOTALES (€/año)
1	2.478.690,23
2	2.540.657,48
3	2.604.173,92
4	2.669.278,27
5	2.736.010,22
6	2.804.410,48
7	2.874.520,74
8	2.946.383,76
9	3.020.043,35
10	3.095.544,44

12.2.5 AMORTIZACIÓN

La amortización se define como la pérdida de valor que tiene un bien físico con el paso del tiempo, pero es complicado cuantificarlo, la administración es la que regula las pérdidas de valor de la maquinaria, que es una cantidad que se va restando del valor vigente según la legislación. Debido a la pérdida de valor, se va reservando la parte equivalente a las pérdidas de valor de un equipo anualmente para que en el caso de tener que cambiarla porque se haya amortizado, se pueda comprar un equipo que valga por lo menos lo que costó la otra inicialmente.³⁰

La amortización se puede determinar como el cociente de la inversión inicial y el número de años que se requieren para amortizar el reactor. Se ha fijado un tiempo de amortización de 10 años.

³⁰ Apuntes EQ1031 Proyectos de Ingeniería.

Por tanto, la amortización para el primer año se define en la siguiente expresión.

$$Amortización = \frac{I_0}{tiempo\ de\ amortización} \quad (M.12.3)$$

Sustituyendo los correspondientes valores, se obtiene:

$$Amortización = \frac{3.350.990,52}{10} = 335.099,05 \frac{€}{año}$$

Una vez determinada la amortización, se debe tener en cuenta que el valor del dinero varía con el tiempo. Para determinar la variación de la amortización con el tiempo se emplea la ecuación M.12.4.

$$Amortización = Amortización_{año\ 0} \cdot (1 + IPC)^{año-1} \quad (M.12.4)$$

En la *Tabla M.12.14*, se detalla la amortización.

Tabla M.12.4 Variación de la amortización con los años.

AÑO	AMORTIZACIÓN (€/año)
1	335.099,05
2	343.476,52
3	352.063,44
4	360.865,02
5	369.886,65
6	379.133,82
7	388.612,16
8	398.327,46
9	408.285,65
10	418.492,79

12.2.6 BENEFICIOS

El principal objetivo de una empresa es obtener beneficios, estos son una parte importante del estudio de la viabilidad económica de un proyecto. Se distinguen 2 tipos de beneficio:

- ❖ **Beneficio bruto (Bb):** es el beneficio obtenido por una empresa en un periodo de tiempo determinado y surge de restar a los ingresos el importe de los gastos en los que se han incurrido fruto de la actividad pero, obviando los impuestos y las amortizaciones correspondientes.

$$\text{Beneficio bruto} = \text{Ingresos} - \text{Gastos totales} \quad (\text{M.12.5})$$

- ❖ **Beneficio neto (Bn):** es el beneficio obtenido por una empresa una vez se le restan los intereses al beneficio bruto. Según la agencia tributaria, los impuestos para sociedades (IS) se pueden considerar un 25% de los beneficios brutos.

$$\text{Beneficio neto} = Bb - IS = Bb \cdot (1 - 0,25) \quad (\text{M.12.6})$$

Para poder determinar los beneficios de la empresa, es necesario calcular los ingresos.

En el caso de la Comunidad Valenciana el coste asociado a la depuración del agua residual se carga a todos los usuarios del suministro de agua urbana y es gestionado por la entidad pública. Para este propósito se ha establecido un impuesto especial, el Canon de Saneamiento; este impuesto se calcula de acuerdo con el coste operativo total para el tratamiento primario y secundario, de modo que, los ciudadanos deben pagar de acuerdo con la cantidad de agua municipal que utilizan.³¹

En cuando a los servicios de reutilización, los explotadores de la EDAR no se encargan de vender ni recaudar el agua regenerada para la reutilización, ya que esto es competencia del propietario de la planta depuradora, que puede ser el ayuntamiento o la entidad de saneamiento (EPSAR en la Comunidad Valenciana).

³¹ Mas Ortega, J.G. (2016). *Análisis coste/beneficio aplicado a los procesos de depuración y reutilización*. Trabajo Fin de Máster. Alicante: Universitat d'Alacant.

No obstante, en el presente proyecto para poder llevar a cabo el estudio de viabilidad económica se estima un precio de venta del agua, y se asume que todo el volumen de agua regenerada se comercializa con el precio medio del agua en el sector agrario 0,30 €/m³.

Dicho valor se basa en el precio total que pagaron las Comunidades de Regantes en 2015. No obstante, este coste es revisado anualmente con arreglo a la variación del IPC de la Comunidad Valenciana, por lo que puede variar un poco del valor establecido.³¹

Este precio es asequible para los agricultores, aunque sustancialmente mayor que el precio de las aguas superficiales o subterráneas.

En definitiva, el caudal de agua residual que se trata es de 8.607.065 m³/año, con un precio de venta de 0,30 €/m³, arrojando unos ingresos anuales de 2.582.119,5 €.

En la *Tabla M.12.5* se muestra cómo cambia el valor del dinero con el paso de los años.

Tabla M.12.5 Variación de los ingresos con los años.

AÑO	INGRESOS (€/año)
1	2.582.119,50
2	2.646.672,48
3	2.712.839,30
4	2.780.660,28
5	2.850.176,78
6	2.921.431,20
7	2.994.466,98
8	3.069.328,66
9	3.146.061,88
10	3.224.713,42

Una vez determinados los ingresos y los gastos totales, se pueden determinar el beneficio bruto y el beneficio neto.

³¹ Mas Ortega, J.G. (2016). *Análisis coste/beneficio aplicado a los procesos de depuración y reutilización*. Trabajo Fin de Máster. Alicante: Universitat d'Alacant.

Por lo que, como se ha mencionado anteriormente el beneficio bruto se obtiene restando los gastos totales a los ingresos.

$$\text{Beneficio bruto} = 2.582.119,50 - 2.478.690,23 = 103.429,27 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Para el cálculo del beneficio neto, se resta al beneficio bruto un 25% por el impuesto de sociedades.

$$\text{Beneficio neto} = 103.429,27 - 0,25 \cdot 103.429,27 = 77.571,95 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

La cantidad que se obtiene en el beneficio neto da una idea inicial y aproximada de la viabilidad del proyecto, ya que los beneficios netos son los que percibirá la sociedad en forma de beneficios.

Una vez determinados los beneficios tanto brutos como netos, se debe tener en cuenta que el valor del dinero varía con el tiempo. Para determinar la variación de beneficios con el tiempo se emplea la ecuación *M.12.1*.

En la *Tabla M.12.6*, se recogen los resultados obtenidos para cada año correspondientes a los gastos totales del presente proyecto.

Tabla M.12.6 Variación del beneficio bruto y el beneficio neto con los años.

AÑO	BENEFICIO BRUTO (€/año)	BENEFICIO NETO (€/año)
1	103.429,27	77.571,95
2	106.015,00	79.511,25
3	108.665,37	81.499,03
4	111.382,01	83.536,50
5	114.166,56	85.624,92
6	117.020,72	87.765,54
7	119.946,24	89.959,68
8	122.944,90	92.208,67
9	126.018,52	94.513,89
10	129.168,98	96.876,73

12.2.7 FLUJO DE CAJA

El flujo de caja (FC) representa el flujo económico de entrada y salida que tiene una empresa durante un periodo de tiempo determinado.

El flujo de caja es una de las principales magnitudes a tener en cuenta para conocer la viabilidad del proyecto ya que permite medir el nivel de liquidez de una empresa.

El flujo de caja se determina mediante la *ecuación M.12.7*, que se muestra seguidamente.

$$\text{Flujo de caja} = \text{Beneficio neto} + \text{Amortización} \quad (\text{M.12.7})$$

$$\text{Flujo de caja} = 77.571,953 + 335.099,052 = 412.671,01 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Una vez determinado el flujo de caja, se debe tener en cuenta que el valor del dinero varía con el tiempo. Para determinar la variación del flujo de caja con el tiempo se emplea la *ecuación M.12.8*.

$$\text{Flujo de caja} = \text{Flujo de caja}_{\text{año } 0} \cdot (1 + \text{IPC})^{\text{año}-1} \quad (\text{M.12.8})$$

En la *Tabla M.12.7* se recogen los valores del flujo de caja para cada año teniendo en cuenta que el valor fijado para el índice de precios al consumo (IPC) es de 2,5%, como se ha mencionado anteriormente.

Tabla M.12.7 Variación del flujo de caja con los años.

AÑO	FLUJO DE CAJA (€/año)
1	412.671,01
2	422.987,78
3	433.562,47
4	444.401,53
5	455.511,57
6	466.899,36
7	478.571,84
8	490.536,14
9	502.799,54
10	515.369,53
	Flujo de caja promedio anual
	462.331,08

12.2.8 VALOR ACTUAL NETO (VAN)

El Valor Actual Neto (VAN) es un indicador de la rentabilidad absoluta neta que proporciona el proyecto. Pueden darse tres situaciones distintas:

- ❖ $VAN < 0$, Indica que el proyecto no es rentable para el periodo de tiempo establecido.
- ❖ $VAN = 0$, Indica que el proyecto no genera ni pérdidas ni ganancias.
- ❖ $VAN > 0$, Indica que el proyecto es rentable ya que las ganancias son mayores que los costes.

Para el cálculo del VAN se emplea la *ecuación M.12.9*.

$$VAN = -I_0 + \sum_{n=1}^{n=10} \frac{FC}{(1 + i_r)^n} \quad (M.12.9)$$

Donde,

- ❖ I_0 , Inversión inicial (€).

- ❖ FC , Flujo de caja $\left(\frac{\text{€}}{\text{año}}\right)$.
- ❖ i_r , Interés real, en el caso evaluado se tiene un valor de 1,28%.
- ❖ n , Periodo de tiempo (año).

El VAN para un horizonte temporal de 10 años es de 1.006.751,83 €, es mayor que 0, de modo que se puede concluir que el proyecto es ampliamente rentable.

Tabla M.12.8 Valor actual neto.

VAN (€)
1.006.751,83

12.2.9 TASA INTERNA DE RENTABILIDAD (TIR)

La Tasa Interna de Rentabilidad es la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión, es decir, es el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión para las cantidades que no se han retirado del proyecto.

Por lo tanto, interesa invertir dinero en aquellos proyectos cuyo TIR sea superior al interés nominal. Además cuanto mayor sea el TIR, más viable será el proyecto.

El TIR se determina igualando el VAN a cero, como se observa en *la ecuación M.12.10*. En el presente proyecto, el proceso a seguir es ir dando valores al interés real hasta que el VAN sea próximo a cero, de modo que el valor del TIR en ese momento será el valor del interés real.

$$0 = -I_0 + \sum_{n=1}^{n=10} \frac{FC}{(1 + i_r)^n} \quad (\text{M.12.10})$$

En la *Tabla M.12.9* se muestran los distintos valores del VAN en función del interés real.

Tabla M.12.9 Tasa interna de rentabilidad.

i_r	VAN (€/año)
0	1.272.320,29
0,01	1.062.726,08
0,02	867.950,10
0,03	686.730,04
0,04	517.926,12
0,05	360.507,94
0,06	213.542,83
0,07	76.185,53
0,075	10.867,31
0,758	615,39
0,076	-1.939,16

Se determina un valor de la Tasa Interna de Rentabilidad del 7,58%, por encima al 3,2% del interés nominal, lo que confirma la rentabilidad del proyecto.

A continuación, se representa gráficamente la variación del VAN con el interés real.

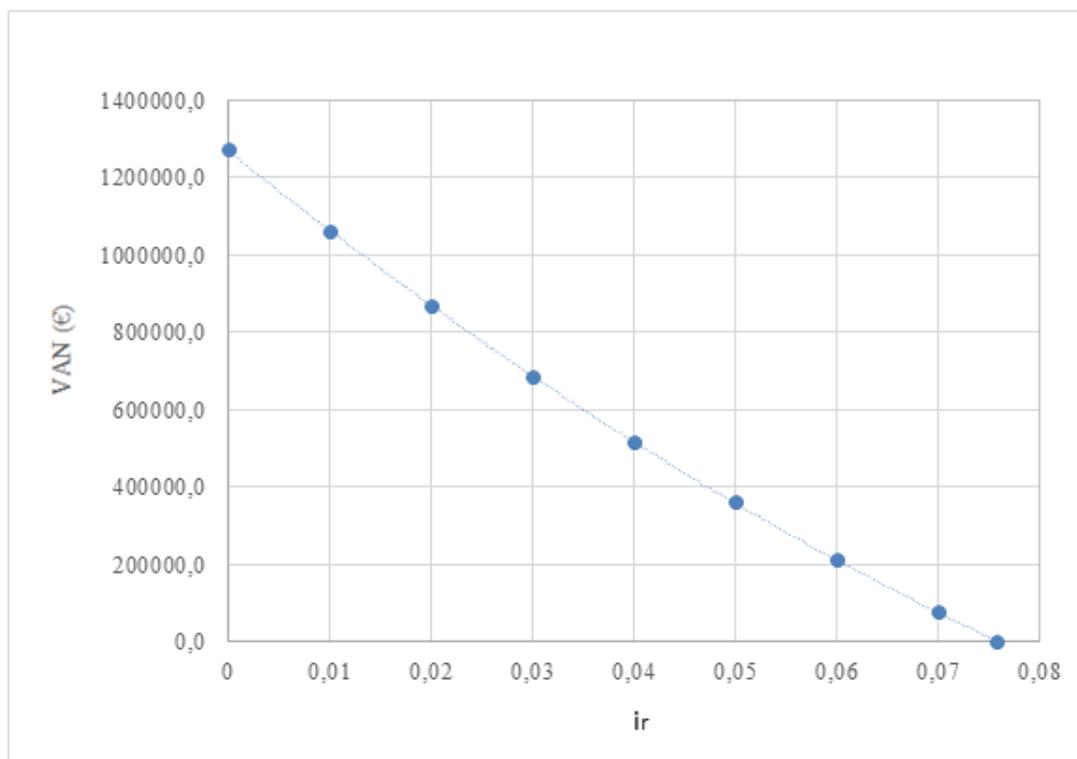


Figura M.12.1 Variación del VAN con el interés real.

12.2.10 PERIODO DE RETORNO (PR)

El periodo de retorno es un parámetro que indica el tiempo aproximado que se tarda en recuperar la inversión inicial del proyecto, es decir, evalúa la liquidez que tiene con carácter restrictivo. Se obtiene del cociente entre la inversión inicial y el flujo de caja promedio anual, empleando la *ecuación M.12.10*:

$$PR = \frac{I_0}{FC_{promedio\ anual}} \quad (M.12.11)$$

Tabla M.12.10 Periodo de retorno.

PR (años)
7,248

El periodo de retorno es de 7,248 años, es decir, aproximadamente 7 años y 91 días. El proyecto tendrá una alta liquidez, recuperándose el dinero invertido en un corto periodo de tiempo.

12.2.11 CONCLUSIÓN

Una vez realizado el estudio de viabilidad económica y determinados los tres indicadores económicos que se muestran en la *Tabla M.12.11*, se puede concluir que el proyecto es viable, en base al valor del VAN, que es ampliamente mayor que 0. Además, también confirman la rentabilidad del proyecto, tanto el TIR obtenido que es superior al interés nominal como el periodo de retorno que es reducido teniendo en cuenta la inversión llevada a cabo.

Tabla M.12.11 Resumen de índices económicos.

VAN (€)	TIR (%)	PR (años)
1.006.751,83	7,58	7,248

No obstante, se debe tener en cuenta que la rentabilidad del presente proyecto no garantiza que el tratamiento por fotocátalisis sea rentable, puesto que intervienen otros elementos básicos como: mezclador, conducciones, válvulas o bombas.

Estos equipos no se estudian, ya que este trabajo está enfocado en el diseño y dimensionamiento de un reactor fotocatalítico.

Así mismo, dada la necesidad de llevar a cabo una etapa de recuperación o un proceso integrado de separación del TiO₂-P25 del agua tratada, el proyecto no sería viable; no obstante, el presente proyecto se realiza con fines medioambientales.

Por otro lado, uno de los aspectos más relevantes en la viabilidad del proyecto es el coste de operación. En la *Figura M.12.2* se muestra el desglose de los costes de operación correspondientes al tratamiento avanzado.

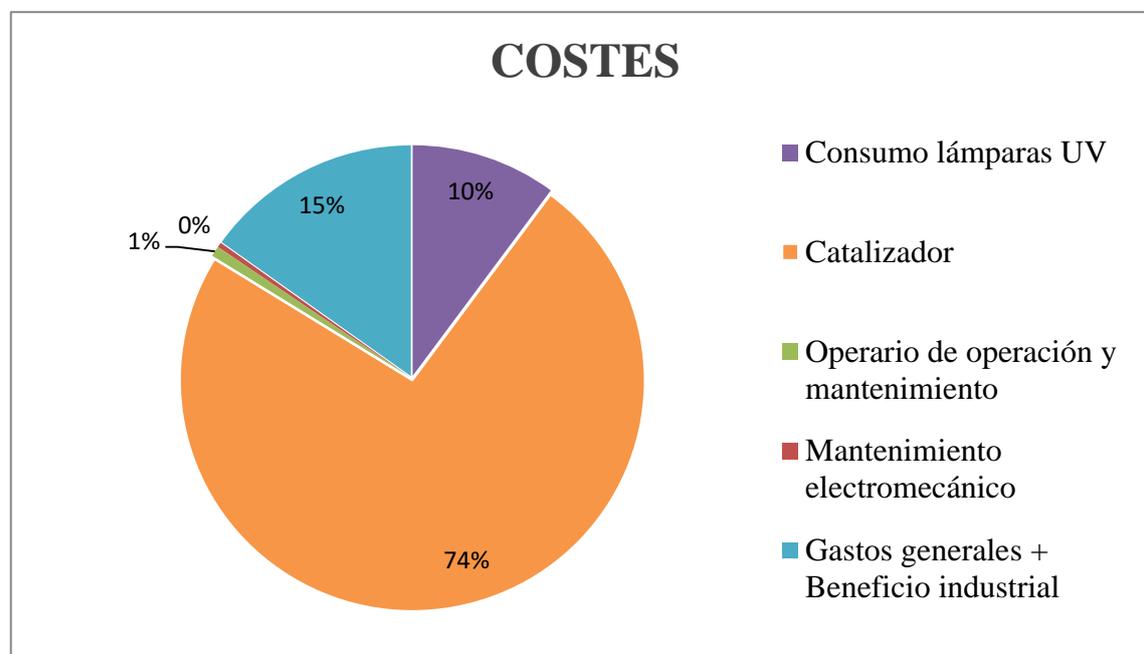


Figura M.12.2 Desglose de los costes de operación correspondientes al tratamiento avanzado.

A partir de los costes expuestos se observa que el mayor aporte dentro del tratamiento de agua residual por fotocátalisis está dado por la materia prima del catalizador. El coste referido al dióxido de titanio representa el 74% del valor, lo cual es determinante, y aunque operativamente es viable se requiere llevar a cabo una etapa de recuperación o un proceso integrado de separación para evitar la pérdida de fotocatalizador. En este contexto, se pueden plantear diferentes alternativas como la propuesta por Xue et al.³² que plantean la separación, recuperación y reutilización del catalizador mediante una etapa de

³² Xue, X.D. Fu, J.F. Zhu, W.F. Guo, X.C. (2008). *Desalination*, vol.225, p.29-40.

ultrafiltración, obteniendo una buena eficiencia en la separación y manteniendo el nivel de actividad fotocatalítica en los sucesivos usos. No obstante, este proceso supone un aumento considerable de los costes y hace más complejo el tratamiento global.

Así mismo, otra alternativa interesante es la propuesta por Fernández-Ibañez. et al.³³ que plantean la recuperación del catalizador al final del proceso mediante sedimentación y filtración a través del ajuste del pH al punto de carga cero (PZC) del TiO₂. De este modo, los autores consiguen recuperar mediante sedimentación prácticamente la totalidad de las partículas en suspensión (97%), y con un proceso final de microfiltración eliminan el 3% restante de catalizador que permanece en el agua tratada. Sin embargo, estos resultados se han obtenido a escala de planta piloto por lo que todavía se debe profundizar en la investigación, ya que en la práctica pueden aparecer dificultades en el proceso de recuperación debido a la no retención de algunas partículas.

Por otra parte, la complejidad para que el modelo de reutilización funcione correctamente, es que se repartan los costes, de modo que parte de la regeneración y transporte del agua se cargue en la administración. La finalidad es promover la reutilización del agua para la agricultura, ya que el coste energético asociado es elevado y esto encarece considerablemente el precio final.

Finalmente, el coste de la producción de un m³ de agua se obtiene del cociente entre los gastos totales y el caudal de agua residual a tratar.

$$\frac{2.478.690,23\text{€}}{1 \text{ año}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{8.607.065 \text{ m}^3} = 0,29 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}$$

Por tanto, la producción de 1 m³ de agua se estima en 0,29 €/m³. Dicho coste es una aproximación, puesto que en los gastos totales no se ha tenido en cuenta el precio del agente oxidante.

³³ Fernández-Ibañez, P. Blanco, J. Malato, F.J. (2003). *Water Research*, vol.37, p. 3180-3188.

No obstante, si se realiza la comparación con los datos correspondientes a los costes de explotación obtenidos de Comos (2014)³⁴ se puede ver que los costes del tratamiento avanzado (0,25 €/m³) son similares con el obtenido (0,29 €/m³). En la *Figura M.12.3* se muestran los resultados obtenidos en dicha fuente.

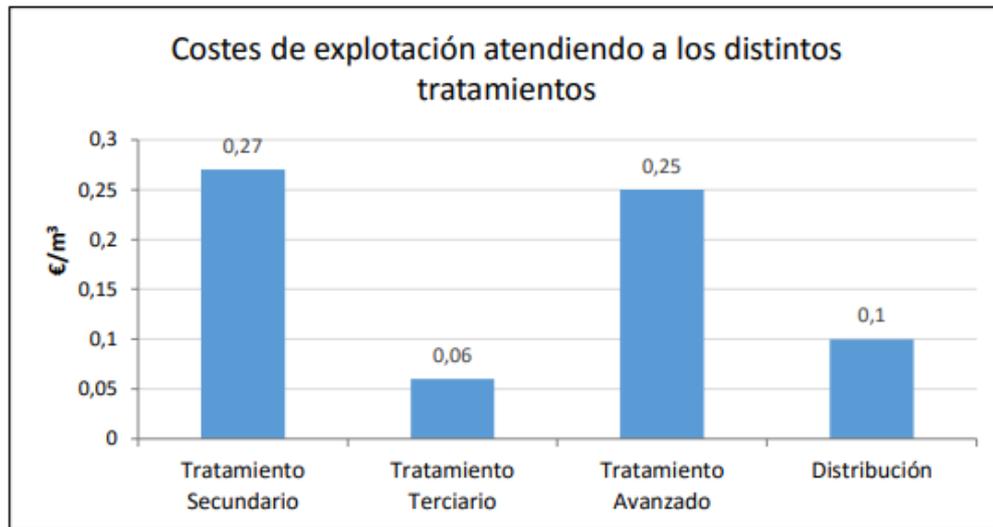


Figura M.12.3 Costes de explotación atendiendo a los distintos tratamientos en la Comunidad Valenciana durante el año 2012.³⁴

³⁴ Comos, J.A. (2014). "Reutilización de las aguas depuradas en la vega de Valencia" en Aplicación de lodos y aguas regeneradas en agricultura. 1ª Jornada sobre el aprovechamiento de recursos disponibles en una EDAR. Valencia.

3. ANEXOS

ÍNDICE

1 ANEXO 1. DOCUMENTACIÓN DE PARTIDA.....	3
2 ANEXO 2. DISEÑO DEL FOTORREACTOR.....	5
2.1 MODELO DE LA EMISIÓN DE LA RADIACIÓN.....	5
2.2 MODELO DE ABSORCIÓN Y DISPERSIÓN DE LA RADIACIÓN.....	9
2.3 MODELO CINÉTICO.....	17
2.4 BALANCE DE MATERIA.....	18
2.5 EFECTO DE LA CARGA DE FOTOCATALIZADOR.....	25
2.6 EFECTO DE LAS DIMENSIONES DEL REACTOR.....	29
2.7 REACTOR MULTITUBULAR.....	30
2.7.1 ANÁLISIS DEL COSTE DE LAS POSIBLES SOLUCIONES.....	44
2.8 ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA FINAL.....	45
2.9 ANÁLISIS DE SOLUCIONES.....	55
2.10 EFECTO DE LA POTENCIA DE LA LÁMPARA.....	57
2.11 CALCULAR EL NÚMERO DE REYNOLDS.....	58
2.12 PÉRDIDA DE CARGA.....	61
2.13 TIEMPO DE RESIDENCIA.....	66
2.14 BALANCE DE ENERGIA.....	67
3 ANEXO 3. ESTUDIO DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA.....	72
3.1 LÁMPARAS ULTRAVIOLETAS.....	72
3.2 CORAZA.....	77
3.3 FONDO BOMBEADO.....	77
3.4 PLACA TUBULAR.....	81
3.5 CONEXIÓN DE ENTRADA Y DE SALIDA.....	83
3.6 TIPOS DE SOLDADURA.....	84
3.7 DIOXIDO DE TITANIO DEGUSSA P25.....	85
4 ANEXO 4. ESTUDIO DE SEGURIDAD Y SALUD.....	87
5 ANEXO 5. ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL.....	92
6 ANEXO 6. FICHA TÉCNICA Y DE SEGURIDAD DEL DIÓXIDO DE TITANIO DEGUSSA P25.....	93

1 ANEXO 1. DOCUMENTACIÓN DE PARTIDA

Para el diseño del reactor se han fijado previamente una serie de condiciones de entrada de acuerdo con lo recopilado en la literatura. Estas condiciones iniciales se recogen en la *Tabla A.1.1*.

Tabla A.1.1 Condiciones de entrada al reactor.

CARACTERÍSTICA	VALOR	UNIDADES
$C_{0isoproturón}$	1	µg/L
$C_{0simazina}$	1	µg/L
$C_{0propazina}$	1	µg/L
C_{TiO_2}	0,40	g/L
T_0	20	°C
pH	7,56	-

Aparte de éstas seis, se ha considerado que se trata de un proceso isoterma. Aunque posteriormente se evaluará si es necesaria una corriente de refrigeración para poder trabajar a la misma temperatura en todo el reactor, debido al calor generado por las lámparas ultravioletas.

Otra condición con la que se ha trabajado es que no hay pérdida de actividad en las fuentes mientras éstas están dentro de su rango de vida que es de 17.000 horas.

Además, para llevar a cabo el presente proyecto, será necesario conocer el caudal de agua residual que llega a la estación depuradora. Una planta depuradora presenta grandes variaciones según una modulación diaria, no obstante en este caso como caudal de diseño se utilizará el caudal medio.

La *Tabla A.1.2* muestra los valores del caudal a la entrada de la EDAR y a la salida del decantador secundario durante el año 2019. Estos datos han sido proporcionados por la jefa de explotación de una estación depuradora localizada en la Comunidad Valenciana.

Tabla A.1.2 Datos analíticos 2019.

	CAUDAL (m ³ /día)	
	ENTRADA	SALIDA
Enero	20.571	20.571
Febrero	13.821	13.821
Marzo	15.255	15.255
Abril	20.428	20.428
Mayo	16.895	16.895
Junio	18.990	18.990
Julio	34.608	34.608
Agosto	41.480	41.480
Septiembre	30.126	30.126
Octubre	18.594	18.594
Noviembre	18.025	18.025
Diciembre	34.174	34.174
MEDIA	23.581	23.581

Estos datos han sido proporcionados por la jefa de explotación de una EDAR; sin embargo, una vez terminado el presente proyecto se ha recibido nueva información sobre el caudal de entrada y salida del decantador secundario, ya que contenían un error. Este error solo afectaría al dimensionamiento del reactor para el caudal concreto, pero no invalida todo el desarrollo.

2 ANEXO 2. DISEÑO DEL FOTORREACTOR

Las condiciones con las que se trabaja en el reactor vienen dadas por el análisis de diversos documentos en los cuales se ha estudiado la degradación de este sistema de herbicidas a escala de laboratorio. Se basan en el empleo de un reactor en suspensión de configuración anular, una fuente de luz ultravioleta y $\text{TiO}_2\text{-P25}$ como fotocatalizador.

Con estas condiciones iniciales, se ha dimensionado un supuesto reactor para conocer la variación de la intensidad de radiación de la fuente en el fotorreactor y la cantidad de catalizador necesaria para llegar a una conversión satisfactoria. A partir de aquí, se ajustan las dimensiones del reactor para tratar el caudal de agua residual deseado.

2.1 MODELO DE LA EMISIÓN DE LA RADIACIÓN

La emisión de la radiación de la lámpara es modelada mediante el modelo de fuente de emisión esférica lineal (LSSE), en el cual la lámpara es considerada como una fuente lineal y en cada punto de esta línea se estima que la emisión de la radiación ocurre en todas las direcciones de manera isotrópica.

El número de fotones emitidos por la fuente de radiación está relacionado con la potencia de emisión de radiación de la fuente y de la longitud de onda.

En la *Figura A.2.1* se muestra una representación del espacio de reacción en un reactor anular, junto con la nomenclatura empleada para el modelo de emisión de fotones.

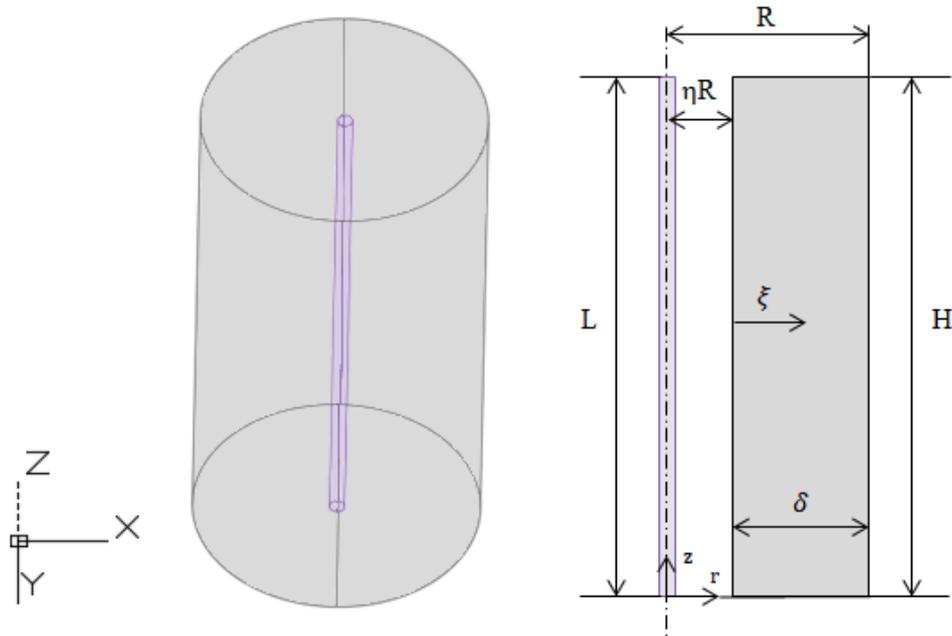


Figura A.2.1 Geometría del reactor fotocatalítico anular con los parámetros definidos.

De acuerdo con este modelo la intensidad de la radiación incidente que entra en la pared interna del anillo puede ser escrita como:³⁵

$$I_0 = I_{(\eta R), z^*} = \frac{S_1}{4 \cdot \pi \cdot \eta R} \left\{ \arctan \left[\frac{\beta}{2} \cdot (2 \cdot \alpha \cdot z^* - \alpha + 1) \right] - \arctan \left[\frac{\beta}{2} \cdot (2 \cdot \alpha \cdot z^* - \alpha - 1) \right] \right\} \quad (\text{A.2.1})$$

Donde,

- ❖ S_1 , Emisión de la radiación de la lámpara por unidad de tiempo y por unidad de longitud de la lámpara $\left(\frac{W}{m}\right)$.
- ❖ α y β , Parámetros de diseño geométrico de un fotorreactor anular.
- ❖ z^* , Coordenada axial adimensional.
- ❖ ηR , Radio interno del anillo (m).

³⁵ Gora, A. Toepfer, B. Li Puma, G. (2006). "Photocatalytic oxidation of multicomponent solutions of herbicides: Reaction kinetics analysis with explicit photon absorption effects" en Applied Catalysis B: Environmental, vol. 68, p. 171-180.

Para el cálculo de la emisión de la radiación de la lámpara, se utiliza la *ecuación A.2.2*.

$$S_1 = 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I_{w,\lambda} d\lambda = 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot I_w \quad (A.2.2)$$

Donde,

- ❖ r_1 , Radio de la lámpara (m).
- ❖ I_w , Intensidad de la radiación UV-C $\left(\frac{W}{m^2}\right)$.

Sustituyendo los valores conocidos, se obtiene:

$$S_1 = 2 \cdot \pi \cdot 0,016 \cdot 80,893 = 8,1322 \frac{W}{m}$$

La *ecuación A.2.2* considera únicamente los fotones emitidos por la lámpara y por lo tanto no incluye la radiación debida al efecto de dispersión que tiene lugar dentro del espacio de reacción.

Por otro lado, para el cálculo de los parámetros de diseño geométrico de un fotorreactor anular, α y β , se emplean las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \frac{H}{L} \quad (A.2.3)$$

$$\beta = \frac{L}{\eta R} \quad (A.2.4)$$

Donde,

- ❖ H, Altura del reactor (m).
- ❖ L, Longitud de la lámpara (m).
- ❖ ηR , Radio interno del anillo (m).

La longitud del reactor es igual a la de la lámpara, de manera que sustituyendo los parámetros conocidos, se obtiene:

$$\alpha = \frac{10}{10} = 1$$

$$\beta = \frac{10}{0,016} = 625$$

Cabe destacar que la longitud del reactor propuesta es arbitraria ya que en primera instancia es necesario analizar el comportamiento del flujo de radiación emitido por la lámpara dentro del reactor fotocatalítico y conocer la exposición necesaria del caudal a tratar frente a la luz ultravioleta. Posteriormente se lleva a cabo la determinación de sus dimensiones reales y su configuración.

Para obtener la coordenada axial adimensional z^* se utiliza la *ecuación A.2.5*, que se muestra a continuación:

$$z^* = \frac{z}{H} \tag{A.2.5}$$

Siendo z la coordenada axial (m).

Por lo tanto, el valor de la coordenada axial adimensional z^* varía entre 0 y 1 dependiendo de la posición axial z a lo largo de la longitud del reactor.

Finalmente, sustituyendo los valores calculados en la *ecuación A.2.1* se integró el modelo LSSE haciendo uso del programa Scilab 6.0.1 y produce los perfiles de radiación emitida por la lámpara que se muestran en la *Figura A.2.2*.

En la gráfica se observa que la intensidad de fotones en el fotorreactor es prácticamente uniforme a lo largo de la dirección z^* , solamente varia en los extremos.

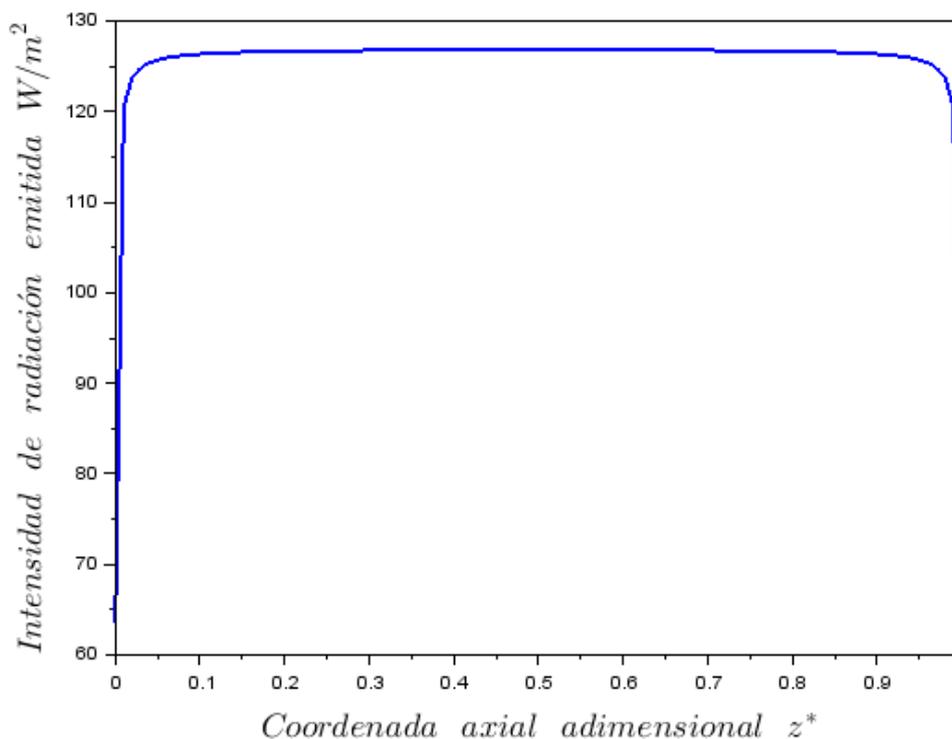


Figura A.2.2 Perfiles del modelo de emisión.

2.2 MODELO DE ABSORCIÓN Y DISPERSIÓN DE LA RADIACIÓN

Este modelo permite considerar que los fotones que tienen una energía igual o superior al ancho de banda prohibido del semiconductor (band gap) son absorbidos únicamente por las partículas sólidas de fotocatalizador, pudiéndose desestimar la absorción de fotones por los sustratos. Esto se debe a que las partículas sólidas suspendidas en el medio a descontaminar presentan una concentración considerablemente mayor a la de los sustratos a oxidar; cuya concentración es del orden de los microgramos por litro.

El modelo de seis flujos (SFM) admite una estimación analítica de la integral de la ecuación de la velocidad volumétrica de absorción de fotones en cada punto del reactor y tiene en cuenta la absorción y la dispersión de fotones. Este modelo supone que los fotones son absorbidos o dispersados, al chocar con una partícula, y la dispersión sigue a través de uno de los seis sentidos de las coordenadas cartesianas (*Figura A.2.3*). Con el fin de obtener un modelo matemático para describir el flujo de radiación dentro del reactor fotocatalítico, se realiza un balance de fotones dentro de un elemento diferencial de volumen. Los flujos de fotones que entran son iguales y tienen la misma probabilidad de chocar contra las partículas de catalizador en ese elemento de volumen.

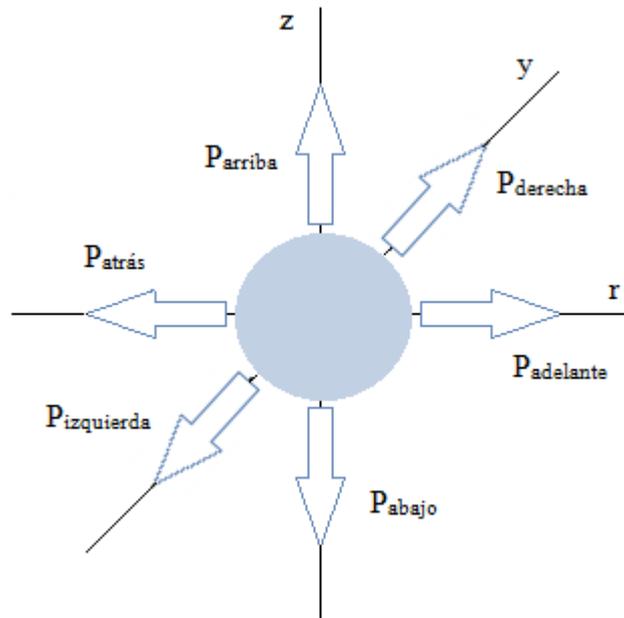


Figura A.2.3 Seis sentidos principales de dispersión de fotones en el modelo de seis flujos.

De acuerdo con el modelo de seis flujos, la velocidad volumétrica de absorción de fotones en cada punto del reactor (LVRPA) puede ser escrita de la siguiente manera:³⁵

$$LVRPA = \frac{\tau_{app} \cdot I_0}{\omega_{corr} \cdot (1 - \gamma)} \cdot \frac{\eta}{(1 - \eta) \cdot R} \times \left[\begin{aligned} & \left(\omega_{corr} - 1 + \sqrt{1 - \omega_{corr}^2} \right) \cdot e^{(-\tau_{app} \cdot \xi^*)} + \\ & \left[\gamma \cdot \left(\omega_{corr} - 1 - \sqrt{1 - \omega_{corr}^2} \right) \cdot e^{(\tau_{app} \cdot \xi^*)} \right] \end{aligned} \right] \quad (A.2.6)$$

Donde,

- ❖ η , Relación entre el radio interno y el externo del anillo.
- ❖ I_0 , Intensidad de radiación proveniente de la lámpara $\left(\frac{W}{m^2}\right)$.
- ❖ R , Radio externo del anillo (m).
- ❖ ξ^* , Coordenada radial adimensional en el espacio de reacción.

³⁵ Gora, A. Toepfer, B. Li Puma, G. (2006). "Photocatalytic oxidation of multicomponent solutions of herbicides: Reaction kinetics analysis with explicit photon absorption effects" en Applied Catalysis B: Environmental, vol. 68, p. 171-180.

- ❖ τ_{app} , Espesor óptico aparente.
- ❖ ω_{corr} y γ , Parámetros del modelo de seis flujos.

Para el cálculo del parámetro del modelo de seis flujos ω_{corr} , se utiliza la ecuación que se muestra a continuación.

$$\omega_{corr} = \frac{b}{a} \quad (\text{A.2.7})$$

Siendo a y b parámetros del modelo de seis flujos.

Para obtener los valores de a y b es necesario determinar previamente el albedo de dispersión (ω), que se define como:

$$\omega = \frac{\sigma}{\sigma + \kappa} \quad (\text{A.2.8})$$

Donde σ y κ son los coeficientes específicos de dispersión y absorción de la radiación, respectivamente, que para la radiación policromática se pueden promediar sobre el espectro útil de la radiación incidente.

$$\sigma = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \sigma_{\lambda} \cdot I_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I_{\lambda} d\lambda} \quad (\text{A.2.9})$$

$$\kappa = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \kappa_{\lambda} \cdot I_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I_{\lambda} d\lambda} \quad (\text{A.2.10})$$

Donde,

- ❖ I_{λ} , Intensidad de la radiación a la longitud λ ($\frac{W}{m^3}$).
- ❖ σ , Coeficiente de dispersión específico ($\frac{m^2}{kg}$).

- ❖ κ , Coeficiente de absorción específico $\left(\frac{m^2}{kg}\right)$.
- ❖ σ_λ , Coeficiente de dispersión para una longitud de onda determinada $\left(\frac{m^2}{kg}\right)$.
- ❖ κ_λ , Coeficiente de absorción para una longitud de onda determinada $\left(\frac{m^2}{kg}\right)$.
- ❖ λ_{max} , Longitud de onda máxima de la radiación incidente.
- ❖ λ_{min} , Longitud de onda mínima de la radiación incidente.

A pesar de que el albedo de dispersión debe evaluarse utilizando los coeficientes específicos de absorción y dispersión determinados experimentalmente con el grado de aglomeración del TiO_2 en la suspensión, en el presente trabajo se emplearán datos experimentales que fueron obtenidos previamente en el estudio *Modeling of an annular photocatalytic reactor for water purification: oxidation of pesticides*⁸; el cual presenta unas condiciones de operación similares y no se espera que sus valores difieran mucho.

$$\kappa = 338 \frac{m^2}{kg} \qquad \sigma = 962 \frac{m^2}{kg}$$

Sustituyendo los valores de los coeficientes de absorción y dispersión en la *ecuación A.2.8*, se tiene que:

$$\omega = \frac{962}{962 + 338} = 0,74$$

Seguidamente, se calculan los parámetros del modelo de seis flujos *a* y *b*.

$$a = 1 - \omega \cdot \rho_f - \frac{4 \cdot \omega^2 \cdot \rho_s^2}{(1 - \omega \cdot \rho_f - \omega \cdot \rho_b - 2 \cdot \omega \cdot \rho_s)} \qquad (A.2.11)$$

⁸ Li Puma, G. Khor, J.N. Brucato, A. (2004). "Modeling of an annular photocatalytic reactor for water purification: Oxidation of pesticides" en *Environmental Science & Technology*, vol. 38, issue. 13, p. 3737-3745.

$$b = \omega \cdot \rho_b + \frac{4 \cdot \omega^2 \cdot \rho_s^2}{(1 - \omega \cdot \rho_f - \omega \cdot \rho_b - 2 \cdot \omega \cdot \rho_s)} \quad (\text{A.2.12})$$

Donde,

- ❖ ρ_b , Probabilidad de radiación hacia atrás.
- ❖ ρ_f , Probabilidad de radiación hacia adelante.
- ❖ ρ_s , Probabilidad de radiación hacia los lados.

De acuerdo con lo establecido en la literatura, los parámetros ρ_b , ρ_f , ρ_s tienen un valor de 0.71, 0.11, 0.045, respectivamente.

Sustituyendo los parámetros conocidos, se obtiene:

$$a = 1 - 0,74 \cdot 0,11 - \frac{4 \cdot 0,74^2 \cdot 0,045^2}{(1 - 0,74 \cdot 0,11 - 0,74 \cdot 0,71 - 2 \cdot 0,74 \cdot 0,045)} = 0,905$$

$$b = 0,74 \cdot 0,71 + \frac{4 \cdot 0,74^2 \cdot 0,045^2}{(1 - 0,74 \cdot 0,11 - 0,74 \cdot 0,71 - 2 \cdot 0,74 \cdot 0,045)} = 0,539$$

Por tanto, sustituyendo en la ecuación A.1.7 los parámetros calculados queda:

$$\omega_{corr} = \frac{0,539}{0,905} = 0,5955$$

Por otro lado, para el cálculo del espesor óptico aparente τ_{app} , se precisa de la siguiente ecuación:

$$\tau_{app} = a \cdot \tau \cdot \sqrt{1 - \omega_{corr}^2} \quad (\text{A.2.13})$$

Siendo τ , el espesor óptico y se determina con la siguiente expresión:

$$\tau = (\sigma + \kappa) \cdot C_{cat} \cdot \delta = (\sigma + \kappa) \cdot C_{cat} \cdot R \cdot (1 - \eta) \quad (\text{A.2.14})$$

Donde,

❖ C_{cat} , Concentración del catalizador $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.

❖ δ , Espesor del anillo (m).

Se propone una concentración de catalizador de $0,4 \frac{kg}{m^3}$ que además, este valor, se basa en el trabajo publicado por Li Puma, G. et al. (2004)⁸ donde se hace uso de un reactor en suspensión de configuración anular para el análisis de la radiación utilizando TiO_2 como fotocatalizador y una fuente de luz ultravioleta.

Por otra parte, conociendo que el espesor límite es de 30 cm se procede a determinar el espesor óptico y el espesor óptico aparente para distintos espesores de la corona cilíndrica. De este modo, se analiza el efecto de las dimensiones del reactor fotocatalítico sobre el volumen irradiado de catalizador, lo que interviene directamente en la velocidad de reacción.

Tabla A.2.1 Resultados del espesor óptico y el espesor óptico aparente para distintos espesores del anillo.

δ (cm)	30	20	10	5	2,5	2
τ	156	104	52	26	13	10,4
τ_{app}	113,415	75,610	37,805	18,902	9,451	7,561

Para el cálculo del parámetro del modelo de seis flujos γ , se emplea la ecuación A.2.15.

$$\gamma = \frac{1 - \sqrt{1 - \omega_{corr}^2}}{1 + \sqrt{1 - \omega_{corr}^2}} \cdot e^{(-2 \cdot \tau_{app})} \quad (A.2.15)$$

Sustituyendo los valores calculados anteriormente se obtiene:

Tabla A.2.2 Resultados del parámetro del modelo de seis flujos.

τ_{app}	113,415	75,610	37,805	18,902	9,451	7,561
γ	$3,36 \cdot 10^{-100}$	$2,31 \cdot 10^{-67}$	$1,587 \cdot 10^{-34}$	$4,161 \cdot 10^{-18}$	$6,736 \cdot 10^{-10}$	$2,953 \cdot 10^{-8}$

⁸ Li Puma, G. Khor, J.N. Brucato, A. (2004). "Modeling of an annular photocatalytic reactor for water purification: Oxidation of pesticides" en Environmental Science & Technology, vol. 38, issue. 13, p. 3737-3745.

Para el cálculo de la coordenada radial adimensional en el espacio de reacción ξ^* , se necesita la *ecuación A.2.16*.

$$\xi^* = \frac{\xi}{\delta} \quad (\text{A.2.16})$$

Donde,

- ❖ ξ , Coordenada radial del espacio de reacción (m).
- ❖ δ , Espesor del anillo (m).

Por lo que el valor de la coordenada radial adimensional ξ^* varía entre 0 y 1 dependiendo de la posición radial ξ a lo largo del espesor del anillo.

A partir de los parámetros calculados anteriormente se puede determinar la velocidad volumétrica de absorción de fotones en cada punto del reactor (LVRPA) mediante la *ecuación A.2.6*. En la *Figura A.2.4* se muestran los perfiles de LVRPA para los diferentes espesores del anillo seleccionados.

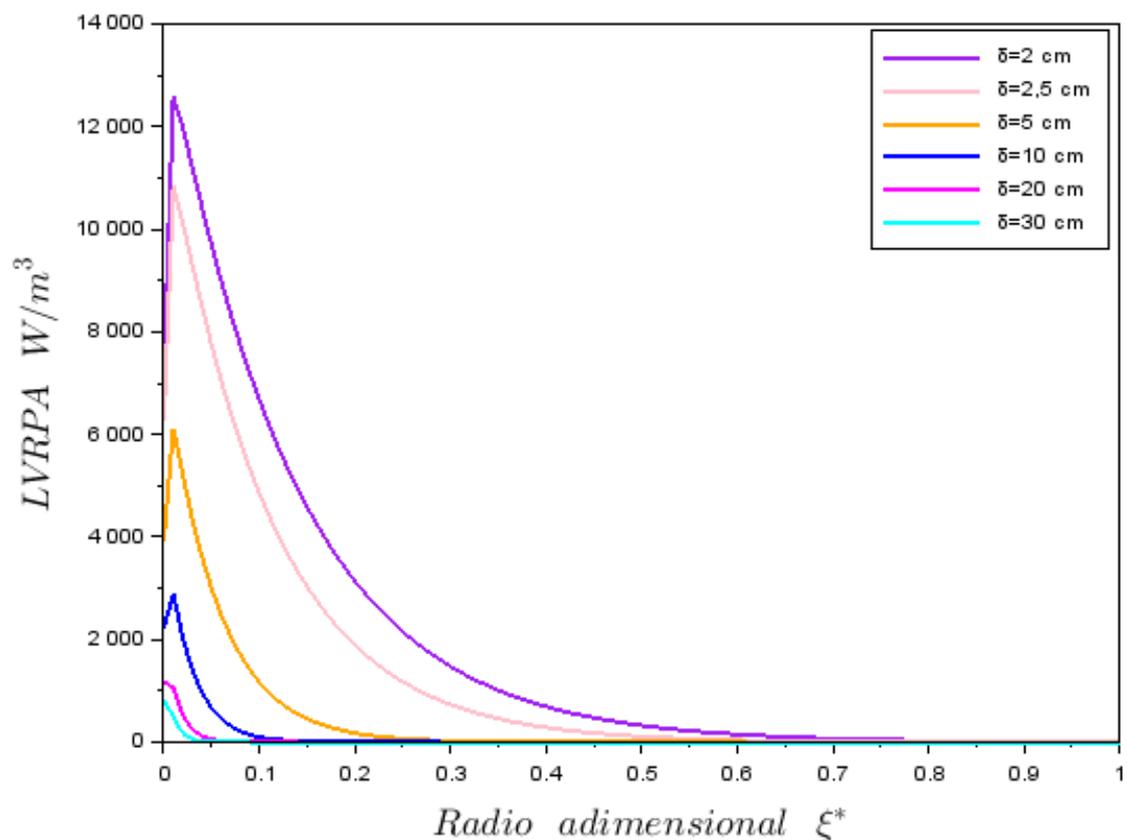


Figura A.2.4 Perfiles de LVRPA radial a diferentes espesores de anillo, manteniendo L=10 m.

Los resultados de la *Figura A.2.4* sugieren que la carga de catalizador empleada es muy alta para estas condiciones. De modo que ésta produce un efecto pantalla dentro del espacio de reacción que impide el paso de la radiación, y por lo tanto, la radiación no logra excitar las partículas de catalizador de toda la zona. Por ello, en la sección “2.5 Efecto de la carga de fotocatalizador” se analizará el efecto de la carga de catalizador sobre la conversión para predecir su cantidad óptima.

De igual manera, mediante la gráfica es posible visualizar que cuanto más grande es el espesor se produce un decremento más rápido de la LVRPA al alejarse de las paredes de la lámpara. Así, el espesor de anillo más adecuado es de 2 cm ya que maximiza la zona donde llega radiación UV.

No obstante, como también se ha podido observar, en la dirección radial el valor de la LVRPA decrece hasta aproximadamente el 95% del valor inicial alrededor de los 8 mm de espesor, este resultado sugiere que una opción sería reducir las dimensiones, de manera que la LVRPA decaiga lo menos posible y así utilizar menos cantidad de fotocatalizador.

Mediante el ajuste mencionado se realiza una gráfica (*Figura A.2.5*) de la distribución de la LVRPA para un espesor de 8 mm.

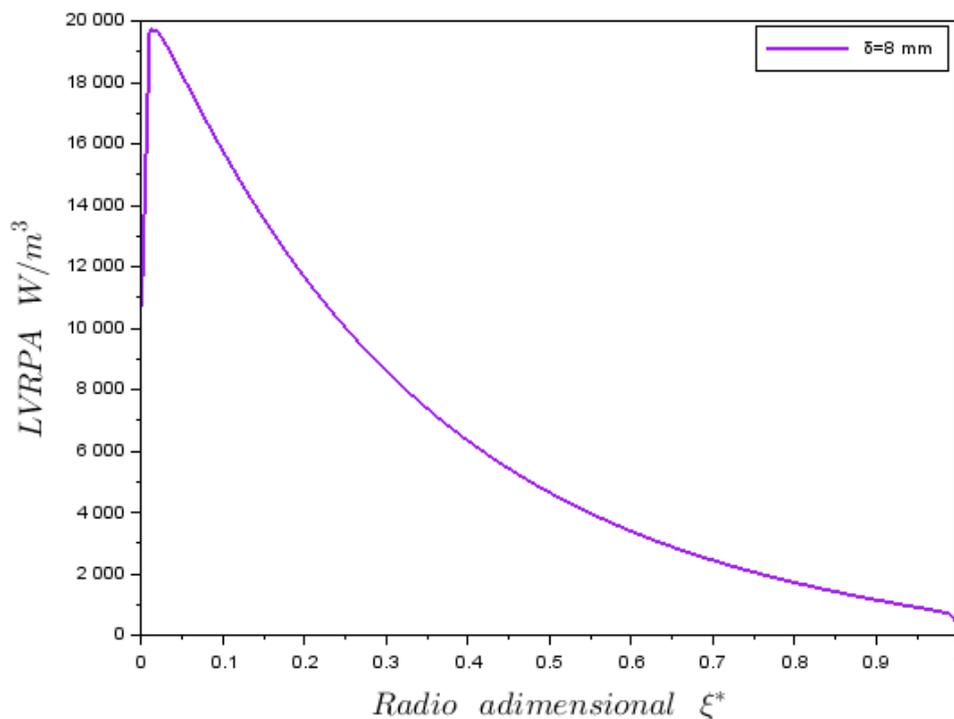


Figura A.2.5 Perfil de LVRPA radial para un espesor de anillo de 8 mm, manteniendo $L=10$ m.

El perfil de la LVRPA obtenido desde una perspectiva radial muestra que en toda la zona la radiación UV logra excitar las partículas de catalizador; sin embargo, aún es necesario evaluar las propiedades del reactor, tales como el flujo multifásico y la cinética, pues estos también son cruciales para poder definir la geometría en un reactor fotocatalítico.

2.3 MODELO CINÉTICO

En fotocatalisis heterogénea, la mayoría de los autores coinciden al indicar que la velocidad de reacción es directamente proporcional a la fracción de la superficie del catalizador recubierta por el sustrato, por lo que habitualmente se utiliza un modelo cinético del tipo Langmuir-Hinshelwood (L-H) para describir el proceso.

En este modelo se asume que el oxígeno y el sistema de herbicidas ocupan sitios diferentes y su absorción no es competitiva. Además, se supone que los distintos herbicidas compiten por los mismos sitios de absorción en la superficie del fotocatalizador y debido a que el oxígeno es alimentado continuamente al sistema, se considera que su concentración se mantiene constante.

$$-r_j = \frac{k_j \cdot K_j \cdot C_j}{1 + K_1 \cdot C_{10} + K_2 \cdot C_{20} + K_3 \cdot C_{30}} \quad \text{con } j = 1, 2, 3 \quad (\text{A.2.17})$$

Donde,

- ❖ K_j , Constante de unión del reactivo j $\left(\frac{L}{mol}\right)$.
- ❖ r_j , Velocidad de reacción del reactivo j $\left(\frac{mol}{L \cdot s}\right)$.
- ❖ k_j , Constante de velocidad de reacción del reactivo j $\left(\frac{mol}{L \cdot s}\right)$.
- ❖ C_j , Concentración del reactivo j $\left(\frac{mol}{L}\right)$.
- ❖ C_{j0} , Concentración inicial del reactivo j $\left(\frac{mol}{L}\right)$.

Estudios anteriores confirman que la constante de unión de cada uno de los reactivos no se ve afectada por la radiación absorbida dentro del fotorreactor, sin embargo la constante de

velocidad de reacción sí que puede depender del campo de radiación. La radiación absorbida se evalúa a través de la velocidad volumétrica de absorción de fotones (LVRPA), calculada utilizando el modelo de seis flujos.

Por lo que, una vez establecida la parte que describe la dependencia de la velocidad de reacción con la concentración de reactivo, el siguiente paso es obtener el efecto de radiación sobre la velocidad de reacción. Para ello es necesario conseguir una expresión que esté en función de la velocidad de absorción de fotones, la cual se puede expresar como:²⁶

$$-r_j = k_{T,j} \cdot (LVRPA)^m \cdot \frac{K_j \cdot C_j}{1 + \sum_{j=1}^n K_j \cdot C_{j0}} \quad (\text{A.2.18})$$

2.4 BALANCE DE MATERIA

$$SALIDA - ENTRADA + ACUMULACIÓN = GENERACIÓN$$

Para definir el balance de materia se opera en forma diferencial y en estado estacionario; por lo tanto, no presenta acumulación, eso es:

$$F_j + dF_j - F_j + 0 = R_j \cdot dV \quad (\text{A.2.19})$$

Operando se obtiene la siguiente expresión:

$$dF_j = R_j \cdot dV \quad (\text{A.2.20})$$

Tomando en consideración la definición de R_j ,

$$R_j = v_j \cdot r_j \quad (\text{A.2.21})$$

y sustituyendo R_j en la ecuación A.2.21, se obtiene:

$$dF_j = v_j \cdot r_j \cdot dV \quad (\text{A.2.22})$$

²⁶ Li Puma, G. Toepfer, B. Gora, A. (2007). "Photocatalytic oxidation of multicomponent systems of herbicides: scale-up of laboratory kinetics rate data to plan scale" en Applied Catalysis B: Environmental, vol. 124, issues. 3-4, p. 124-132.

Teniendo en cuenta que $v_j = -1$ y sustituyendo la expresión de velocidad de reacción, quedaría:

$$dF_j = -k_{T,j} \cdot LVRPA^m \cdot \frac{K_j \cdot C_j}{1 + \sum_{j=1}^n K_j \cdot C_{j0}} \cdot dV \quad (A.2.23)$$

A continuación, se define el parámetro C_j :

$$C_j = \frac{F_j}{Q_v} \quad (A.2.24)$$

Sustituyendo la expresión anterior y reorganizando los términos se tiene:

$$\frac{dF_j}{F_j} = -k_{T,j} \cdot LVRPA^m \cdot \frac{K_j \cdot Q_v^{-1}}{1 + \sum_{j=1}^n K_j \cdot C_{j0}} \cdot dV \quad (A.2.25)$$

Finalmente, considerando como condiciones iniciales $t = 0$ y $F_j = F_{j0}$ en la integración de este modelo cinético, se obtiene lo siguiente:

$$F_j = F_{j0} \cdot \exp\left(-\frac{K_j}{Q_v} \cdot \frac{k_{T,j} \cdot \left(\int_V (LVRPA)^m dV\right)}{1 + \sum_{j=1}^n K_j \cdot C_{j0}}\right) \quad (A.2.26)$$

Donde,

- ❖ $k_{T,j}$, Constante cinética independiente de la absorción de fotones e incluye el rendimiento cuántico primario para la generación de huecos de electrones dentro del fotocatalizador $\left(\frac{\text{mol}}{\text{L} \cdot \text{min}} \times \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^3}\right)^{-0,5}\right)$.
- ❖ LVRPA, Velocidad volumétrica de absorción de fotones $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^3}\right)$.
- ❖ n , Cantidad de herbicidas en la solución.
- ❖ m , Orden de la reacción que depende de la eficiencia de formación y recombinación de huecos de electrones en la superficie del catalizador y toma un valor entre 0,5 y 1.
- ❖ V , Volumen total de la suspensión (L).

- ❖ K_j , Constante de unión del reactivo j $\left(\frac{L}{mol}\right)$.
- ❖ F_j , Caudal molar de salida de cada especie $\left(\frac{mol}{min}\right)$.
- ❖ F_{j0} , Caudal molar de entrada de cada especie $\left(\frac{mol}{min}\right)$.

Se ha fijado un valor de 0,5 para m puesto que de acuerdo con lo recopilado en la literatura ha dado buenos resultados para la oxidación fotocatalítica de los pesticidas sobre TiO_2 -P25.

Para la resolución de la ecuación A.2.26 se utilizan las constantes cinéticas determinadas en experimentos de un solo componente con cada herbicida que se muestran en la Tabla A.2.3.

Tabla A.2.3 Parámetros cinéticos intrínsecos independientes de la absorción de radiación.¹¹

HERBICIDA	$k_{T,j} \times 10^{-6} \left(\frac{mol \cdot L^{-1}}{min} \times (W \cdot m^{-3})^{-0.5}\right)$	$K_j \times 10^5 \left(L \cdot mol^{-1}\right)$
Isoproturón	$35,751 \pm 0,291$	$5,7926 \pm 0,6012$
Simazina	$9,6674 \pm 0,077$	$6,1005 \pm 0,9654$
Propazina	$10,831 \pm 0,062$	$4,2802 \pm 0,7899$

Actualmente se está a la espera de la normativa que debe legislar el Gobierno Central y/o Autonómico para establecer la calidad del agua requerida en cada una de las posibles aplicaciones de reutilización, y con ello, dictaminar medidas restrictivas para los contaminantes emergentes. En el presente proyecto se persigue alcanzar alrededor de un 70% de eliminación de los contaminantes emergentes.

De modo que, se analizarán distintos valores para el caudal a tratar con el objeto de conseguir una conversión mínima del 70%.

¹¹ Li Puma, G. Puddu, V. Gora, A. Toepfer, B. (2006). "Photocatalytic oxidation of herbicides in single-component and multicomponent systems: reaction kinetics analysis" en Applied Catalysis B: Environmental, vol. 65, issues. 1-2, p. 1-10.

Pero para tener una primera estimación del caudal que se puede tratar se realiza un ensayo usando el contaminante más desfavorable por la menor constante de unión, la propazina, a las condiciones óptimas, es decir, con una LVRPA constante e igual a la máxima posible en un reactor con la geometría considerada.

Así entonces, se reorganizan los términos de la ecuación A.2.26 para el cálculo del caudal máximo:

$$\ln\left(\frac{C_j \cdot Q_v}{C_{j0} \cdot Q_v}\right) = -\frac{K_j}{Q_v} \cdot \frac{k_{T,j} \cdot (LVRPA_{max})^{0.5}}{1 + \sum_{j=1}^n K_j \cdot C_{j0}} \quad (A.2.27)$$

Por lo que, considerando que el reactor es homogéneo y conociendo que el valor de LVRPA máximo es de $19.736,874 \left(\frac{W}{m^3}\right)$, se procede a sustituir todos los valores conocidos.

$$\begin{aligned} & \ln\left(\frac{1,3059 \times 10^{-9}}{4,353 \times 10^{-9}}\right) \\ &= -\frac{4,2802 \times 10^5}{Q_v} \\ & \cdot \frac{10,831 \times 10^{-6} \cdot (19.736,874)^{0.5}}{1 + 5,7926 \times 10^5 \cdot 3,393 \times 10^{-7} + 6,1005 \times 10^5 \cdot 3,471 \times 10^{-7} + 4,2802 \times 10^5 \cdot 3,047 \times 10^{-7}} \end{aligned}$$

Despejando, se obtiene el caudal:

$$Q_v = 351,559 \left(\frac{L}{min}\right)$$

De esta forma, se obtiene el caudal máximo que podrá tratar el fotorreactor en las condiciones óptimas de operación.

Una vez conocidos estos valores, se procede a plantear la integral volumétrica en coordenadas cilíndricas para su posterior resolución.

En este caso, la LVRPA no depende de la dimensión angular de las coordenadas cilíndricas dado que el sistema tiene un eje de simetría axial por lo que la integral se quedaría en 2π .

$$\int_{V_r} (LVRPA)^{0,5} dV_r = \int_{V_r} (LVRPA)^{0,5} r d\theta dz dr = \int_0^{2\pi} \int_0^H \int_{\eta R}^R (LVRPA)^{0,5} r d\theta dz dr \quad (A.2.28)$$

Seguidamente se transforma la integral para que esté en función de variables adimensionales como la velocidad volumétrica de absorción de fotones (LVRPA).

Para la longitud adimensional z^* ,

$$z = H \cdot z^* \quad (A.2.29)$$

$$dz = H \cdot dz^* \quad (A.2.30)$$

Para el espesor adimensional ξ^* ,

$$\xi^* = \frac{r - \eta R}{R - \eta R} \quad (A.2.31)$$

$$r = \xi^* \cdot (R - \eta R) + \eta R \quad (A.2.32)$$

$$dr = (R - \eta R) d\xi^* \quad (A.2.33)$$

Quedando la integral volumétrica así:

$$\int_{V_r} (LVRPA)^{0,5} dV_r = 2\pi \int_0^1 \int_0^1 (LVRPA)^{0,5} \cdot H \cdot (\xi^* \cdot (R - \eta R) + \eta R) \cdot (R - \eta R) dz^* d\xi^* \quad (A.2.34)$$

Sustituyendo los valores conocidos, se obtiene:

$$\int_{V_r} (LVRPA)^{0,5} dV_r$$

$$= 2\pi \int_0^1 \int_0^1 (LVRPA)^{0,5} \cdot 10 \cdot (\xi^* \cdot (0,024 - 0,016) + 0,016) \cdot (0,024 - 0,016) dz^* d\xi^*$$

Finalmente, resolviendo la integral haciendo uso del programa Scilab 6.0.1 y sustituyendo los valores para los distintos pesticidas en la ecuación A.2.26, se ha representado el perfil de degradación dependiente de la integral volumétrica de este sistema de herbicidas (Figura A.2.6) y los valores de conversión en función de la integral volumétrica (Figura A.2.7).

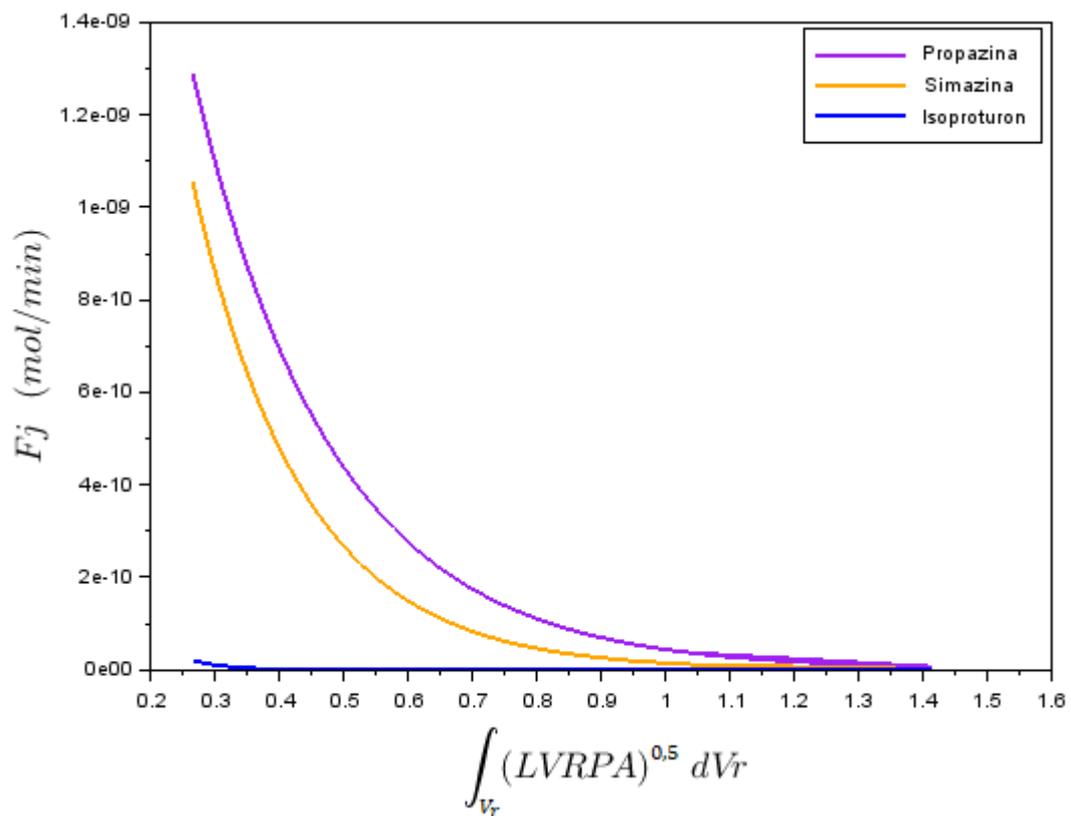


Figura A.2.6 Perfil de degradación de este sistema de herbicidas, $Q = 1 \frac{L}{min}$

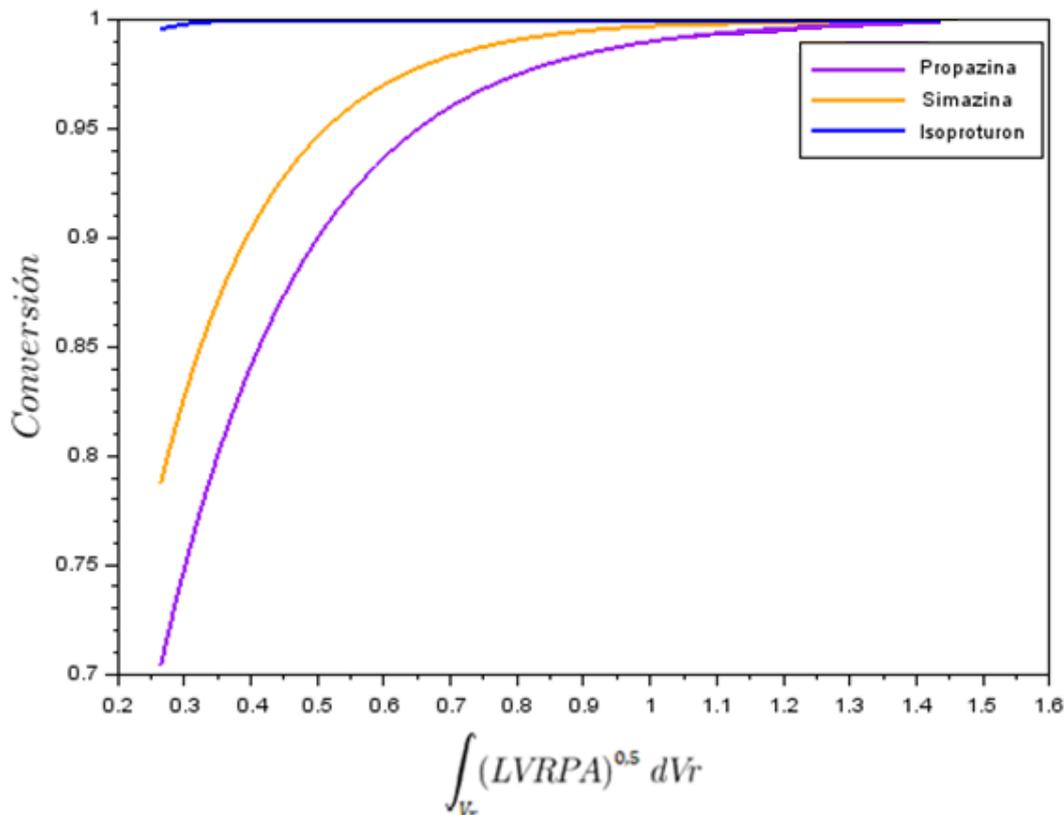


Figura A.2.7 Conversión de cada uno de los pesticidas, $Q = 1 \frac{L}{min}$

Bajo estas condiciones se da que el isoproturon presenta una tasa de degradación más rápida que la simazina y la propazina y la degradación de simazina fue ligeramente más rápida que la de propazina; esta diferencia entre el isoproturón y las dos azinas puede darse primeramente por un mayor grado de cobertura de la superficie del fotocatalizador de acuerdo con los resultados de adsorción oscura.¹¹ En segundo lugar, se puede tratar por las estructuras moleculares y la ruta de degradación que se sigue.

No obstante, para el caudal a tratar seleccionado, en las condiciones más desfavorables se alcanza una degradación del 70% en la propazina, mientras que para la simazina y el isoproturon un 78% y 99%, respectivamente.

¹¹ Li Puma, G. Puddu, V. Gora, A. Toepfer, B. (2006). "Photocatalytic oxidation of herbicides in single-component and multicomponent systems: reaction kinetics analysis" en Applied Catalysis B: Environmental, vol. 65, issues. 1-2, p. 1-10.

2.5 EFECTO DE LA CARGA DE FOTOCATALIZADOR

La carga de catalizador es un parámetro importante para el rendimiento de un reactor fotocatalítico. Como se ha podido observar anteriormente, conforme aumenta la carga de catalizador, disminuye la distancia radial con la que se propaga la intensidad de radiación ultravioleta y por lo tanto su alcance en el espacio del reactor donde se encuentra la suspensión, sin embargo; los valores de la LVRPA se ven afectados de manera positiva ya que también aumenta el coeficiente de absorción, lo cual es deseable, ya que éste se relaciona directamente con la cinética química.

No obstante, hay que tener presente que es importante encontrar una relación óptima entre la concentración del fotocatalizador, la intensidad de la fuente ultravioleta y las dimensiones del fotorreactor, ya que el diseño depende íntimamente de estas propiedades.

Como el valor de la carga de catalizador se había estimado de la bibliografía, se ha decidido estudiar el valor óptimo de éste. En la *Figura A.2.8* se muestran los valores de LVRPA promedio en función de la carga de catalizador.

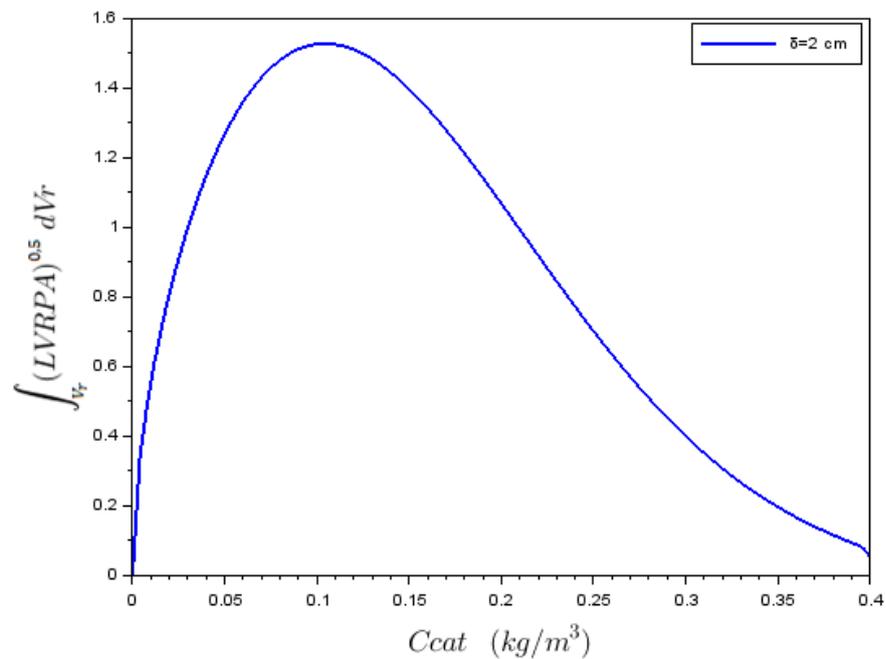


Figura A.2.8 Valores de LVRPA en función de la carga de catalizador.

De la misma figura se desprende y confirma que la cantidad utilizada anteriormente de catalizador $\left(0,4 \frac{kg}{m^3}\right)$ no es adecuada para reactores con estas dimensiones.

Por este motivo, se representan de nuevo los valores de LVRPA promedio para diferentes concentraciones de catalizador pero en un intervalo más acotado para una mejor visualización. Así pues, conociendo que el espesor límite es de 30 cm se realiza la gráfica para un espesor de 2 cm y de 20 cm, con las que se obtiene una primera estimación del intervalo de valores de la carga de catalizador apropiados para estas dimensiones.

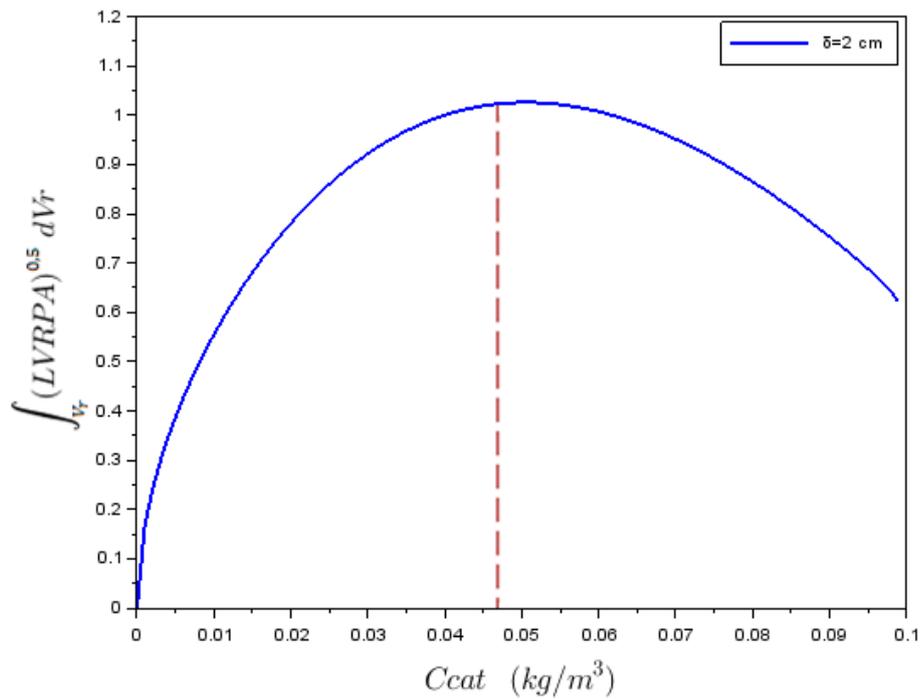


Figura A.2.9 Valores de LVRPA en función de la carga de catalizador y determinación de cantidad óptima.

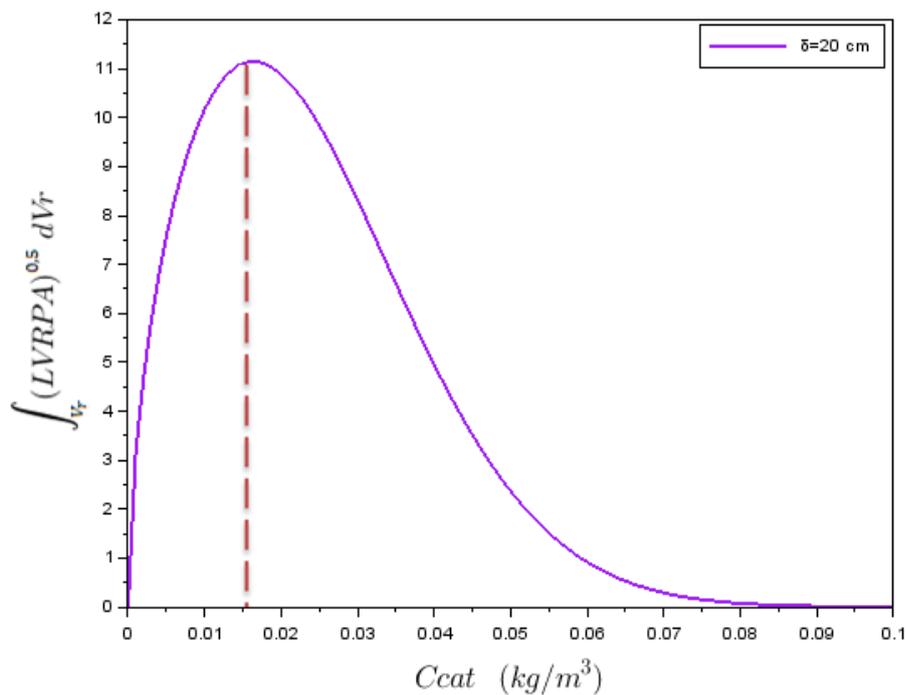


Figura A.2.10 Valores de LVRPA en función de la carga de catalizador y determinación de cantidad óptima.

En la *Figura A.2.9* y la *Figura A.2.10* puede apreciarse que la concentración óptima de catalizador está relacionada con el espesor del reactor, de modo que se procede a encontrar la relación óptima entre la carga de fotocatalizador, espesor y capacidad de caudal a tratar.

Esta determinación se llevó a cabo en la propazina, ya que la degradación de este herbicida transcurre más lentamente y si éste se reduce hasta la cantidad deseada, los otros contaminantes seleccionados también lo harán y en una proporción mayor.

Se estudian varios espesores para diferentes cargas de catalizador que están comprendidas entre 0,01 y 0,05 $\frac{kg}{m^3}$; que se basan en los resultados obtenidos en las figuras anteriores. Cabe señalar que se analiza un intervalo de concentración tan amplio para poder abastecer la mayor cantidad de opciones en cada espesor.

También es importante mencionar que al modificar la carga de catalizador, los coeficientes específicos de absorción y dispersión varían; sin embargo, como estos parámetros no se pueden medir experimentalmente se han mantenido los valores, aunque ello suponga introducir incertidumbre en los resultados.

En las siguientes tablas se muestran los valores calculados para los parámetros mencionados. Es notorio que la degradación de los distintos herbicidas se vio favorecida con la disminución en la concentración del fotocatalizador.

Tabla A.2.4 Resultados de los parámetros con una carga de catalizador de 0,05 kg/m^3 .

CARGA DE CATALIZADOR DE 0,05 (kg/m^3)							
δ (cm)	2	5	10	15	20	25	30
Q (L/min)	2,6	3,8	-	-	-	-	-
Conversión (%)	70	70	-	-	-	-	-

Tabla A.2.5 Resultados de los parámetros con una carga de catalizador de 0,04 kg/m^3 .

CARGA DE CATALIZADOR DE 0,04 (kg/m^3)							
δ (cm)	2	5	10	15	20	25	30
Q (L/min)	2,6	4,3	-	-	-	-	-
Conversión (%)	70	70	-	-	-	-	-

Tabla A.2.6 Resultados de los parámetros con una carga de catalizador de 0,03 kg/m³.

CARGA DE CATALIZADOR DE 0,03 (kg/m ³)							
δ (cm)	2	5	10	15	20	25	30
Q (L/min)	-	4,7	-	-	-	-	-
Conversión (%)	-	70	-	-	-	-	-

Tabla A.2.7 Resultados de los parámetros con una carga de catalizador de 0,02 kg/m³.

CARGA DE CATALIZADOR DE 0,02 (kg/m ³)							
δ (cm)	2	5	10	15	20	25	30
Q (L/min)	-	4,9	7,4	8,0	-	-	-
Conversión (%)	-	70	70	70	-	-	-

Tabla A.2.8 Resultados de los parámetros con una carga de catalizador de 0,01 kg/m³.

CARGA DE CATALIZADOR DE 0,01 (kg/m ³)							
δ (cm)	2	5	10	15	20	25	30
Q (L/min)	-	-	8,4	11,5	13,5	14,6	15,1
Conversión (%)	-	-	70	70	70	70	70

Entre las alternativas propuestas, la opción más favorable es utilizar un espesor de 30 cm con una carga de catalizador de 0,01 $\frac{kg}{m^3}$, ya que permite tratar un caudal de 15,1 $\frac{L}{min}$. Esta elección se debe, principalmente, a que el caudal de agua residual que se necesita tratar es grande por lo que poder abarcar la mayor cantidad posible es preferible respecto a un menor espesor, siempre que se consiga la misma conversión.

El efecto en el caudal supone un flujo óptimo que permita la exposición de todo el volumen de solución a la irradiación UV favoreciendo la fotoactivación del catalizador sobre los contaminantes. Se logró reducir la concentración de los contaminantes al límite establecido con un caudal de 15,1 $\frac{L}{min}$ para un espesor de 30 cm, otros ensayos realizados a mayores caudales no alcanzaban la conversión deseada.

Finalmente, tras la selección del modelo de reactor, se llevó a cabo la resolución de la LVRPA en el reactor tanto desde una perspectiva axial como una radial para una mejor visualización de los resultados, haciendo uso del programa Octave 5.2.0. La representación se muestra en la *Figura A.2.11*.

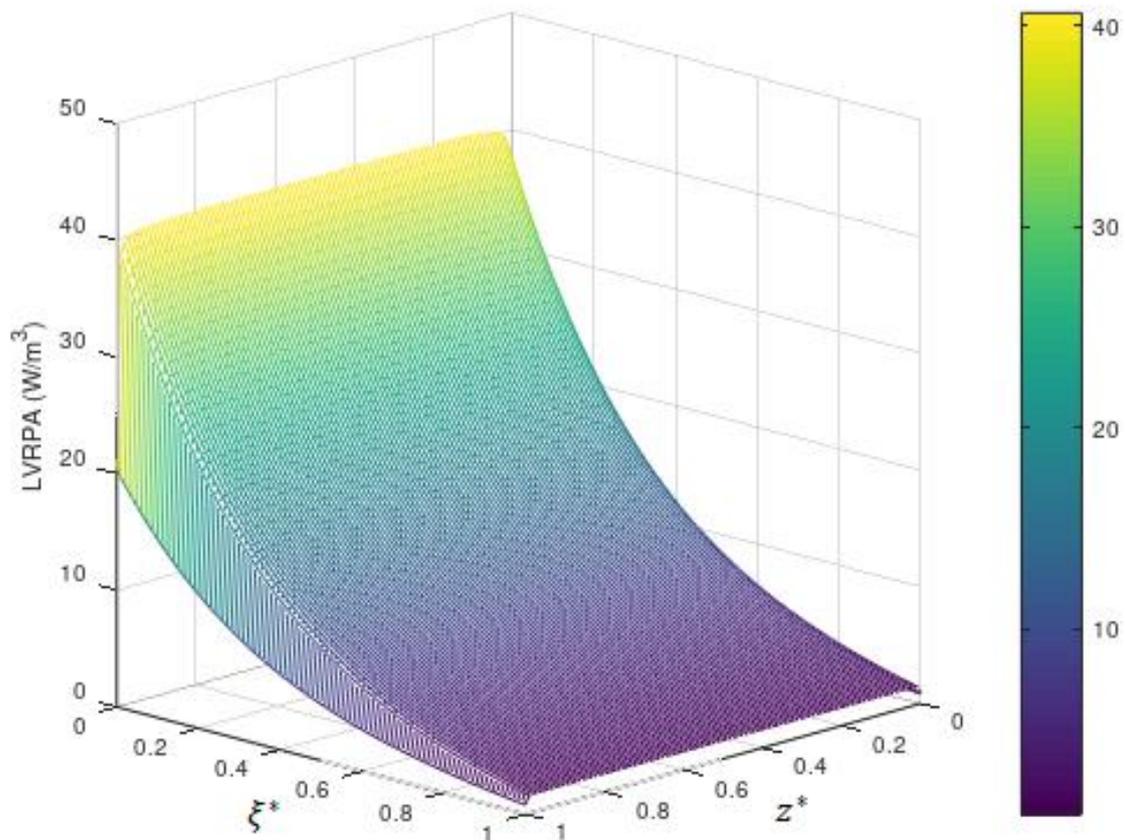


Figura A.2.11 Representación tridimensional de la LVRPA.

Analizando los resultados se observa que cerca del centro del reactor anular (coordenada radial=0,001 m) la tasa de absorción de fotones es mayor y conforme se aproxima a la pared exterior del reactor (coordenada radial=0,99), el perfil de la LVRPA disminuye debido a que las partículas cercanas a la fuente de radiación hacen sombras que no permiten la iluminación de aquellas partículas más alejadas. En cuanto al perfil de la LVRPA axial, la lámpara emite intensidades de radiación más altas en el centro y más bajas hacia los bordes. Por lo que la tasa de absorción de fotones es mayor en la región central del reactor (coordenada axial=0,5).

2.6 EFECTO DE LAS DIMENSIONES DEL REACTOR

Las dimensiones del reactor son un factor importante ya que intervienen directamente en el volumen irradiado de fotocatalizador, lo que afecta directamente a la velocidad de reacción. A su vez, influyen en la velocidad de flujo lo que determina la distribución homogénea del catalizador en el espacio de reacción.

Anteriormente, se ha estudiado el efecto del espesor de la corona cilíndrica pero es importante determinar también la longitud más adecuada para el reactor.

Para analizar el efecto de la longitud del reactor fotocatalítico se empleó un espesor de anillo de 30 cm, que como se ha mostrado en otro apartado es el más conveniente, y se varía la longitud. Suponiendo que la potencia de la lámpara se mantiene constante en todos los casos y que su longitud es siempre igual a la del reactor.

En la *Figura A.2.12* se muestra el resultado del efecto de las dimensiones cuando se mantiene constante el espesor y se varía la longitud del reactor. Se observa que al disminuir la longitud del reactor, manteniendo el mismo caudal, la conversión empieza a decrecer ya que se permite una exposición menor frente a la luz UV.

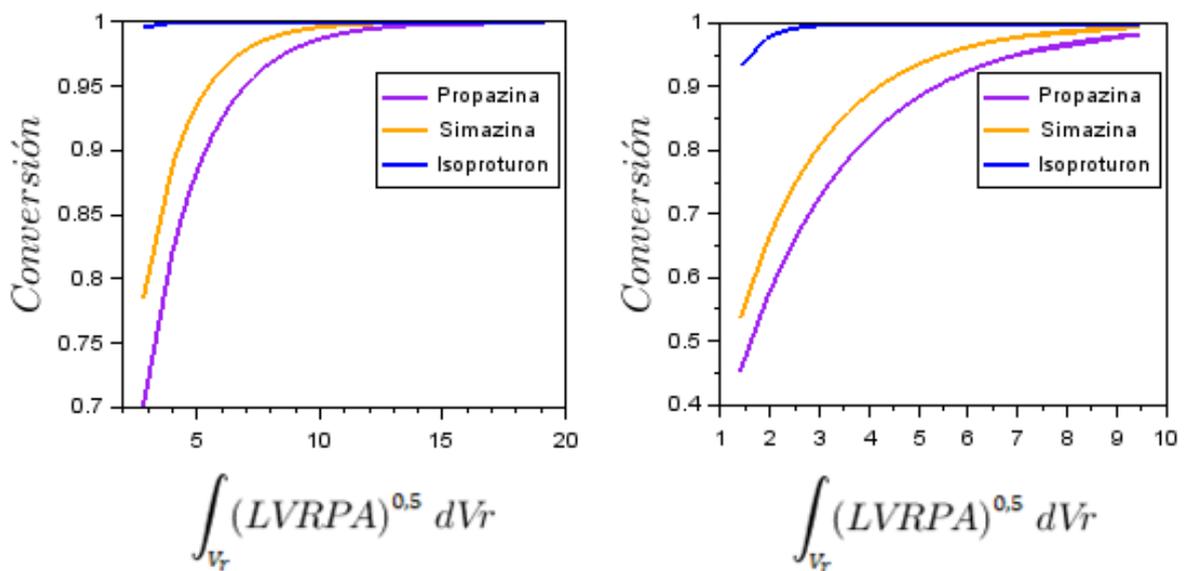


Figura A.2.12 Efecto de la longitud del reactor, para una L=10 m y L=5 m, respectivamente.

2.7 REACTOR MULTITUBULAR

El reactor fotocatalítico requiere de unas dimensiones mayores a las mencionadas para poder tratar el caudal de entrada de la planta depuradora. Por lo que a partir de los resultados obtenidos en los análisis anteriores, se empieza un diseño más exhaustivo del fotorreactor.

A partir del funcionamiento del fotorreactor anular seleccionado anteriormente en la sección “2.5 Efecto de la carga de fotocatalizador” se procede a diseñar un reactor multitubular, siendo los tubos las lámparas ultravioletas; con el propósito de tener un área de paso mayor y con esto un tiempo de residencia más grande para que la reacción pueda avanzar más y se consiga tratar mayor caudal. Las fuentes están distribuidas en el interior de manera que en el punto donde finaliza el campo de radiación de una lámpara empieza el de otra (véase *Figura A.2.13*).

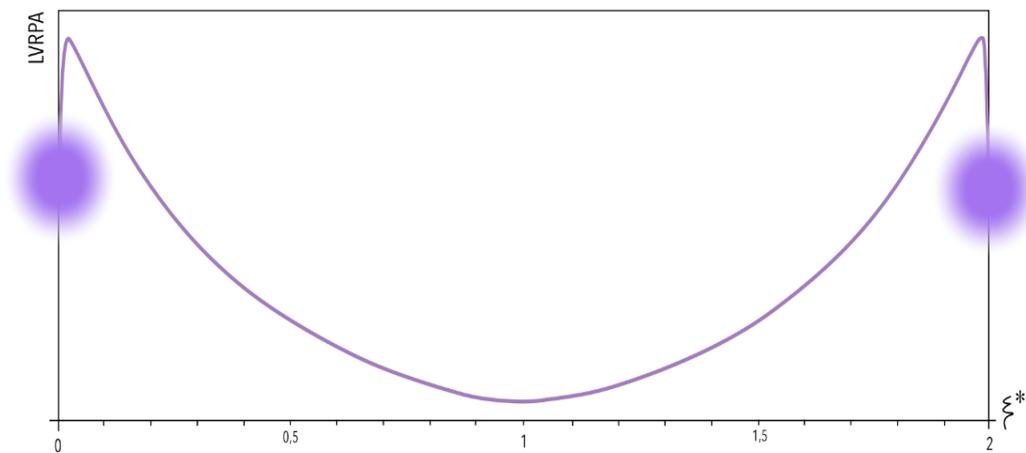


Figura A.2.13 Distribución de la LVRPA de dos lámparas ultravioletas adyacentes.

La configuración del reactor multitubular se asemeja a un conjunto de reactores anulares acumulados de la forma más compacta posible en serie y en paralelo. En la *Figura A.2.14* se muestra una representación del reactor multitubular con el apilamiento planteado de reactores anulares.

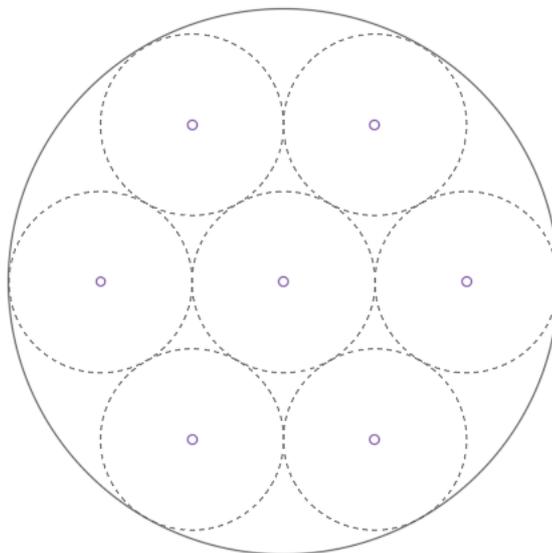


Figura A.2.14 Montaje del reactor multitubular.

A la hora de realizar los cálculos se considera que el reactor multitubular se puede descomponer en varios reactores anulares en paralelo, cada uno independiente del otro.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la sección “2.5 Efecto de la carga de fotocatalizador” tras la realización de una primera selección del dimensionamiento preferible para un reactor anular; se lleva a cabo un montaje que consiste en un apilamiento de reactores anulares individuales con un espesor de 30 cm en cada uno y una longitud de 10 m.

Una vez se descubren las dimensiones y el caudal que puede ser tratado en cada reactor anular, entonces se puede conocer el número total de reactores anulares precisos para tratar el caudal de entrada y así saber las fuentes ultravioletas necesarias que deben componer el reactor multitubular.

Posteriormente, es posible entonces determinar el diámetro del reactor multitubular. No obstante, después de conocer el diámetro, se decide analizar distintas longitudes para comprobar si la relación entre la longitud y el diámetro del reactor multitubular es la idónea. Puesto que el diámetro del reactor multitubular varía según el número de lámparas UV necesarias y esto se le puede atribuir a la longitud del reactor.

En la siguiente tabla se muestran los resultados del apilamiento de un conjunto de reactores de 30 cm de espesor, para unas longitudes específicas.

Tabla A.2.9 Valores de los parámetros característicos del sistema para distintas longitudes del reactor.

LONGITUD (m)	10	15	20
Caudal a tratar en cada reactor anular, Q (L/min)	15,1	28,0	43,3
Irradiancia (W/m^2)	80,9	121,3	161,8
Número de lámparas necesarias	1.085	585	379
Radio del reactor multitubular (m)	11,4	8,2	5,7

En vista de los datos expuestos en la *Tabla A.2.9*, se opta por reducir el número de lámparas UV y así, tener un reactor multitubular de menor diámetro.

Por consiguiente, se decide modificar la distribución de las lámparas de manera que el campo de radiación de cada una se solape totalmente con otro (véase *Figura A.2.15*). El objetivo es que la distribución de la LVRPA sea lo más homogénea y elevada posible dentro del reactor, y como consecuencia, se pueda tratar un caudal mayor en un mismo espacio. Además, con el ajuste mencionado la distribución de las fuentes es más compacta y se reduce el diámetro del reactor multitubular.

Analizando los resultados obtenidos previamente en la sección “2.5 Efecto de la carga de fotocatalizador” que muestran que la ecuación de la LVRPA es lineal con respecto a la intensidad, se supondría que los campos de radiación son linealmente aditivos.

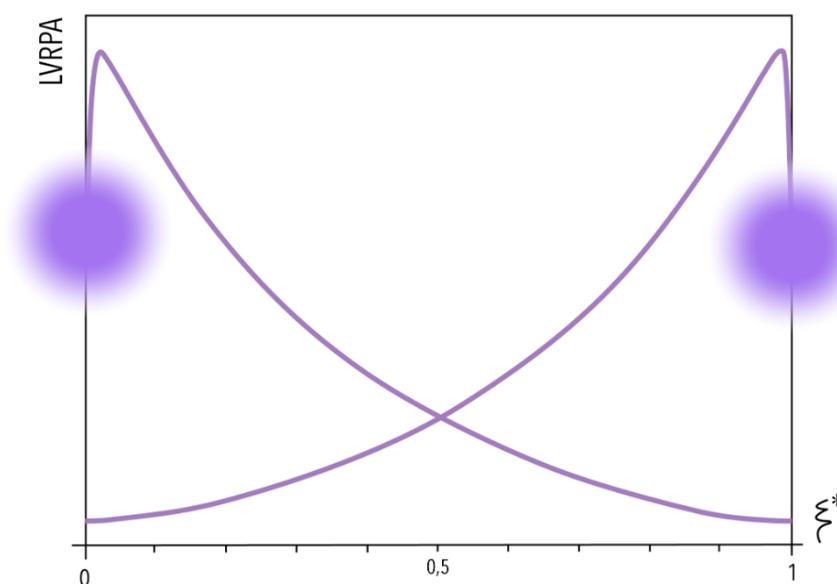


Figura A.2.15 Esquemmatización del solapamiento total del campo de radiación de dos lámparas adyacentes.

Dada la nueva distribución de las lámparas, la configuración del reactor multitubular se asemeja a un conjunto de reactores con geometría hexagonal compacta acumulados de la forma más compacta posible en serie y en paralelo.

En la *Figura A.2.16* se muestra una representación del apilamiento de los reactores individuales que componen el reactor multitubular y además, se puede apreciar la geometría hexagonal compacta de éstos.

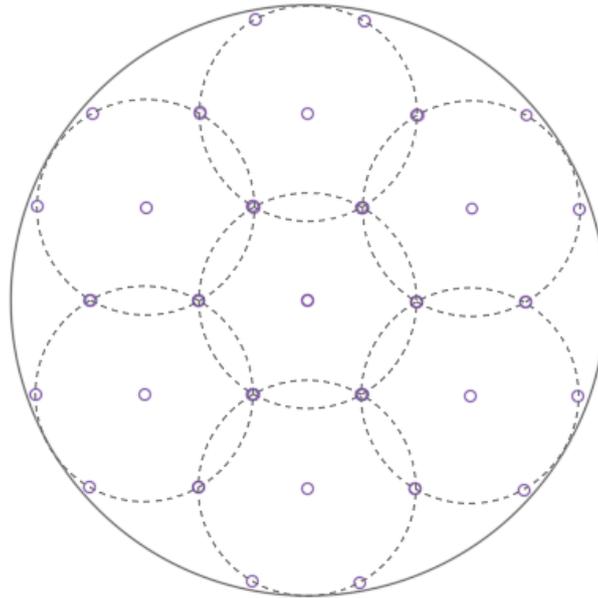


Figura A.2.16 Configuración del reactor multitubular.

La distribución de la LVRPA dentro de cada reactor individual depende de varias fuentes que están en distintas posiciones. Dada la complejidad de los cálculos, se decide considerar como reactor primario uno de los triángulos equiláteros que componen la estructura hexagonal compacta de los reactores individuales (ver *Figura A.2.17*), ya que es la unidad básica cuya replicación permite construir el reactor. Por lo tanto, el reactor elemental en esta configuración es un prisma triangular.

En la *Figura A.2.17* se puede observar el montaje del reactor multitubular en el que se resalta uno los reactores individuales que lo constituyen con la unidad básica que se repite definida, el triángulo equilátero.

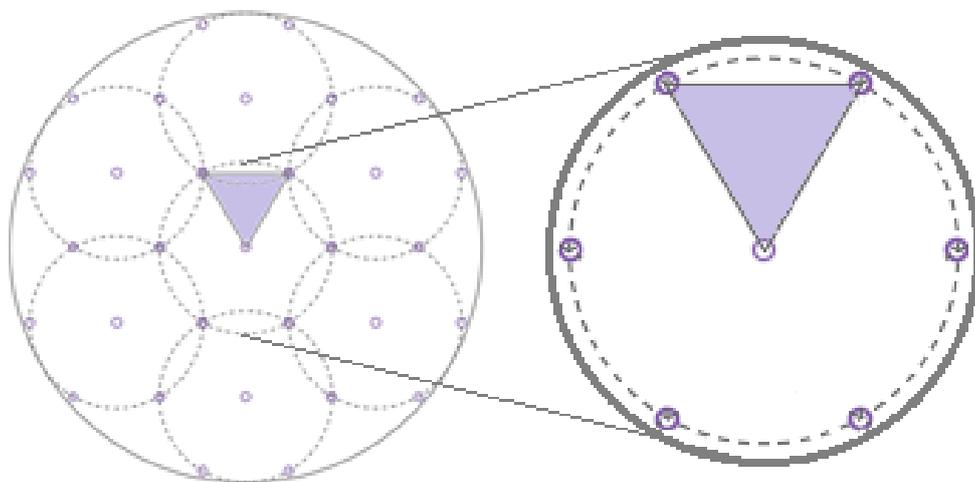


Figura A.2.17 Esquema detallado del montaje del reactor multitubular con el prisma triangular destacado.

Así mismo, dado el decrecimiento de la LVRPA al alejarse de la lámpara, se considera que sólo las tres lámparas que forman el prisma triangular son decisivas; aunque el efecto de la siguiente capa de lámparas no es totalmente despreciable, tiene una influencia pequeña.

Teniendo en cuenta que cada una de las lámparas está centrada en dos de los seis vértices del prisma triangular, es decir, en un vértice de cada triángulo equilátero que lo limita (ver *Figura A.2.18*). Es necesario fijar las coordenadas cilíndricas correspondientes a cada vértice para llevar a cabo los cálculos pertinentes a la LVRPA.

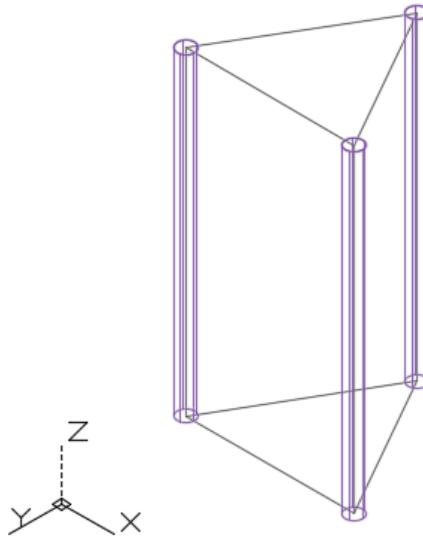


Figura A.2.18 Distribución de las lámparas en el prisma triangular.

El sistema de coordenadas cilíndricas (r, θ, z) se utiliza para definir un punto del espacio mediante un ángulo, una distancia con respecto a un eje y una altura en la dirección del eje.

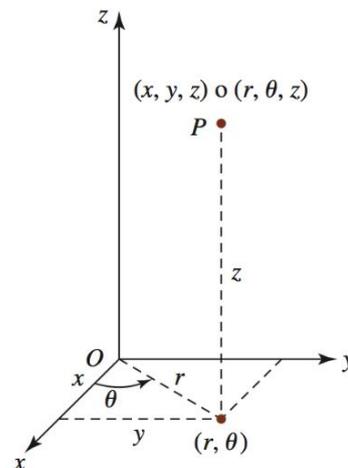


Figura A.2.19 Sistema de coordenadas.

Cálculos previos han demostrado que la LVRPA es prácticamente uniforme con respecto a la longitud del reactor (coordenada axial z) y solo decrece apreciablemente cerca de los extremos, por ende se puede suponer que la LVRPA tiene simetría axial.

En la *Tabla A.2.10* se definen las lámparas que forman el prisma triangular mediante el ángulo y el radio, considerando que el radio de cada fuente UV son 16 mm y la corona cilíndrica del reactor tiene un espesor de 300 mm.

Para que los cálculos pertinentes a la LVRPA sean correctos el espesor de la corona cilíndrica debe ir desde la pared de la lámpara hasta el centro de la fuente situada en el otro extremo del lado del prisma triangular.

Tabla A.2.10 Posición de las fuentes en el prisma triangular.

	r (m)	θ (radianes)
Lámpara 1	0	0
Lámpara 2	0,316	0
Lámpara 3	0,316	$\pi/3$

Una vez se conoce la posición de las lámparas ultravioletas, se procede a evaluar la intensidad de la LVRPA en el prisma triangular. Por simplicidad, una lámpara está posicionada en el origen de coordenadas, por lo que la coordenada radial de un punto en el espacio coincide con la distancia. Sin embargo, para conocer el radio (distancia) del punto que se está evaluando respecto a la posición de cada una de las dos fuentes restantes se emplea la *ecuación A.2.35*.

Mediante la siguiente ecuación se determina la distancia en coordenadas cilíndricas entre dos puntos que están en el mismo plano.

$$distancia = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot \cos(\theta_2 - \theta_1)} \quad (A.2.35)$$

Donde,

- ❖ r_1 , Coordenada radial del punto que se está evaluando (m).

- ❖ r_2 , Coordenada radial de la lámpara ultravioleta respecto a la que se está evaluando un punto (m).
- ❖ θ_1 , Coordenada acimutal del punto que se está evaluando (rad).
- ❖ θ_2 , Coordenada acimutal de la lámpara ultravioleta respecto a la que se está evaluando un punto (rad).
- ❖ *Distancia*, Radio del punto que se está evaluando respecto a una de las lámparas (m).

Los valores de las coordenadas en el punto 2, corresponden a los datos expuestos en la *Tabla A.2.10*. Según la lámpara ultravioleta respecto a la que se esté evaluando un punto, se utilizarán unos valores u otros.

Por otro lado, después de conocer la localización de los puntos evaluados en el plano, se aplica una transformación lineal que permite transformar las coordenadas cilíndricas a las coordenadas cartesianas. Estas transformaciones son:

$$x = r_1 \cdot \cos(\theta_1) \quad (\text{A.2.36})$$

$$y = r_1 \cdot \sin(\theta_1) \quad (\text{A.2.37})$$

$$z = z \quad (\text{A.2.38})$$

Se convierten las coordenadas cilíndricas (r, θ, z) a cartesianas (x, y, z) para facilitar la representación.

A continuación, conociendo que el reactor elemental de esta configuración es un prisma triangular, se realiza la representación de la intensidad de la LVRPA en uno de los triángulos equiláteros comprendidos en los distintos planos teóricos horizontales que conforman el prisma triangular (véase *Figura A.2.20*). Por lo tanto, el eje z va vertical a este plano que corta el prisma triangular y su valor se considera constante porque las tres fuentes están dentro del mismo plano.

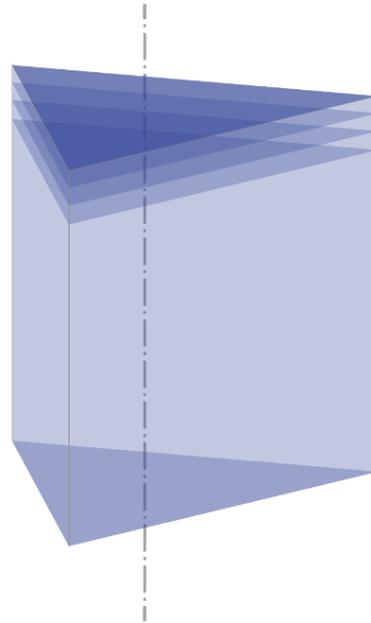


Figura A.2.20 Prisma triangular con perspectiva.

Para un plano central, el valor de la coordenada axial adimensional (z^*) es de 0,5 y la intensidad de fotones en el espacio de reacción tiene un valor de $126,8076 \frac{W}{m^2}$.

La intensidad de la LVRPA en cada punto de un triángulo equilátero comprendido en el plano central teórico horizontal que conforma el prisma triangular, sería:

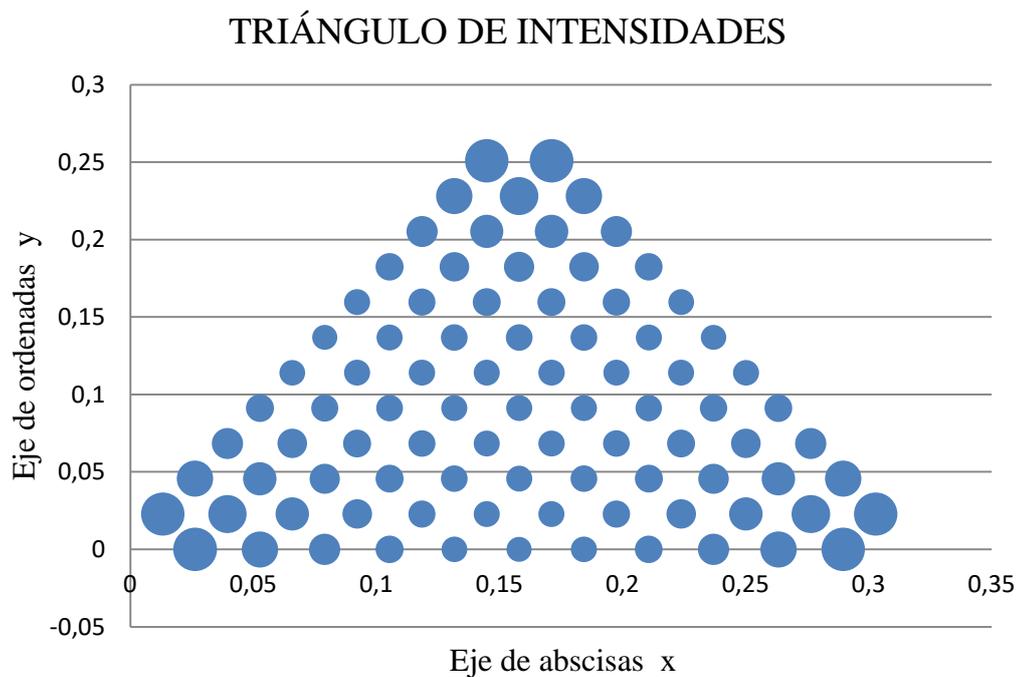


Figura A.2.21 Triángulo equilátero de intensidades.

En la *Figura A.2.21* se observa que la intensidad de la LVRPA en los distintos puntos evaluados es prácticamente homogénea, variando solamente en los extremos donde se aprecia un mayor grado de intensidad; lo que es congruente con lo reportado anteriormente.

Para visualizar el solapamiento del campo de radiación de las tres lámparas decisivas, en la *Figura A.2.22* se muestran los perfiles de LVRPA en función de la coordenada de abscisas, que en este caso corresponde con la coordenada radial del espacio de reacción.

Se recogen los puntos evaluados en la línea que une el centro de la lámpara 1 con el centro de la lámpara 2.

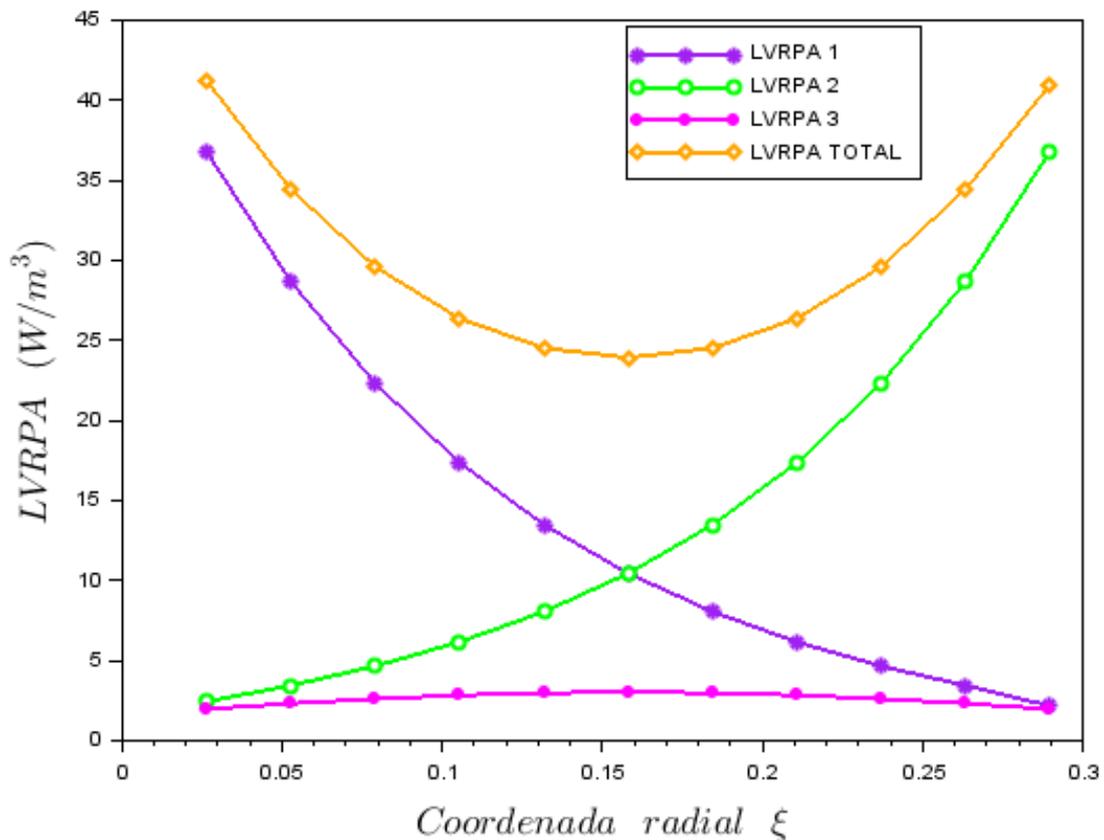


Figura A.2.22 Perfil de LVRPA radial para un espesor de la corona cilíndrica de 30 cm.

Se ha realizado el análisis de la intensidad de la LVRPA para un plano central porque el efecto de la altura del reactor es mínimo. No obstante, aunque en la mayor parte del volumen del prisma triangular el efecto de la coordenada z es bajo, se aprecia una decaída en los extremos.

Por lo que se representa de la misma manera la intensidad de la LVRPA en cada punto de un triángulo equilátero comprendido en uno de los planos teóricos horizontales más cercano a la base del prisma triangular.

El valor de la coordenada axial adimensional es de 0,01 y la intensidad de fotones en el espacio de reacción tiene un valor de $120,584 \frac{W}{m^2}$.

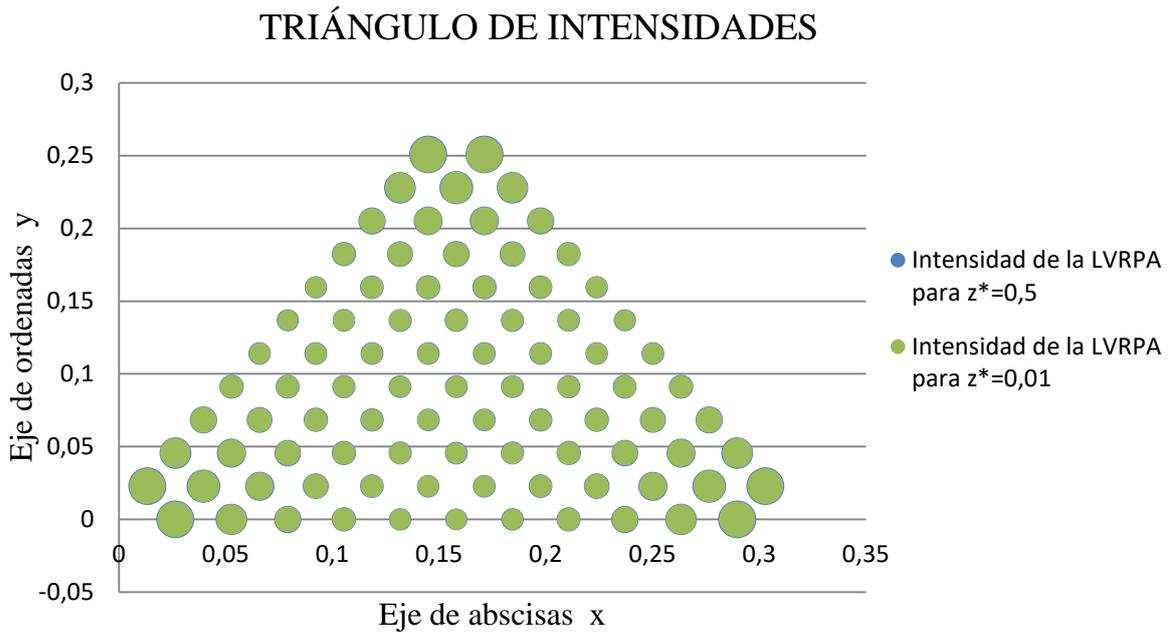


Figura A.2.23 Triángulo equilátero de intensidades.

En la *Figura A.2.23* se observa que en el triángulo equilátero comprendido en un plano cercano al extremo del prisma triangular, se consigue un grado de intensidad de la LVRPA ligeramente menor que al realizar el análisis en el plano central.

Así mismo, se decide representar la intensidad de la LVRPA en un triángulo equilátero comprendido en el plano teórico horizontal más cercano a la base del prisma triangular, puesto que es la posición más desfavorable.

El valor de la coordenada axial adimensional es 0,00 y la intensidad de fotones en el espacio de reacción tiene un valor de $63,468 \frac{W}{m^2}$ (véase *Figura A.2.24*).

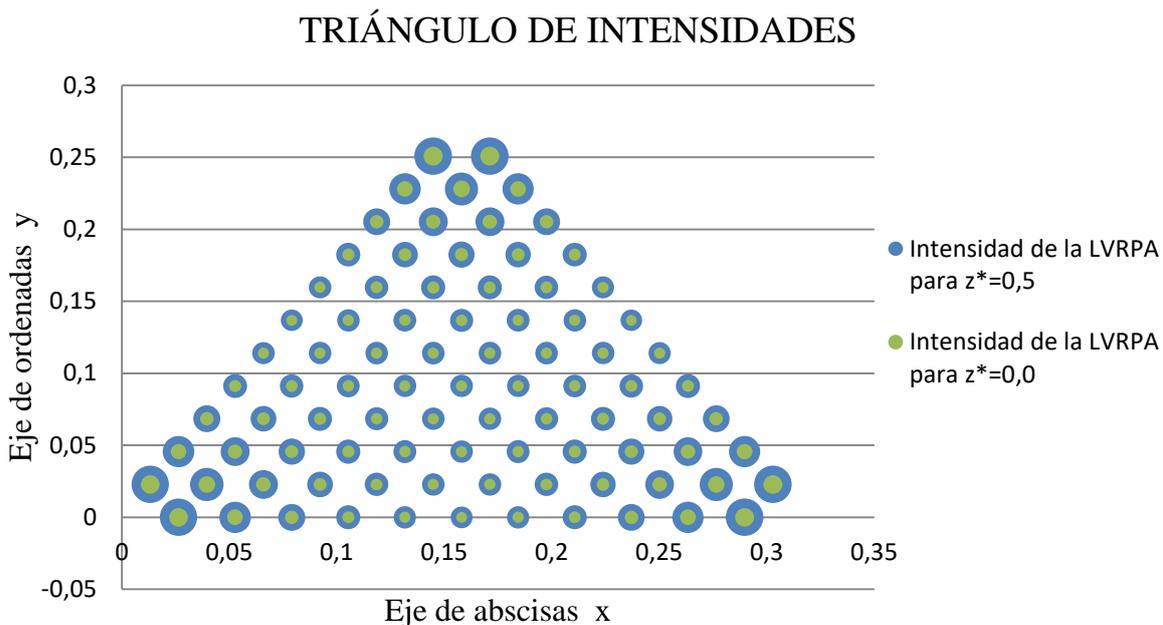


Figura A.2.24 Triángulo equilátero de intensidades.

En la *Figura A.2.24* se muestra que el grado de intensidad en la posición z más cercana a la base del reactor, difiere un poco de la intensidad que se obtiene en el resto de puntos de la coordenada axial.

No obstante, como la intensidad de la LVRPA difiere en un intervalo de valores estrecho es improbable que afecte notablemente a los resultados. Por lo tanto, se establece la consideración de que la distribución es independiente de la altura del reactor a la hora de calcular el caudal a tratar en el prisma triangular.

En la *Tabla A.2.11* se recogen los valores obtenidos con la nueva distribución de las lámparas ultravioletas.

Una vez se conoce el número de prismas triangulares necesarios, se reagrupan de forma que constituyan reactores con una geometría hexagonal compacta, siendo éstos los reactores elementales a la hora de distribuir las lámparas UV en el reactor multitubular.

Dicha configuración se encierra en una carcasa cilíndrica que comprende el reactor multitubular con el propósito de conseguir una figura lo más regular posible y evitar las zonas muertas. Estas zonas muertas, son espacios que no tienen las mismas condiciones de iluminación que las presentes en el interior de cada prisma triangular, debido a que el

campo de radiación de las lámparas UV prácticamente no afecta y por tanto, no se consigue la fotoactivación de los catalizadores que se encuentran en este punto.

Tabla A.2.11 Valores de los parámetros característicos del sistema.

LONGITUD (m)	10
Caudal a tratar en cada prisma triangular (L/min)	58,4
Irradiancia (W/m^2)	80,9
Número de prismas triangulares necesarios	281
Número de reactores con geometría hexagonal compacta necesarios	47

En estas condiciones cuando se distribuyen de la forma más compacta posible en serie y en paralelo los reactores con diseño hexagonal compacto necesarios para tratar el caudal de entrada en el reactor multitubular, quedan grandes espacios de reacción donde la iluminación es mucho menor. Estas zonas aparecen entre los reactores individuales distribuidos en la última capa y, entre éstos y la coraza del reactor multitubular (ver *Figura A.2.25*).

La presencia de zonas muertas produce apreciables disminuciones en la eficiencia, por lo que el montaje del reactor multitubular debe estar diseñado de manera que las lámparas ultravioletas instaladas se distribuyan equitativamente por todo el reactor. Con el objetivo de evitar las zonas muertas y así que no se cree un cortocircuito en el rendimiento de depuración (véase *Figura A.2.26*).

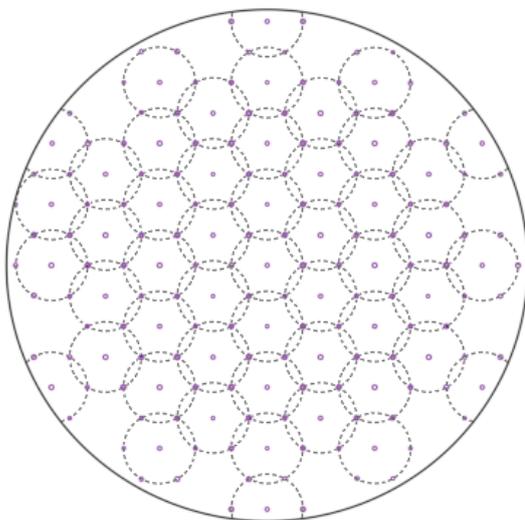


Figura A.2.25 Montaje del reactor multitubular con 47 reactores con geometría hexagonal compacta necesarios.

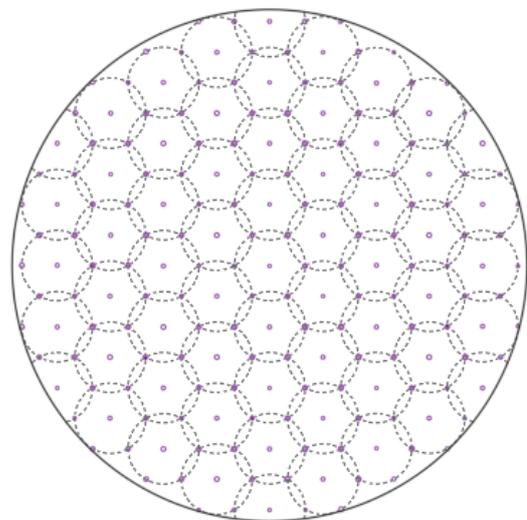


Figura A.2.26 Configuración ideal del reactor multitubular.

Por tanto, se decide ajustar la longitud del reactor de manera que aumente el número de reactores individuales necesarios y se complete la última capa de reactores, disminuyendo así las zonas muertas y obteniéndose una figura regular.

Tabla A.2.12 Valores de los parámetros característicos del reactor multitubular para distintas longitudes.

LONGITUD (m)	9	12,5
Caudal a tratar en cada prisma triangular (L/min)	50,5	81,6
Irradiancia (W/m ²)	72,8	101,1
Número de prismas triangulares necesarios	325	201
Número de reactores con geometría hexagonal compacta necesarios	55	34
Radio del reactor multitubular (m)	2,3	1,8

La configuración ideal del reactor multitubular es el apilamiento de 58 reactores individuales (véase *Figura A.2.26*), por lo que la opción que más favorece es la tercera; una longitud de 9 m y 55 reactores individuales necesarios para tratar el caudal de entrada. En este caso se tienen tres reactores con diseño hexagonal compacto de más, pudiéndose tratar un 5,45% más de caudal. Este margen de seguridad se utiliza para resguardar la consideración establecida a cerca de la independencia de la LVRPA con la coordenada axial z.

Sin embargo, también puede ajustarse la longitud del reactor de modo que disminuya el número de reactores necesarios y se reduzca una capa de reactores.

Tabla A.2.13 Resultados de los parámetros característicos del reactor multitubular para varias longitudes.

LONGITUD (m)	12	12,5	13
Caudal a tratar en cada prisma triangular (L/min)	76,7	81,6	86,5
Irradiancia (W/m ²)	90,071	101,116	105,16
Número de prismas triangulares necesarios	214	201	190
Número de reactores con geometría hexagonal compacta necesarios	36	34	32
Radio del reactor multitubular (m)	1,78		

En estas condiciones se reduce una capa de reactores con geometría hexagonal compacta, y la configuración ideal del reactor multitubular es el apilamiento de 35 reactores

individuales. Entre las distintas posibilidades, la mejor opción es la segunda; una longitud de 12,5 m y son necesarios 34 reactores individuales.

En esta ocasión se tiene un reactor con diseño hexagonal compacto de más, aumentando el caudal a tratar un 2,94%. Este margen de seguridad se utiliza para resguardar la consideración establecida a cerca de la independencia de la LVRPA con la coordenada axial z.

Previamente a analizar el porcentaje de conversión en los espacios de reacción con menor iluminación presentes entre la última capa de reactores individuales y la carcasa del reactor multitubular, se realiza la viabilidad económica de las dos posibles soluciones para decidir la configuración más óptima del reactor. El precio es un factor limitante para que las empresas apuesten por este tipo de tecnología.

2.7.1 ANÁLISIS DEL COSTE DE LAS POSIBLES SOLUCIONES

Se comparan las dos soluciones más adecuadas, respecto al coste de la coraza y el de las lámparas UV junto el coste energético.

Para la realización de un cálculo más preciso, se considera el coste energético y el de las lámparas durante un año, ya que es aproximadamente la vida útil estimada para estas fuentes artificiales.

El precio de la electricidad se determina a partir de la cuota para instalaciones industriales, distinguiendo la cuota diurna de la nocturna, teniendo en cuenta que cada una ocupa 12 horas diarias (véase *Tabla A.2.14*).

Tabla A.2.14 Coste de la electricidad.

	PRECIO (€/kWh)
Cuota diurna	0,06
Cuota nocturna	0,04

En la *Tabla A.2.15* se muestra el consumo eléctrico y el coste energético anual de una lámpara ultravioleta en función de la longitud que se requiere.

Tabla A.2.15 Consumo eléctrico y coste energético de una lámpara UV.

Longitud (m)	Potencia (kW)	Servicio (h/día)	Energía diaria (kWh)	Consumo anual (kWh)	Coste energético (€)
9	2,727	24	65,448	23.889	1.194,5
12,5	3,788	24	90,912	33.183	1.659,2

Con estos resultados, se determina el coste anual de las dos configuraciones seleccionadas para el reactor multitubular. En el documento “12. Estudio de la viabilidad económica”, se presentan los cálculos de manera más detallada.

Tabla A.2.16 Coste total de las posibles soluciones.

Longitud (m)	Cantidad de lámparas	Coste lámparas (€)	Coste energético (€)	Coste coraza (€)	Coste anual total (€)
9	199	281.585	237.705,5	36.225	555.515,5
12,5	121	272.250	200.763,2	41.400	514.413,2

En base a los datos expuestos en la *Tabla A.2.16*, se obtiene un coste similar en ambas posibilidades, siendo la segunda opción un 7,40% más barata. Puesto que en cuanto a optimización de proceso son igual de eficientes ya que se consigue la misma conversión, se prioriza el coste de operación que se basa, principalmente, en el precio total de las lámparas utilizadas y la energía que consumen. Se trata de un gasto prácticamente anual que supondrá una diferencia de costes considerable entre ambas opciones con el tiempo.

Por todo ello, entre las opciones disponibles se decide diseñar un reactor de 12,5 m de longitud y 1,78 m de radio.

2.8 ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA FINAL

Finalmente, tras la selección del modelo del reactor, se analizan los espacios de reacción con menor iluminación presentes entre la última capa de reactores individuales y la carcasa del reactor multitubular, para conocer el porcentaje de conversión que se alcanza.

Además, también se debe estudiar una fracción del espacio de reacción de los reactores individuales que no cumplen una geometría hexagonal compacta. Estos reactores tienen dos lámparas UV menos que el resto de reactores individuales.

De modo que, cuando se divide el reactor en triángulos equiláteros, que es la unidad básica empleada para analizar la distribución de la LVRPA, queda una zona libre, es decir, una zona en la que no se dispone de tres lámparas UV que determinen un triángulo (ver *Figura A.2.27*). Esta fracción de la sección es la que se debe analizar puesto que en el espacio de reacción solamente actúa el campo de radiación de dos fuentes, en vez de las tres lámparas ultravioletas que participan en el prisma triangular, que es el reactor elemental en esta configuración. En consecuencia, en esta zona se alcanza un porcentaje de conversión menor al resto del espacio de reacción del reactor.

En la *Figura A.2.27* se muestra el montaje del reactor multitubular resaltando el espacio de reacción con menor iluminación que se debe analizar. También se detalla el espacio de reacción que se estudia en los reactores que no cumplen una geometría hexagonal compacta.

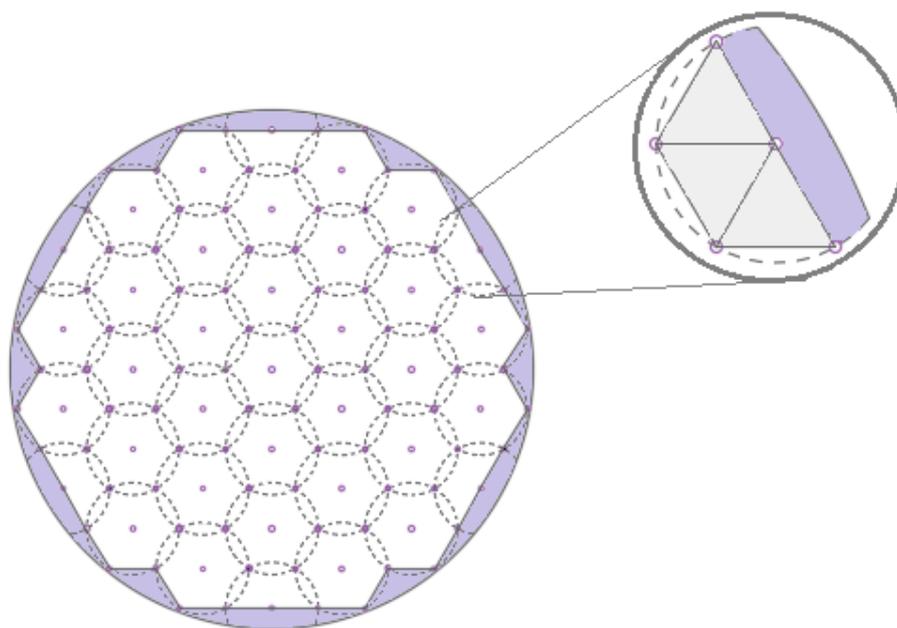


Figura A.2.27 Esquema del espacio de reacción con menor iluminación en el reactor multitubular.

Dada la simetría que posee el montaje del reactor multitubular únicamente es necesario analizar una zona de éste, puesto que los resultados que se obtienen pueden extrapolarse al resto de espacios de reacción del reactor.

El espacio de reacción se divide en distintas zonas formando supuestos prismas triangulares, ya que es el reactor elemental de esta configuración a la hora de realizar los cálculos. En la *Figura A.2.28* se detallan cada uno de los espacios de reacción con menor iluminación que se encuentran en el reactor multitubular.

Además, la *Figura A.2.28* presenta zonas con un mismo color; esto se debe a que ambas figuras geométricas son congruentes, es decir, tienen el mismo tamaño y la misma forma.

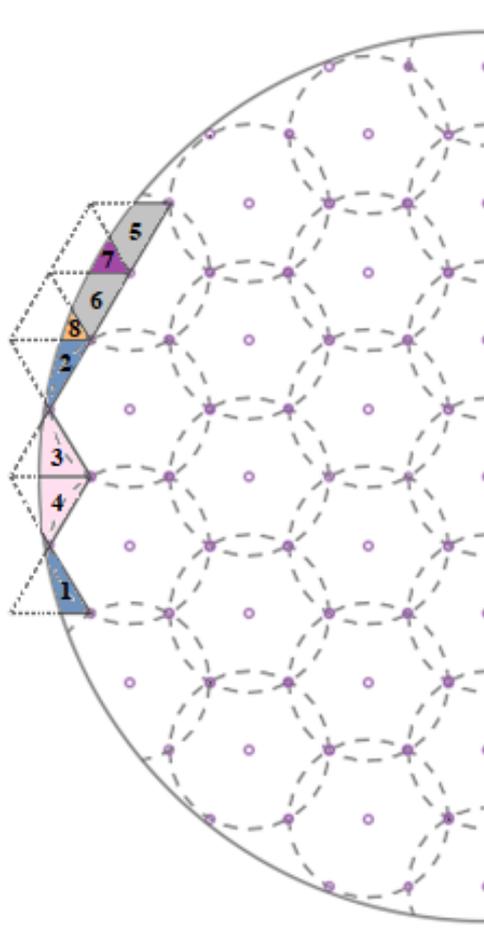


Figura A.2.28 Esquema de las zonas con menor iluminación en el reactor multitubular.

Los puntos que limitan el segmento del prisma triangular de cada zona, se evalúan considerando que están en una posición más lejana de las lámparas de lo que realmente se encuentran. De este modo se tiene un margen de seguridad en el análisis de las zonas por las imprecisiones del cálculo.

Una vez detallados los distintos prismas triangulares que constituyen el espacio de reacción, se procede a analizar la intensidad de la LVRPA en el triángulo equilátero comprendido en el plano central teórico horizontal que conforma cada prisma triangular. De la misma manera, se determina el porcentaje de conversión que se alcanza en los puntos evaluados.

Esta determinación se lleva a cabo en la propazina, ya que la degradación de este herbicida transcurre más lentamente y si éste se reduce hasta la cantidad deseada, los otros contaminantes seleccionados también lo harán y en una proporción mayor.

En primer lugar se ha analizado la intensidad de la LVRPA en varios puntos del segmento del triángulo equilátero comprendido en el plano central teórico horizontal que conforma el prisma triangular situado en la denominada zona 1 (véase *Figura A.2.29*). Es importante mencionar que aunque se estudie el espacio de reacción formando prismas triangulares, únicamente se evalúan los puntos comprendidos en el segmento que está dentro de la carcasa del reactor multitubular.

Los segmentos de la zona 1 y la zona 2 son congruentes, por lo que los resultados que se obtienen en el estudio de intensidades de la zona 1 pueden extrapolarse a la zona 2.

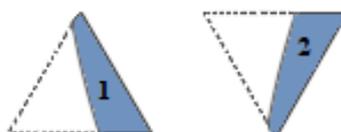


Figura A.2.29. Esquema de la zona 1 y 2.

En estas zonas interviene el campo de radiación de dos lámparas ultravioletas.

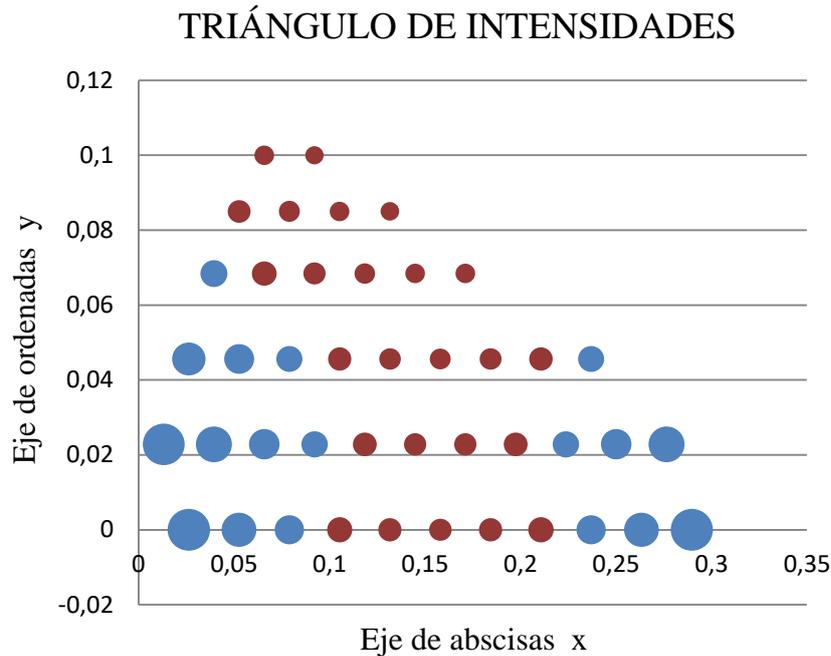


Figura A.2.30. Triángulo de intensidades en la zona 1.

En la *Figura A.2.30* puede apreciarse el grado de intensidad en la zona 1, y también se ha analizado en que puntos no se alcanza una conversión satisfactoria. Para ello, se han utilizado dos colores en función de la concentración de los contaminantes que se reduce; el azul cuando se alcanza una conversión mínima del 70%, y el color rojo cuando la degradación es menor a dicho porcentaje.

Este análisis se ha realizado con el caudal a tratar usado anteriormente en el prisma triangular, $81,6 \frac{\text{L}}{\text{min}}$. En el punto más desfavorable se alcanza una degradación del 64% en la propazina, y se logra reducir la concentración del herbicida al límite establecido con un caudal de $70 \frac{\text{L}}{\text{min}}$.

De modo que, tanto en la zona 1 como en la zona 2 se tendría que reducir el caudal a tratar un 14,21%.

En segundo lugar, se analiza la intensidad de la LVRPA en el segmento del triángulo equilátero comprendido en el plano central teórico horizontal que conforma el prisma triangular situado en la denominada zona 3 (ver *Figura A.2.31*).

Los segmentos de los prismas triangulares denominados 3 y 4 son congruentes, por lo que los resultados que se obtienen en el estudio de intensidades de la zona 3 pueden extrapolarse a la zona 4.



Figura A.2.31 Esquema de la zona 3 y 4.

En estas zonas interviene el campo de radiación de dos fuentes con luz ultravioleta.

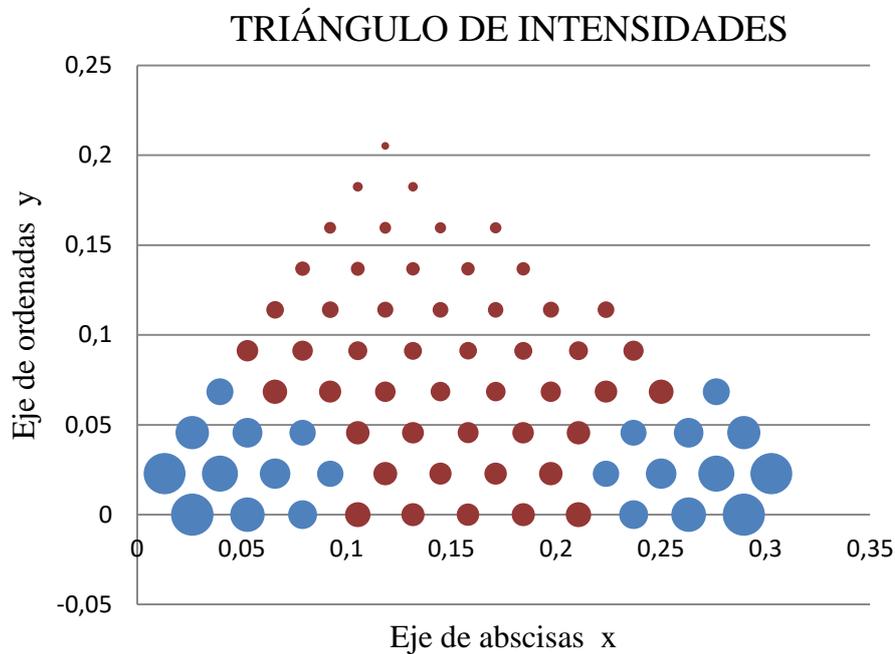


Figura A.2.32 Triángulo de intensidades en la zona 3.

En la *Figura A.2.32* se puede observar el grado de intensidad de la LVRPA en la zona 3 y también se detallan los puntos en los que no se alcanza un porcentaje de conversión del 70% utilizando un color rojo, mientras que en los que se consigue una mayor degradación aparecen en azul.

Este análisis se ha realizado con el caudal a tratar usado anteriormente, $81,6 \frac{L}{min}$. En el punto más desfavorable se alcanza una degradación aproximadamente del 49% en la propazina, y se logra reducir la concentración del herbicida al límite establecido con un caudal de $45,5 \frac{L}{min}$.

De modo que, tanto en la zona 3 como en la zona 4 se tendría que reducir el caudal a tratar un 44,24%.

En tercer lugar, se estudia la intensidad de la LVRPA en varios puntos del segmento del triángulo equilátero comprendido en el plano central teórico horizontal que conforma el prisma triangular en la denominada zona 5.

Los segmentos de los prismas triangulares denominados 5 y 6 son congruentes, por lo que los resultados que se obtienen en el estudio de intensidades de la zona 5 pueden extrapolarse a la zona 6 (ver *Figura A.2.33*).

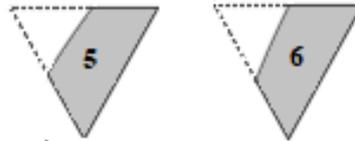


Figura A.2.33. Esquema de la zona 5 y 6.

En estas zonas interviene el campo de radiación de dos lámparas ultravioletas.

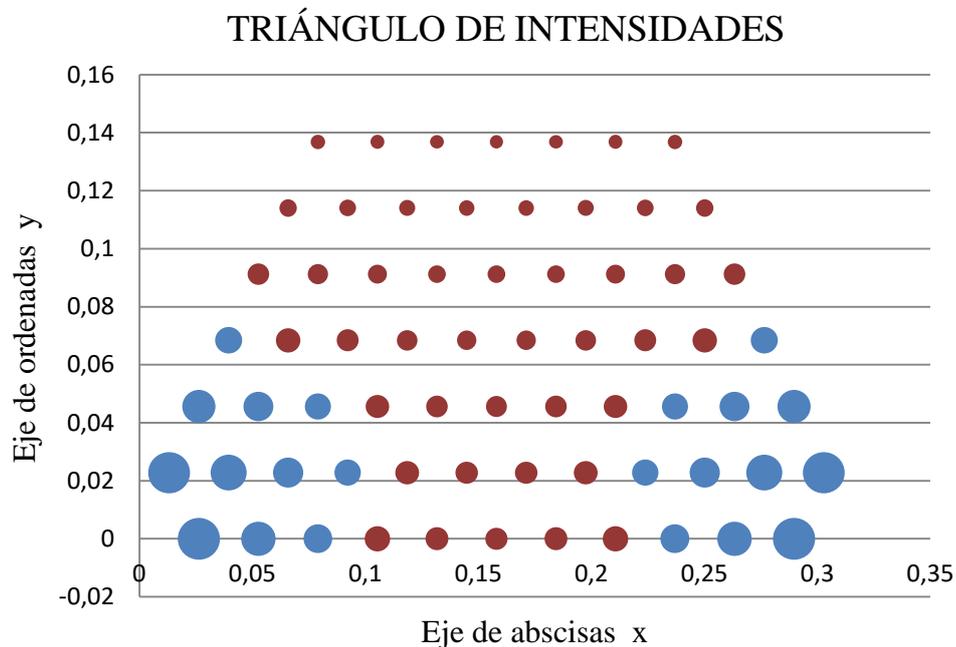


Figura A.2.34 Triángulo de intensidades en la zona 5.

La *Figura A.2.34* muestra el grado de intensidad en la zona 5 y en que posiciones se consigue reducir los contaminantes a la concentración deseada. Este análisis se realiza de la misma manera que en los casos anteriores, el azul para los puntos en los que se consigue una conversión mayor o igual del 70% y el color rojo cuando es menor a dicho porcentaje.

Este estudio se ha realizado con el caudal a tratar utilizado en los prismas triangulares que componen el reactor con geometría hexagonal compacta, $81,6 \frac{L}{\text{min}}$. En el punto más desfavorable se alcanza una degradación aproximadamente del 58% en la propazina, y se logra reducir la concentración del herbicida al límite establecido con un caudal de $59 \frac{L}{\text{min}}$.

De modo que, tanto en la zona 5 como en la zona 6 se tendría que reducir el caudal a tratar un 27,70%.

A continuación, se analiza la intensidad de la LVRPA en el segmento del triángulo equilátero comprendido en el plano central horizontal que conforma el prisma triangular situado en la denominada zona 7.

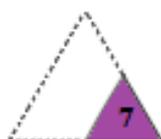


Figura A.2.35 Esquema de la zona 7.

En esta zona interviene el campo de radiación de una lámpara ultravioleta.

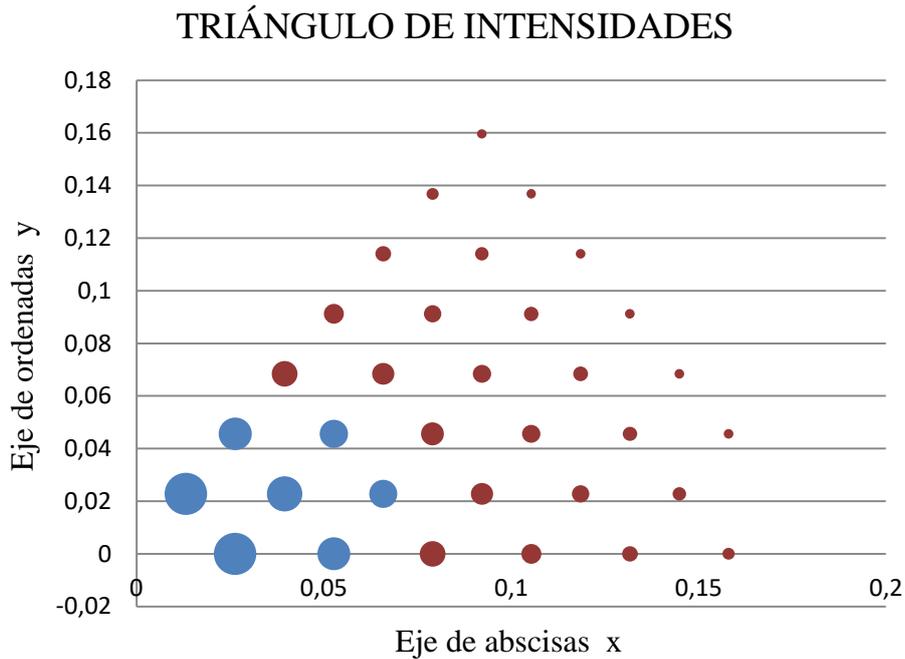


Figura A.2.36 Triángulo de intensidades en la zona 7.

En la *Figura A.2.36* se observa el grado de intensidad en la zona 7. También se detalla en que posiciones se alcanza el porcentaje de conversión deseado con un caudal a tratar de $81,6 \frac{\text{L}}{\text{min}}$, que es la cantidad máxima que se consigue reducir hasta el límite establecido en un prisma triangular.

En el punto más desfavorable se obtiene una degradación del 53%, y se logra un porcentaje de conversión del 70% reduciendo el caudal a tratar a $48 \frac{\text{L}}{\text{min}}$.

De modo que, en la zona 7 se tendría que reducir el caudal a tratar un 41,18%.

Finalmente, se analiza la intensidad de la LVRPA en varios puntos del segmento del triángulo equilátero comprendido en el plano central teórico horizontal que conforma el prisma triangular situado en la denominada zona 8 (véase *Figura A.2.37*).



Figura A.2.37 Esquema de la zona 8.

En esta zona interviene el campo de radiación de una lámpara ultravioleta.

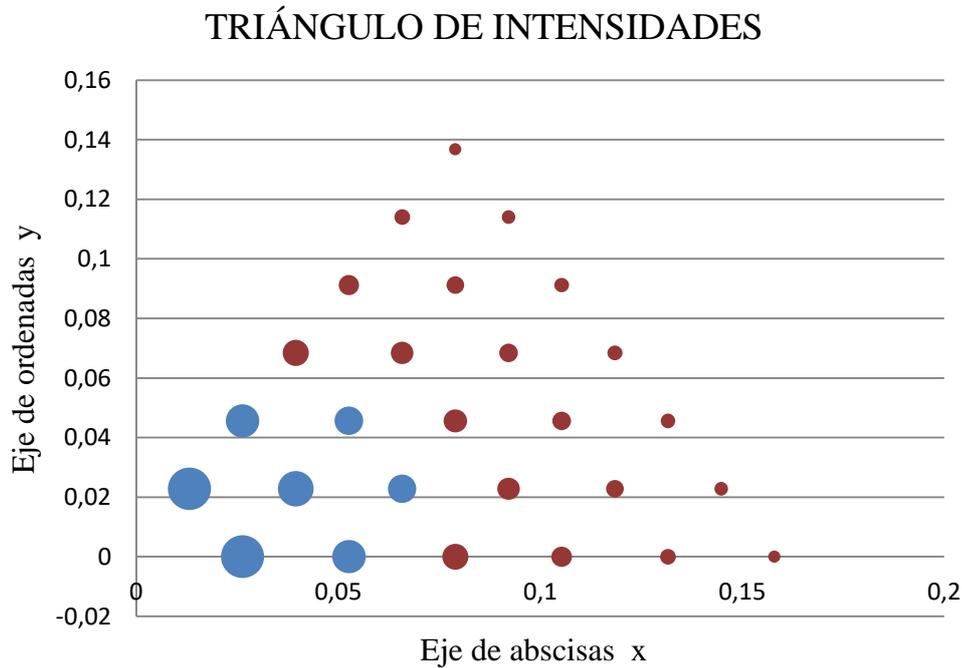


Figura A.2.38 Triángulo de intensidades en la zona 8.

En la *Figura A.2.38* puede apreciarse el grado de intensidad en la zona 8 y en que posiciones se alcanza una conversión igual o mayor del 70%. Este análisis se realiza de la misma manera que en los casos anteriores, el color azul para los puntos en los que se consigue reducir la concentración de los contaminantes al límite establecido y el color rojo cuando la concentración es mayor a la deseada.

Este estudio se ha realizado con el caudal a tratar usado anteriormente en el prisma triangular, $81,6 \frac{L}{min}$. En el punto más desfavorable se alcanza una degradación del 55% en la propazina, y se logra reducir la concentración del herbicida al límite establecido con un caudal de $54 \frac{L}{min}$.

De modo que, en la zona 8 se tendría que reducir el caudal a tratar un 33,82%.

2.9 ANÁLISIS DE SOLUCIONES

Inicialmente se realizó un análisis de la distribución de la LVRPA en uno de los triángulos equiláteros que componen la estructura hexagonal compacta de los reactores individuales que forman la configuración del reactor multitubular. Por lo tanto, se evaluó el efecto de la LVRPA dentro del prisma triangular cuando actúan los campos de radiación de las tres lámparas decisivas.

El efecto en el caudal supone un flujo óptimo que permita la exposición de todo el volumen de solución a la irradiación UV favoreciendo la fotoactivación del catalizador sobre el contaminante. Se logró la conversión deseada en el prisma triangular para un caudal de $81,6 \frac{\text{L}}{\text{min}}$; por lo que se precisan 201 prismas triangulares para tratar el caudal de entrada.

Una vez se conoce el número de prismas triangulares necesarios, se reagrupan de forma que constituyan reactores con una geometría hexagonal compacta. Para alcanzar la conversión deseada del caudal a tratar se necesitan 34 reactores; no obstante, se pone uno más para conseguir una figura geométrica regular.

Dicha configuración se encierra en una carcasa cilíndrica que comprende el reactor multitubular, pero entre la última capa de reactores y la carcasa del reactor hay zonas con unas condiciones de iluminación distintas a las que están presentes en el interior de cada prisma triangular.

Tras analizar todas las zonas con menor iluminación presentes en el reactor multitubular y conocer las disminuciones en la eficiencia, se muestra que en la sección más desfavorable se alcanza una degradación del 49%. Teniendo en cuenta que se han evaluado puntos que están fuera de las líneas límites del segmento del triángulo por las posibles imprecisiones en el cálculo, seguramente se consigue una conversión mayor a la que se ha expuesto.

También cabe destacar que para alcanzar la conversión deseada del caudal a tratar en el reactor multitubular se necesita que tenga una configuración de 34 reactores con geometría hexagonal compacta. Sin embargo, se tiene uno más para conseguir una figura geométrica regular y además, está también el espacio con menor iluminación. Esto hace que la sección

del reactor sea mayor que el teórico, por lo que como el caudal a tratar se mantiene, entonces la velocidad de circulación del fluido a través del banco de tubos será inferior, y por tanto, el tiempo de residencia superior al teórico.

Por ello, se puede suponer que debido al mayor tiempo de residencia del fluido, la conversión aumenta con respecto al cálculo teórico en las zonas que pertenecen al prisma triangular y a las zonas muertas. De modo que se alcanza un porcentaje de conversión en las zonas muertas más parecido al deseado.

Sin embargo, el volumen que ocupan las zonas con menor iluminación respecto al volumen total del reactor es aproximadamente un 10%, por lo que las consideraciones establecidas para desprestigiar estas zonas podrían suponer un problema y dar lugar a un cortocircuito en el rendimiento de depuración. Por lo tanto se decide rediseñar el reactor.

Se opta por aumentar la longitud del reactor multitubular de modo que permita una exposición mayor de la solución frente a la luz UV y se alcance un porcentaje de degradación satisfactorio. Por lo tanto, se evalúa la zona donde el campo de radiación de las lámparas UV prácticamente no varía para conocer con qué longitud se logra alcanzar una conversión del 70%.

Para reducir la concentración de los contaminantes al límite establecido en las zonas 3 y 4 que son las más desfavorables, manteniendo el mismo caudal a tratar que en un prisma triangular, se necesita aumentar la longitud del reactor a 17 m.

Suponiendo que el flujo se distribuye equitativamente entre todo el reactor multitubular, entonces en cada zona se trataría el mismo caudal, siendo éste de $81,6 \frac{L}{min}$. Por lo que en estas condiciones se podría tratar un caudal en el reactor de aproximadamente $21.053 \frac{L}{min}$, un 28,56% más del caudal de entrada. De manera que se tiene este margen de seguridad, ya que puede darse alguna anomalía que provoque un aumento del caudal y, además, también se debe tener en cuenta que el rendimiento de los equipos nunca es el máximo.

2.10 EFECTO DE LA POTENCIA DE LA LÁMPARA

La potencia de la lámpara está directamente relacionada con la cantidad de fotones que ésta emite. Para observar que efecto tiene la potencia se resolvieron simultáneamente el modelo de emisión, el modelo de Seis Flujos y el modelo cinético empleando diferentes valores de potencia de la lámpara y manteniendo constantes las dimensiones del reactor y de la lámpara.

Este tipo de análisis permite comprobar si la potencia empleada es necesaria o por el contrario, no implica un mejor rendimiento del reactor por lo que se puede utilizar una de menor potencia y así reducir costes.

En la *Figura A.2.39* se muestran los valores de conversión de la propazina en el punto más desfavorable en función de diferentes valores de potencia de la lámpara.

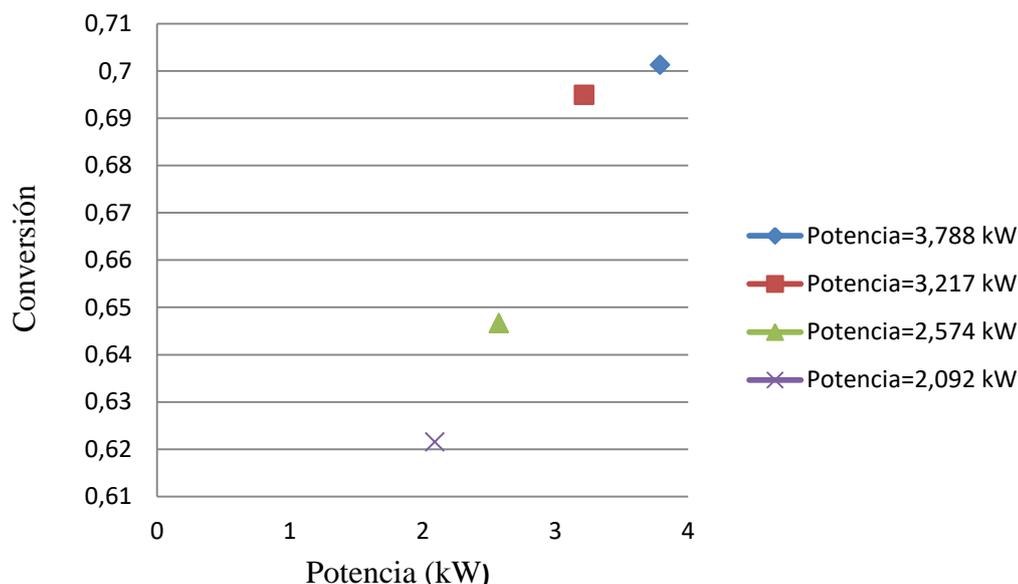


Figura A.2.39 Efecto de potencia de la lámpara.

En la gráfica se observa que la potencia de la lámpara mejora significativamente la conversión, por lo que no se puede disminuir la potencia empleada puesto que se cumple que a mayor potencia mejor rendimiento del reactor.

2.11 CALCULAR EL NÚMERO DE REYNOLDS

Otro aspecto importante a considerar en procesos fotocatalíticos heterogéneos en fase acuosa con el catalizador en suspensión, es que el número de Reynolds debe estar siempre por encima de 10.000 para garantizar un flujo turbulento. Así, se evita cualquier posible sedimentación del catalizador que suele ocurrir en determinadas circunstancias si se alcanza un flujo laminar.

El número de Reynolds, parámetro adimensional para definir el tipo de régimen fluidodinámico, se define, para canales cerrados, como:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_e}{\mu} \quad (\text{A.2.39})$$

Donde,

- ❖ v , Velocidad de circulación del agua por la coraza ($\frac{m}{s}$).
- ❖ ρ , Densidad del agua ($\frac{kg}{m^3}$).
- ❖ μ , Viscosidad del agua ($\frac{kg}{m \cdot s}$).
- ❖ D_e , Diámetro equivalente de la coraza (m).

Para conocer el diámetro equivalente de la coraza antes se tiene que determinar la distribución de las lámparas en el interior del reactor multitubular y la distancia entre el centro de dos fuentes consecutivas (pitch).

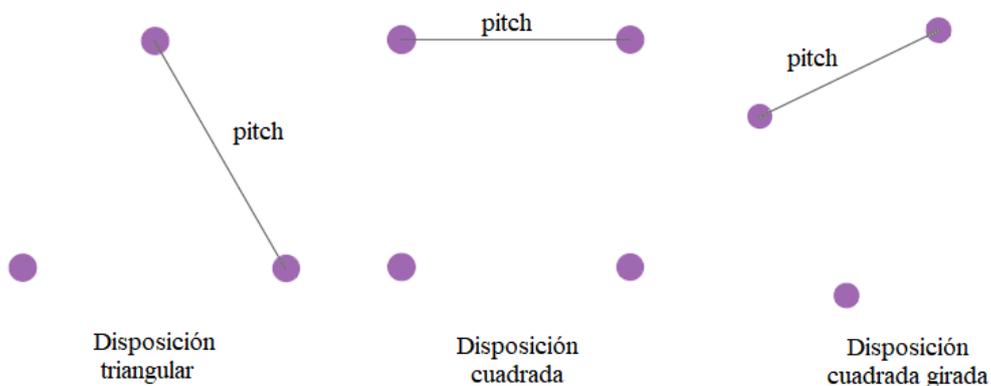


Figura A.2.40 Tipos de distribución de las lámparas UV.

En este caso, se ha seleccionado la disposición triangular puesto que es el patrón de las lámparas distribuidas en el espacio de reacción (véase *Figura A.2.41*), siguiendo el requisito establecido de un solapamiento total del campo de radiación de dos lámparas consecutivas a una distancia determinada.

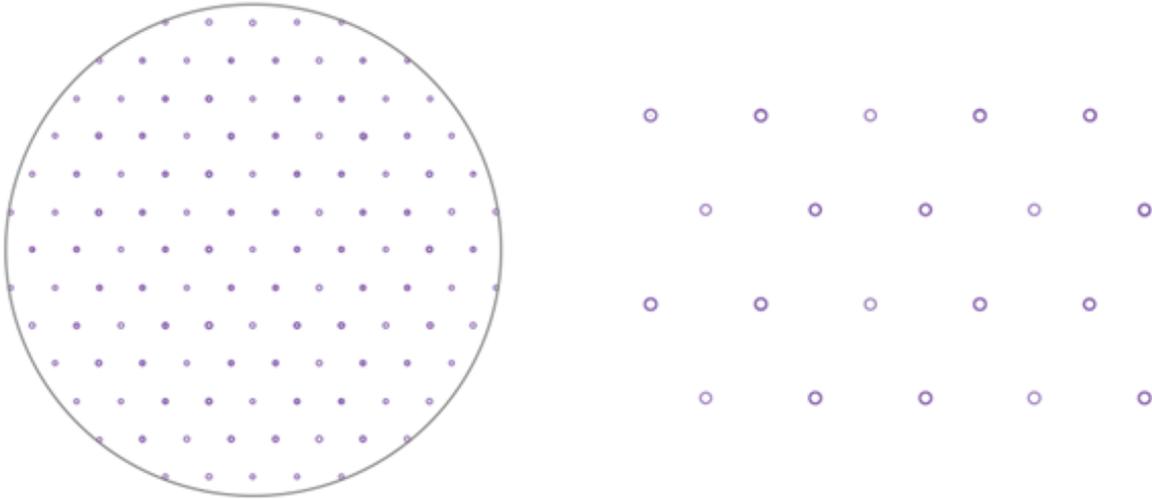


Figura A.2.41 Distribución de las lámparas en el reactor fotocatalítico.

De acuerdo con la disposición triangular de las lámparas seleccionada, se puede calcular el diámetro equivalente de la coraza con la siguiente ecuación:

$$D_e = 4 \cdot \frac{\text{Sección}}{\text{Perímetro mojado}} = \frac{1,103}{d} \cdot (p^2 - 0,907 \cdot d^2) \quad (\text{A.2.40})$$

Donde,

- ❖ p , Distancia entre los centros de lámparas adyacentes (m).
- ❖ d , Diámetro externo de una lámpara (m).

Reemplazando los parámetros conocidos se obtiene el valor del diámetro equivalente.

$$D_e = \frac{1,103}{0,032} \cdot (0,316^2 - 0,907 \cdot 0,032^2) = 3,4099 \text{ m}$$

Se tiene entonces que la velocidad para el flujo que circula a través de la sección del reactor multitubular viene dada por la siguiente expresión:

$$v = \frac{Q}{S_c} \quad (\text{A.2.41})$$

Donde Q es el flujo volumétrico (m^3/min) y S_c es el área de la sección transversal del reactor (m^2).

El área transversal del reactor se calcula con la ecuación:

$$S_c = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 - \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot N \quad (\text{A.2.42})$$

Donde,

- ❖ N , Número de lámparas ultravioletas.
- ❖ D , Diámetro de la coraza (m).
- ❖ d , Diámetro de una lámpara ultravioleta (m).

Por lo tanto, sustituyendo el valor del diámetro equivalente se obtiene:

$$S_c = \frac{\pi}{4} \cdot 3,56^2 - \frac{\pi}{4} \cdot 0,032^2 \cdot 121 = 9,856 \text{ m}^2$$

A partir de aquí, ya se puede calcular la velocidad para el flujo que circula a través de la carcasa:

$$v = \frac{16,376}{9,856} = 1,662 \frac{m}{min} \equiv 0,0277 \frac{m}{s}$$

Por otro lado, el valor de la viscosidad dinámica del agua a 20°C es $\mu = 0,001 \left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)$ y la densidad del agua a la misma temperatura es $\rho = 998,29 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$.

Finalmente, con todos los valores especificados, el valor de Reynolds resulta:

$$Re = \frac{998,29 \cdot 0,0277 \cdot 3,4099}{0,001} = 94.292,71$$

Bajo estas condiciones, se considera que el régimen del flujo es turbulento, ya que $Re > 10.000$.

2.12 PÉRDIDA DE CARGA

La caída de presión a través de un banco de tubos según el método de Zukauskas, se determina mediante la siguiente ecuación:²⁸

$$\Delta P = N_{ft} \cdot \chi \cdot \left(\frac{\rho \cdot v_{max}^2}{2} \right) \cdot f \quad (\text{A.2.43})$$

Donde,

- ❖ N_{ft} , Número de filas de tubos en el espacio de reacción.
- ❖ χ , Factor de corrección.
- ❖ f , Factor de fricción.
- ❖ ρ , Densidad del agua $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.
- ❖ v_{max} , Velocidad de circulación máxima del agua por el banco de tubos $\left(\frac{m}{s}\right)$.

Para conocer algunos de los parámetros anteriores es necesario determinar previamente la distancia adimensional entre los centros de las lámparas en la dirección y del plano normal al flujo (P_L) y la distancia adimensional entre los centros de las lámparas en la dirección z del plano normal al flujo (P_T). Estos factores se definen como:

$$P_L = \frac{p_L}{d} \quad (\text{A.2.44})$$

$$P_T = \frac{p_T}{d} \quad (\text{A.2.45})$$

Donde,

²⁸ Kim, J. et al. (2015). "Acoustic resonance and pressure drop through a staggered tube bundle in a compact heat exchanger" en Elsevier Butterworth Heinemann, vol.91, p.63-67.

- ❖ d , Diámetro externo de una lámpara (m).
- ❖ p_L , Distancia entre los centros de las lámparas en la dirección y del plano normal al flujo (m).
- ❖ p_T , Distancia entre los centros de las lámparas en la dirección z del plano normal al flujo (m).

En la *Figura A.2.42* se muestra la disposición triangular con los parámetros geométricos definidos.

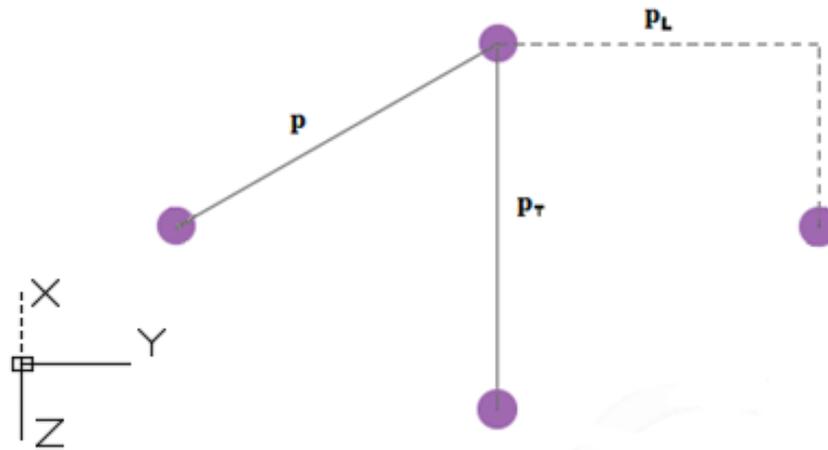


Figura A.2.42 Disposición triangular.

Teniendo en cuenta que el flujo es paralelo al eje de las lámparas.

Sustituyendo los valores conocidos en la *ecuación A.2.44* y la *ecuación A.2.45* se tiene que:

$$P_L = \frac{0,2734}{0,032} = 8,544$$

$$P_T = \frac{0,316}{0,032} = 9,875$$

Una vez se conocen estos factores se procede a calcular la velocidad de circulación máxima del agua por el banco de tubos. Para ello, primeramente, se precisa de la *ecuación A.2.46*, puesto que en función de ella y de la distancia entre los centros de las lámparas en

la dirección diagonal al flujo (pitch), se requieren diferentes expresiones para determinar la velocidad máxima.

$$\frac{p_T + d}{2} = \frac{0,316 + 0,032}{2} = 0,174 \quad (\text{A.2.46})$$

El pitch se emplea como criterio para seleccionar la expresión adecuada para determinar la velocidad máxima.

Cuando,

- ❖ $p \geq 0,174$, se determina la velocidad máxima mediante la siguiente ecuación:

$$v_{max} = \frac{p_T}{p_T - d} \cdot v \quad (\text{A.2.47})$$

- ❖ $p < 0,174$, se determina la velocidad máxima mediante la siguiente ecuación:

$$v_{max} = \frac{p_T}{2 \cdot (p_T - d)} \cdot v \quad (\text{A.2.48})$$

Conociendo que el valor del pitch, p , es de 0,316 m; se debe usar la *ecuación A.2.47*. De modo que reemplazando los parámetros conocidos en la expresión se tiene la velocidad de circulación máxima del agua por el banco de tubos.

$$v_{max} = \frac{0,316}{0,316 - 0,032} \cdot 0,0277 = 0,0308 \frac{m}{s}$$

Por otro lado, se determina el factor de fricción f mediante la *Figura A.2.43* y variará en función del número de Reynolds.

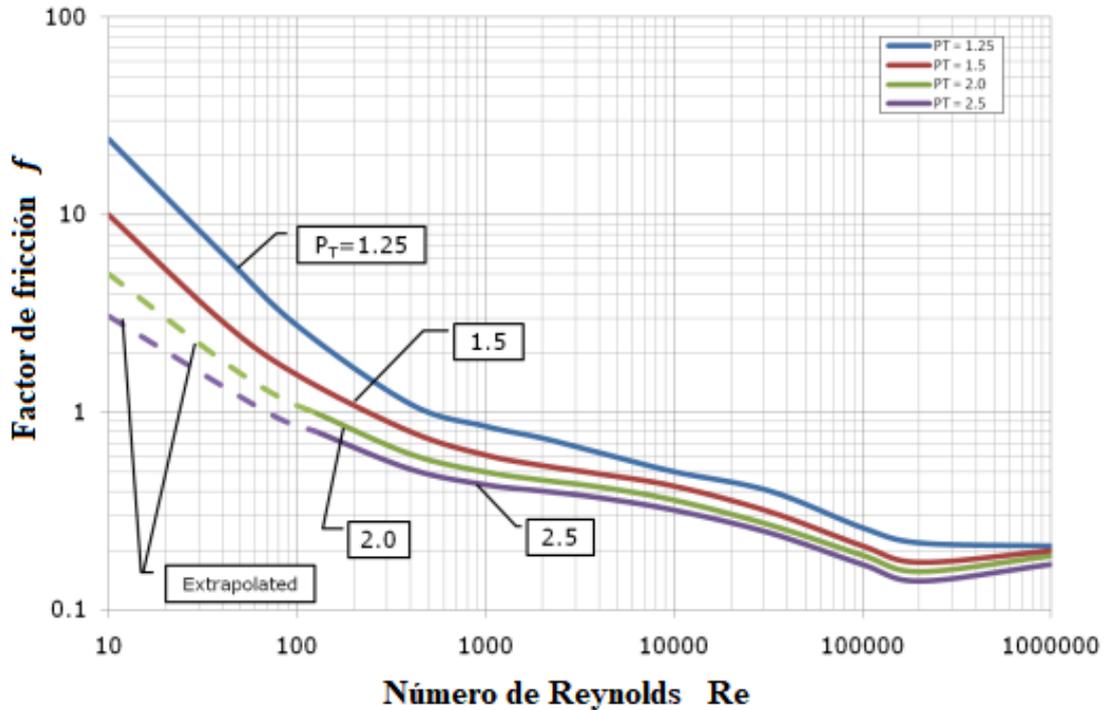


Figura A.2.43 Variación del factor de fricción con el número de Reynolds para el modelo de Zukauskas de caída de presión a través de un banco de tubos escalonados.²⁷

Conociendo que el valor del número de Reynolds es 94.292,71 y la distancia adimensional entre los centros de las lámparas en la dirección z del plano normal al flujo (P_T) es 9,875, se puede admitir que el factor de fricción es próximo a 0,1.

Para el cálculo del factor de corrección, χ , se precisa de la *Figura A.2.44* y variará en función de la relación entre la distancia adimensional entre los centros de las lámparas en la dirección y del plano normal al flujo (P_L) y la distancia adimensional entre los centros de las lámparas en la dirección z del plano normal al flujo (P_T).

Pero para determinar el factor de corrección es necesario calcular el número de Reynolds máximo. El número de Reynolds máximos se obtiene mediante la ecuación que se muestra a continuación.

$$Re = \frac{\rho \cdot v_{max} \cdot D_e}{\mu} \quad (A.2.49)$$

²⁷ Hammock Gary, L. (2011). *Cross-Flow, Staggered-Tube Heat Exchanger Analysis for High Enthalpy Flows*. Tesis Doctoral. Knoxville: Universidad de Tennessee.

Sustituyendo los valores conocidos, se tiene que:

$$Re = \frac{998,29 \cdot 0,0308 \cdot 3,4099}{0,001} = 104.845,33$$

A partir de aquí, ya se puede obtener el factor de corrección mediante la siguiente figura.

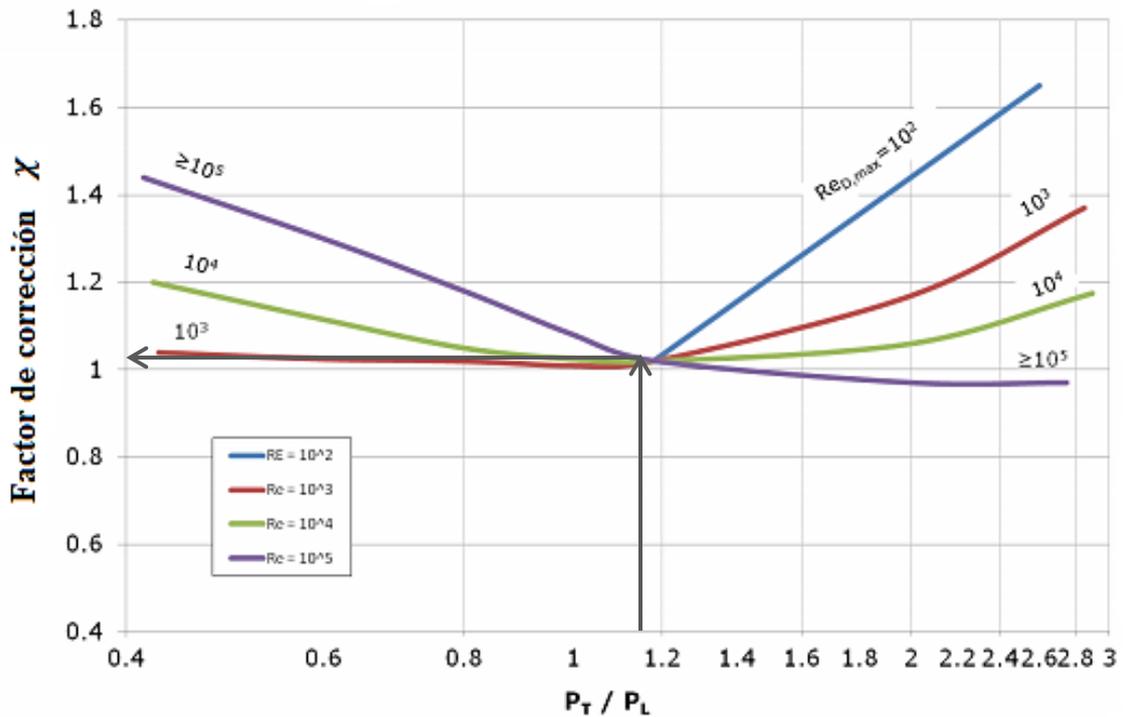


Figura A.2.44 Factor de corrección para el modelo de Zukauskas de caída de presión a través de un banco de tubos escalonados.²⁷

Por tanto, se obtiene que el coeficiente de corrección tiene un valor de 1,04.

Finalmente conociendo que el valor de la densidad del agua a 20°C es $\rho = 998,29 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$ y el número de filas de tubos en el espacio de reacción es 14, ya se tienen todos los valores especificados.

Sustituyendo los valores conocidos en la ecuación A.2.43 el valor de la caída de presión resulta:

²⁷ Hammock Gary, L. (2011). *Cross-Flow, Staggered-Tube Heat Exchanger Analysis for High Enthalpy Flows*. Tesis Doctoral. Knoxville: Universidad de Tennessee.

$$\Delta P = 14 \cdot 1,04 \cdot \left(\frac{998,29 \cdot 0,0308^2}{2} \right) \cdot 0,1 = 0,689 \frac{N}{m^2}$$

$$\Delta P = 0,689 \cdot \frac{1 \text{ atm}}{101.325 \frac{N}{m^2}} = 6,800 \cdot 10^{-6} \text{ atm}$$

Como la velocidad del fluido en la coraza es baja, entonces esto implica una menor pérdida de presión.

Es importante resaltar que como se está trabajando con una reacción catalizada se debería también tener en cuenta la pérdida de presión debida al paso del fluido a través de los huecos que dejan las partículas sólidas de catalizador. Sin embargo, como la carga de catalizador es de $0,01 \frac{kg}{m^3}$, en primera aproximación, las propiedades de la suspensión son muy parecidas a las del agua pura.

2.13 TIEMPO DE RESIDENCIA

Un parámetro relevante a conocer es el tiempo de residencia teórico, el cual indica el tiempo que permanece en el reactor el agua a tratar mediante TiO_2/UV . Por definición, se asume que el tiempo de residencia teórico viene dado por:

$$\tau = \frac{V}{Q} \tag{A.2.50}$$

Donde,

- ❖ V , Volumen del reactor necesario (m^3).
- ❖ Q , Caudal a tratar ($\frac{m^3}{min}$).

Para el cálculo del volumen del reactor necesario se utiliza la siguiente expresión.

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot l - \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot N \cdot l \tag{A.2.51}$$

Donde,

- ❖ D , Diámetro de la coraza (m).
- ❖ l , Longitud del reactor (m).
- ❖ d , Diámetro de una lámpara ultravioleta (m).
- ❖ N , Número de lámparas ultravioletas.

Por tanto, sustituyendo los valores conocidos se obtiene:

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot 3,56^2 \cdot 17 - \frac{\pi}{4} \cdot 0,032^2 \cdot 121 \cdot 17 = 167,561 \text{ m}^3$$

Conociendo que el caudal volumétrico a tratar en el reactor es de $16,376 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$, se tiene que el tiempo de residencia es:

$$\tau = \frac{167,561}{16,376} = 10,23 \text{ min} \equiv 10 \text{ min } 14 \text{ s}$$

El tiempo necesario para conseguir la degradación de los contaminantes emergentes seleccionados es aproximadamente 10 minutos.

2.14 BALANCE DE ENERGIA

El balance de energía no es necesario plantearlo debido a que se trata de un proceso isoterma. Además, la variación de la velocidad de una reacción fotoquímica con la temperatura es un factor de escasa importancia.

Por otro lado, las concentraciones con las que se trabaja son muy bajas por lo que la entalpia que se libera en la reacción será prácticamente nula, pudiéndose despreciar frente a la cantidad de energía que generan las lámparas.

La energía eléctrica consumida por la lámpara no toda se transforma en radiación UV-C, perdiéndose un porcentaje en forma de calor, radiación no visible y luz visible. Por lo que, conociendo que los fotorreactores presentan dificultad a la hora de eliminar el calor generado por las lámparas impidiendo un buen control de la temperatura de la zona de

reacción, se va a estimar la cantidad de calor a eliminar del sistema mediante una camisa externa por la que circule un fluido refrigerante. La estimación se puede realizar a partir de la potencia nominal de la lámpara y del tipo de lámpara empleada.

La iluminación es una fuente de calor sensible y se transmite por convección y radiación. En la *Tabla A.2.17* se muestran ejemplos de luminarias con la expresión a utilizar para determinar la carga térmica por iluminación de una lámpara.

La carga térmica se define como la cantidad de calor que debe ser retirada del sitio por refrigerar para reducir o mantener la temperatura deseada.

Tabla A.2.17 Ejemplos de luminarias.²⁹

Tipos	Radiación (%)	Convección (%)	Expresión (W)
Incandescentes	80	20	$q_{\text{carga, sensible, iluminación}} = P_{\text{iluminación}}$
Fluorescentes	50	50	$q_{\text{carga, sensible, iluminación}} = 1,25 \cdot P_{\text{iluminación}}$
Halógenas	50	50	$q_{\text{carga, sensible, iluminación}} = P_{\text{iluminación}}$

* $q_{\text{carga, sensible, iluminación}}$, Carga térmica por iluminación (W).

* $P_{\text{iluminación}}$, Potencia de las lámparas (W).

Se considera que la potencia de la lámpara se transforma en calor sensible; en el caso de las lámparas fluorescentes se incrementa el valor obtenido en un 25% para tener en cuenta el cebador y el balasto.

Las lámparas utilizadas son fluorescentes, por lo que la carga térmica por iluminación sería:

$$q_{\text{carga, sensible, iluminación}} = P_{\text{fluorescente}} \cdot N_{\text{fluorescentes}} \cdot 1,25 \quad (\text{A.2.52})$$

Donde,

- ❖ $q_{\text{carga, sensible, iluminación}}$, Carga térmica por iluminación (W).
- ❖ $P_{\text{fluorescente}}$, Potencia de las lámparas fluorescentes (W).

²⁹ González Maciá, J.M. (2019). *Frío y climatización*. Universitat Politècnica de Valencia.

❖ $N_{fluorescente}$, Número de lámparas fluorescentes.

Sustituyendo los valores conocidos en la ecuación A.2.52.

$$q_{carga,sensible,iluminación} = 5.583 \cdot 121 \cdot 1,25 = 844.428 \text{ W}$$

Una vez conocido el flujo de calor que generan las lámparas, se procede a determinar la temperatura de salida del agua si entra a una temperatura ambiente de 20°C en un fotorreactor multitubular, donde la temperatura en la superficie de las lámparas es de 105°C.

La temperatura en el reactor corresponde a la temperatura de la superficie de las lámparas, la cual oscila entre los 90-120°C; por lo que se ha decidido utilizar un valor medio de 105°C.

El fluido frío, el agua, se representa con el superíndice a, mientras que las lámparas ultravioletas con el superíndice b.

Para calcular la temperatura del agua a la salida, se utiliza el balance de energía que se rige por la siguiente ecuación:

$$q = m^a \cdot C_p^a \cdot (T_{salida}^a - T_{entrada}^a) \quad (\text{A.2.53})$$

Donde,

- ❖ m^a , Caudal másico de agua $\left(\frac{kg}{s}\right)$.
- ❖ C_p^a , Calor específico del agua $\left(\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}\right)$.
- ❖ T_{salida}^a , Temperatura de salida del agua ($^\circ C$).
- ❖ $T_{entrada}^a$, Temperatura de entrada del agua ($^\circ C$).

En la literatura se ha determinado el calor específico del agua a 20°C, fijando su valor en los $4.186 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$.

Para el cálculo del caudal másico se utiliza la expresión que se muestra a continuación:

$$m^a = \rho^a \cdot Q \quad (\text{A.2.54})$$

Donde,

- ❖ ρ^a , Densidad del agua $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.
- ❖ Q , Caudal de agua residual $\left(\frac{m^3}{s}\right)$.

Sustituyendo los valores de la densidad del agua a 20°C, el volumen del reactor necesario y la velocidad de circulación del fluido por la coraza, se tiene que:

$$m^a = 998,29 \cdot 0,27293 = 272,47 \frac{kg}{s}$$

Por tanto, se reorganizan los términos de la *ecuación* A.2.53 para el cálculo de la temperatura del agua a la salida.

$$T_{salida}^a = \frac{q}{m^a \cdot C_p^a} + T_{entrada}^a \quad (\text{A.2.55})$$

Sustituyendo los parámetros conocidos se obtiene:

$$T_{salida}^a = \frac{844.428}{272,47 \cdot 4.186} + 20 = 20,74^\circ C$$

La *Figura* A.2.45 representa el perfil de temperaturas en el reactor multitubular.

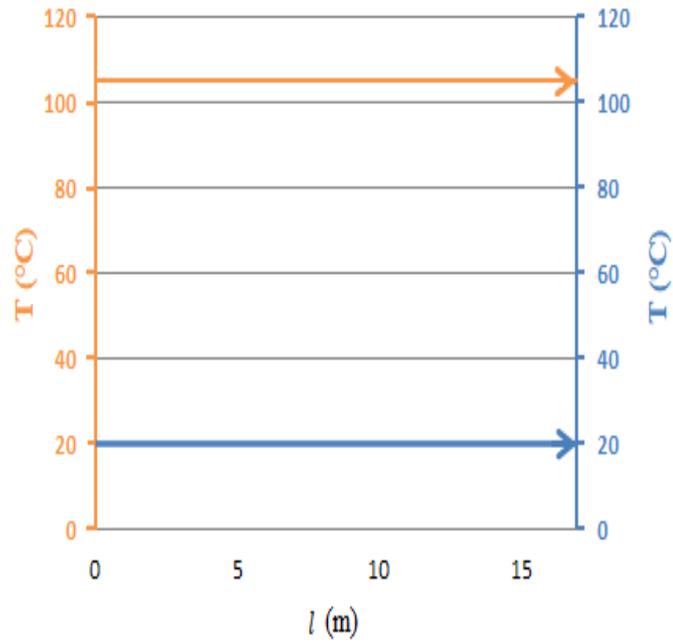


Figura A.2.45 Rango de temperaturas en el reactor.

El calor generado por las lámparas no supone un aumento considerable de la temperatura del agua, por lo que no será necesario determinar el caudal de un fluido refrigerante para mantener toda la zona de reacción isoterma.

3 ANEXO 3. ESTUDIO DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA

En este apartado se muestran los elementos que componen el reactor fotocatalítico junto con los catálogos correspondientes.

3.1. LÁMPARAS ULTRAVIOLETAS

Las lámparas ultravioletas empleadas en el presente proyecto son de amalgama de baja presión. Se ha elegido el modelo HAL 1554T10L pero las dimensiones necesarias son mayores que las que suministran las distintas empresas, por lo que para conocer las magnitudes de las fuentes utilizadas se ha considerado que la configuración de una lámpara de 17 m se asemeja a un apilamiento de lámparas del modelo HAL 1554T10L. De manera que permita conocer las características de las lámparas requeridas para estas condiciones de operación.

A continuación, se detalla la ficha técnica que ha servido de referencia.



CRN TECNOPART, S.A.

Sant Roc 30
08340 VILASSAR DE MAR (Barcelona)
Tel: 937 591 484 Fax: 937 591 547
e-mail: crn@crntp.com - www.crntecnopart.com

UV-160.13

LAMPARAS UV DE MERCURIO DE AMALGAMA DE BAJA PRESIÓN MODELO HAL

Las lámparas UV a baja presión de amalgama no contiene exclusivamente mercurio sino que su interior se coloca una amalgama sólida o una aleación de mercurio con otros metales. Las lámparas a baja presión de amalgama producidas por Helios representan la solución óptima para la desinfección y oxidación ultravioleta de agua, aire y superficies puesto que asocian duración de vida muy larga (hasta 20000 horas) y óptima eficiencia UVC a 254 nm (hasta el 45%) a una densidad de potencia mucho mayor respecto a las lámparas tradicionales a baja presión y a las lámparas a media presión de mercurio como se evidencia en la tabla.



Los datos de la tabla son para ser considerados como indicativos

Tipo de lámpara	Cuarzo baja presión (Higt Output)		Amalgama baja presión		Media presión
	Modelo	Potencia	Modelo	Potencia	Modelo
Modelo	HOGL		HAL		HMPL
Potencia	10 - 160 W		50 - 1500 W		1 - 30 kW
Densidad de potencia	0,7 - 1 W/cm		1 - 6 W/cm		80 - 300 W/cm
Radiación UVC	< 350 µW/cm		< 1000 µW/cm		< 35000 µW/cm
Longitud de onda/Eficacia	185 nm	254 nm	185 nm	254 nm	Banda ancha policromática
	2%	25% - 35%	2%	< 45%	5 a 15%
Temperatura superficial	> 50 °C		90 - 120 °C		500 a 950 °C
Intensidad de corriente	0,8 - 1,3 A		1,2 - 5 A		0,3 - 0,4 A
Vida útil	> 12000 h		> 12000 h		9000 h
Influencia temperatura ambiente	Alta		Alta		Baja

Los modelos "High Output" UVC tienen un rendimiento de hasta un 60% mayor en comparación con los modelos de base con la misma longitud

Características principales de las lámparas UV de amalgama de baja presión	
Tubo de cuarzo:	- Cuarzo Natural (OF) - Cuarzo Natural dopado (OG) - Cuarzo sintético (OG) -
Diámetro exterior:	Entre 10 mm y 38 mm
Longitud de arco:	desde 100mm hasta 2600mm
Rango de potencia:	Desde 50W hasta 1500W
Forma del cuerpo de la lámpara	Lineal - En forma de U - Espiral - Otras bajo pedido
Densidad máxima de potencia nominal (por unidad de longitud)	6 W/cm
Intensidad máxima de potencia de emisión UVC (por unidad de longitud)	4 W/cm
Coefficiente de transformación de potencia eléctrica en radiación UVC a 254 nm	hasta el 45%
Vida útil (Medida en laboratorio, y en función de la potencia de la lámpara)	hasta 20000 horas
Temperatura de trabajo	de 1 °C a 60 °C con emisión UVC estable
Perdida de eficiencia al fin de la vida útil	del 5 a 20%

(OF) Libre de Ozono (OG) Generadora de Ozono



Las lámparas UV de amalgama de Helios, gracias a la alta potencia y a la larga duración, constituyen una solución económicamente ventajosa para los sistemas de desinfección ultravioleta puesto que contienen notablemente los costos operativos derivados de la disminución del número de lámparas instaladas, de los componentes electrónicos y de los costos de mantenimiento.

Un proceso de recubrimiento especial del cuarzo permite que las lámparas UV a baja presión de amalgama mantengan virtualmente constante la acción germicida durante todo el ciclo de vida de la lámpara

Figura A.3.1 Ficha técnica lámparas ultravioletas.

Diseño de un reactor fotocatalítico para la degradación de contaminantes emergentes presentes en el efluente de una Estación Depuradora de Aguas Residuales

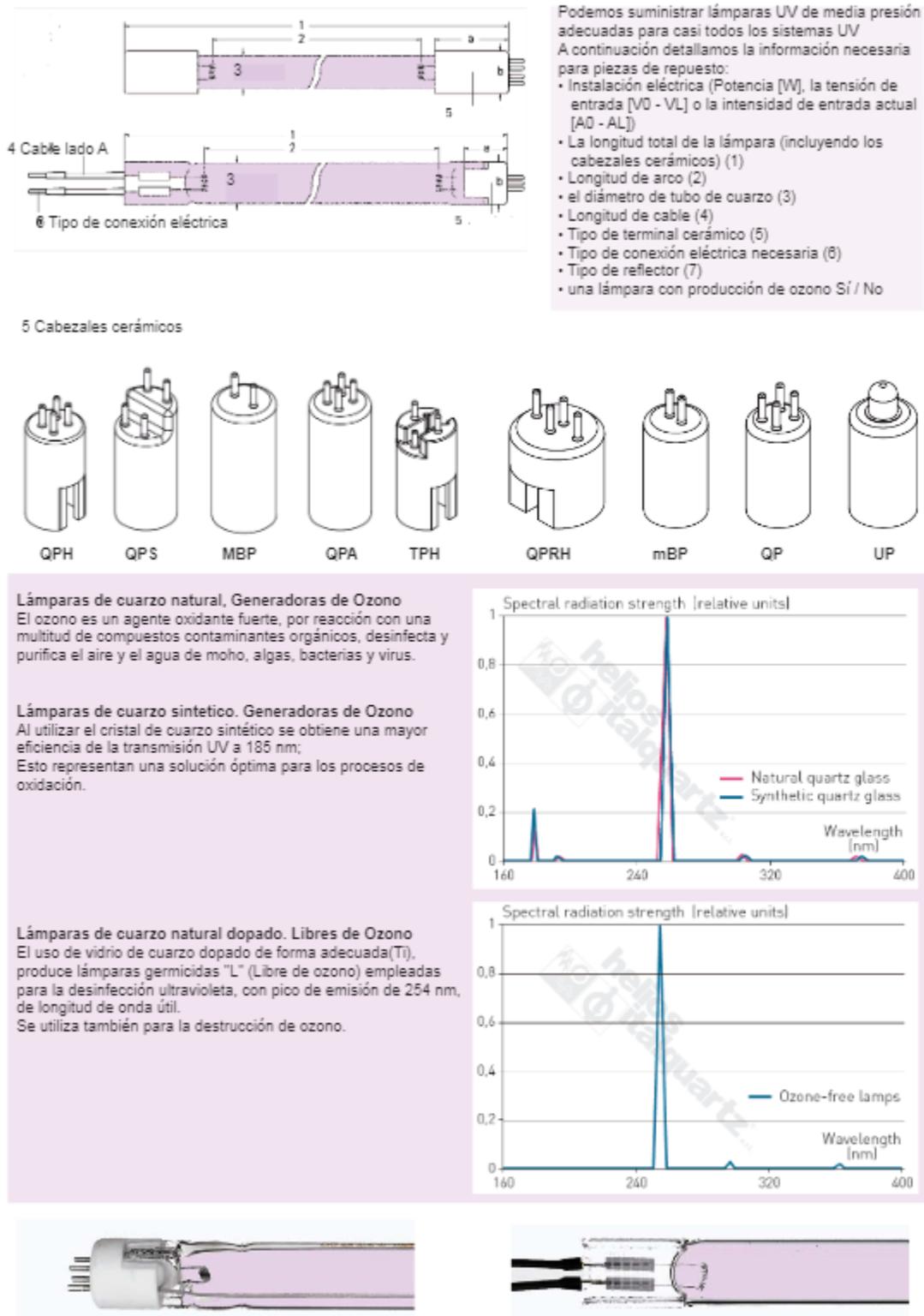


Figura A.3.2 Ficha técnica lámparas ultravioletas.

LÁMPARAS GERMICIDAS MODELO HUGL

Modelo	Ø Tubo	Logitud Total	Longitud de Arco	Potencia	Corriente	Tensión	Emisión UV a 254 nm	
HUGL436T5L	15 mm	436 mm	380 mm	48 W	800 mA	80 V	120 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	13 W
HUGL36T5L	15 mm	842 mm	755 mm	87 W	800 mA	110 V	260 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	28 W
HUGL846T5L	15 mm	846 mm	787 mm	90 W	800 mA	113 V	265 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	29 W
HUGL893T5L	15 mm	893 mm	815 mm	95 W	800 mA	120 V	270 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	30 W
HUGL64T5L	15 mm	1554 mm	1421 mm	155 W	800 mA	195 V	395 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	54 W

LÁMPARAS GERMICIDAS MODELO HAL

Modelo	Ø Tubo	Logitud Total	Longitud de Arco	Potencia	Corriente	Tensión	Emisión UV a 254 nm	
HAL357T5L	15 mm	357 mm	278 mm	42 W	1,2 A	38 V	110 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	11 W
HAL843T5L	15 mm	843 mm	764 mm	110 W	1,2 A	88 V	320 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	35 W
HAL1000T5L	15 mm	1000 mm	921 mm	127 W	1,2 A	107 V	370 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	42 W
HAL1554T5L	15 mm	1554 mm	1475 mm	190 W	1,2 A	184 V	500 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	68 W
HAL357T6L	19 mm	357 mm	278 mm	57 W	1,8 A	32 V	130 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	13 W
HAL843T6L	19 mm	843 mm	764 mm	127 W	1,8 A	71 V	400 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	43 W
HAL1000T6L	19 mm	1000 mm	921 mm	150 W	1,8 A	84 V	480 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	52 W
HAL1554T6L	19 mm	1554 mm	1475 mm	240 W	1,8 A	134 V	630 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	87 W
HAL357T6L-H	19 mm	357 mm	278 mm	85 W	2,1 A	31 V	140 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	14 W
HAL843T6L-H	19 mm	843 mm	764 mm	172 W	2,1 A	82 V	490 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	54 W
HAL1000T6L-H	19 mm	1000 mm	921 mm	207 W	2,1 A	99 V	570 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	65 W
HAL1554T6L-H	19 mm	1554 mm	1475 mm	320 W	2,1 A	154 V	750 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	105 W
HAL1554T10L	32 mm	1554 mm	1434 mm	471 W	5 A	95 V	1180 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	157 W

Helios puede suministrar los modelos anteriores en todas las posibles configuraciones de funcionamiento, incluso para montaje vertical.

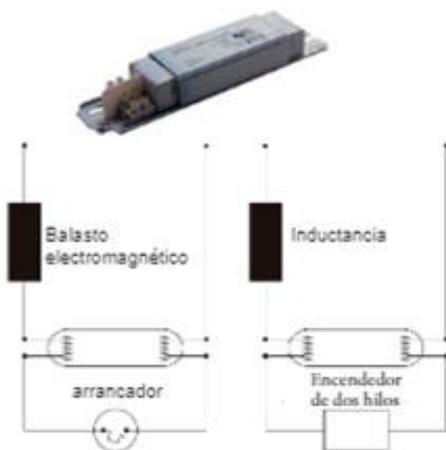
Los datos se basan en mediciones en condiciones de laboratorio a temperatura ambiente.

Las mediciones se realizaron en los balastos electrónicos de alta frecuencia

Las lámparas HAL están diseñados para funcionar sólo con balasto electrónico .

Balasto electromagnético con arrancador

Es el método más utilizado para el correcto funcionamiento, y alimentación eléctrica de las lámparas UV de mercurio de baja presión



Balasto electrónico

Utilizados comúnmente para la alimentación de lámparas UV de amalgama de baja presión



Figura A.3.3 Ficha técnica lámparas ultravioletas.

En la *Tabla A.3.1* se muestran las características principales del modelo de fuentes ultravioletas seleccionado.

Tabla A.3.1 Características de las lámparas ultravioletas.

LÁMPARA ULTRAVIOLETA DE AMALGAMA DE BAJA PRESIÓN				
Ø Lámpara	Longitud	Potencia	Emisión UV a 254 nm	Precio
32 mm	17 m	5.583 W	137,52 W/m ²	2.680 €

Así mismo, se determina el consumo energético del sistema de fuentes ultravioletas, el cual está dado por la potencia que, a su vez, tiene dependencia de las horas que estén encendidas las lámparas. Se considera que el equipo opera de forma ininterrumpida en formato 24 por 7, 365 días al año.

El valor de la energía consumida se relaciona con el precio de la electricidad, el cual se determina a partir de la cuota para instalaciones industriales, distinguiendo la cuota diurna de la nocturna, teniendo en cuenta que cada una ocupa 12 horas diarias (véase *Tabla A.3.2*).

Tabla A.3.2 Coste de la electricidad.

	PRECIO (€/kWh)
Cuota diurna	0,06
Cuota nocturna	0,04

En la *Tabla A.3.3* se detalla el coste anual relacionado con el consumo de energía del sistema de lámparas ultravioletas.

Tabla A.3.3 Coste total energía.

LÁMPARA ULTRAVIOLETA DE AMALGAMA DE BAJA PRESIÓN					
Potencia (kW)	Energía total al día (kWh)	Consumo (kWh/año)	Precio unitario (€)	Cantidad (Ud.)	Precio total (€)
5,583	134,008	48.913,05	2.445,65	121	295.923,98

Por otro lado, todos los cables y conexiones eléctricas, estarán revestidos en termorretráctil para protegerlos de la humedad y evitar cortocircuitos o averías. El coste de los tubos de termorretráctil necesarios se estima en 80 €.

3.2 CORAZA

La coraza es la parte del intercambiador que contiene el sistema de lámparas ultravioletas y por la cual circula el agua residual.

En la *Tabla A.3.4* se recogen las características principales de la coraza.

Tabla A.3.4 Parámetros característicos de la coraza.

CORAZA				
Material	Ø Coraza	Espesor	Longitud	Peso
AISI 304L	3,56 m	5 mm	17 m	15 t

Parámetros característicos como el peso y el espesor vienen determinados por una empresa de China.

Por otro lado, cuando se elabora el presupuesto de la coraza se debe añadir al precio el FOB (Free on Board), que se define como el valor de la mercancía puesta en el puerto de embarque incluyendo el coste de empaquetado, etiquetado, gastos de aduana, etc. Esta cláusula de comercio internacional se debe a que la coraza proviene de Shanghai, China.

En la *Tabla A.3.5* se detalla el coste de la coraza.

Tabla A.3.5 Presupuesto de la coraza.

CORAZA					
Cantidad	Material	Peso	Precio unitario	FOB	Precio total
1	AISI 304L	15 t	3.450 €/t	8.483 €	60.233 €

3.3 FONDO BOMBEADO

Los fondos se definen como las tapas o cierres que se adaptan en los extremos de recipientes cilíndricos sometidos a presión interior y cuyo objetivo principal es la contención o almacenamiento de líquidos o gases. En este caso se utiliza como cierre de la coraza.

Aunque pueden utilizarse fondos planos, normalmente se emplean fondos de bordes rectos y parte central curvada con distintas formas, por ofrecer una resistencia muy superior y permitir reducir los espesores empleados, que en el caso de fondos planos serían muy gruesos. En el presente proyecto se ha decidido utilizar un fondo de baja presión.

En la *Figura A.3.4* se muestra la geometría del fondo bombeado con los parámetros geométricos definidos.



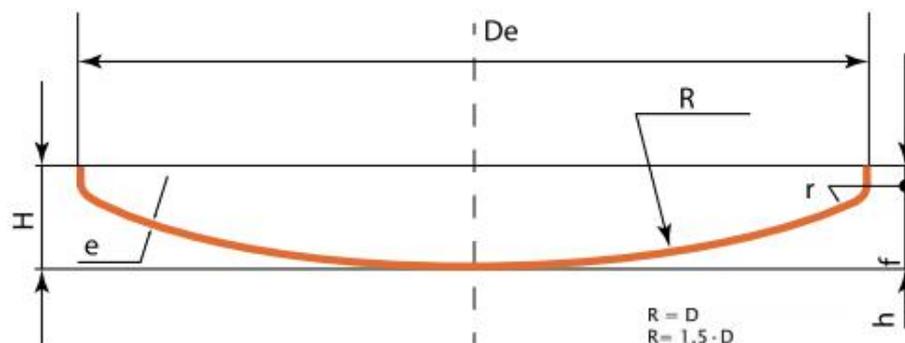
FONCALP, S.L.

C/ Nueva, nº. 81 Telf. 926 510 598
13.700 Tomelloso www.foncalp.es
(Ciudad Real) info@foncalp.es

FICHA TÉCNICA

F-2
BAJA PRESIÓN
(SIMILAR A CAMPSA)

FONDO BAJO BOMBEO



$$\begin{aligned} R &= D \\ R &= 1,5 \cdot D \\ R &= 2 \cdot D ; \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r &= 0,02 \cdot D \\ r &= 0,05 \cdot D \\ r &= 0,09 \cdot D ; \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H &= 0,15 \cdot D + h + e \\ H &= 0,091 \cdot D + h + e ; \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h &= 0 \cdot e \\ h &= e \\ h &= 2 \cdot e ; \dots \end{aligned}$$

EQUIVALENCIA DE LOS SÍMBOLOS GENERALES

Diámetro = D	Espesor fondo = e	Altura de curvado = f
Diámetro disco = Dd	Radio de bombeo = R / Rb	Altura total fondo = H
Diámetro interior = Di	Radio de pestaña = r / rp	Volumen (litros) = V
Diámetro medio = Dm	Plano de pestaña = h	Arqueo del perfil = ar
Diámetro exterior = De		

Figuras referidas orientativa y no vinculadamente a norma asociada en su caso. Tolerancia de cotas según presupuesto. Si en él no se especifica, genéricamente serán las siguientes para fondos superiores a diámetro 400 mm: Rb= +/-20% rp= +/-20% h= +/-10mm

FONCALP, S.L.

Figura A.3.4 Fondo bombeado con los parámetros definidos.

Para conocer los valores de los parámetros característicos del fondo de baja presión se sigue la siguiente ficha técnica:

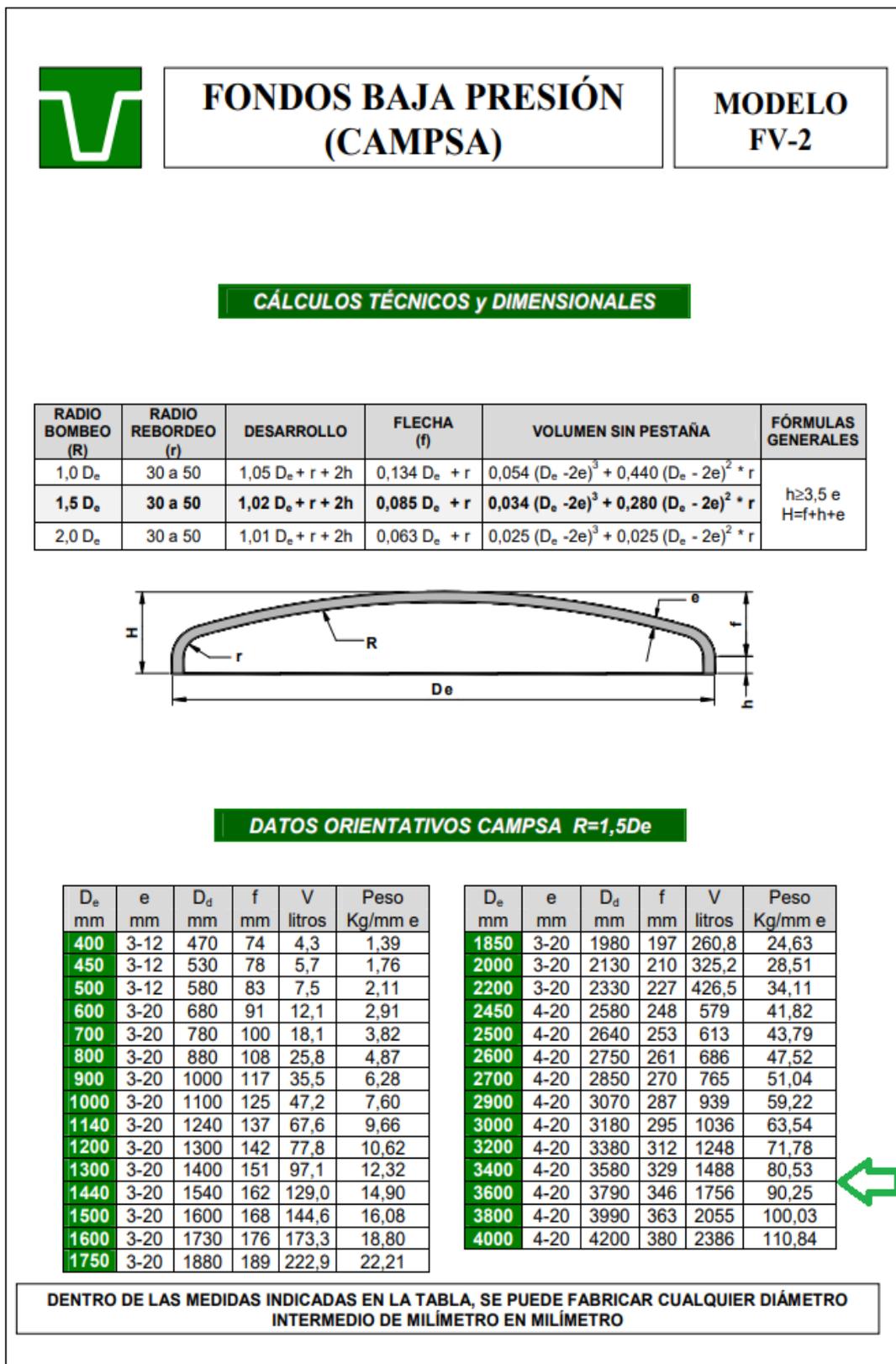


Figura A.3.5 Ficha técnica del fondo bombeado.

Conociendo que el diámetro interno de la coraza es de 3.560 mm y que ésta tiene un espesor de 5 mm, se fija un valor de 3.565 mm para el diámetro exterior. Dicho valor corresponde también para el fondo bombeado, por lo que para obtener los datos de los parámetros se escalan las distintas magnitudes.

Por tanto, las características del fondo de baja presión se recogen en la *Tabla A.3.6*.

Tabla A.3.6 Parámetros característicos del fondo bombeado.

FONDO BOMBEADO					
D_e	e	D_d	f	V	Peso
3,565 m	5 mm	3,753 m	343 mm	1.739 L	89,37 kg/mm e

Los distintos parámetros calculados están detallados en la *Figura A.3.4*, no obstante se definen de nuevo:

- ❖ D_e , Diámetro exterior (m).
- ❖ e, Espesor del fondo (mm).
- ❖ D_d , Diámetro disco (m).
- ❖ f, Altura de curvado (mm).
- ❖ V, Volumen (litros).

Una vez conocidos estos valores, en la *Tabla A.3.7* se determina el presupuesto.

Tabla A.3.7 Presupuesto del fondo bombeado.

FONDO BOMBEADO					
Material	Cantidad	Peso	Peso total	Precio unitario	Precio total
AISI 304L	1	89,37 kg/mm e	446,85 kg	3,45 €/kg	1.541,63 €

3.4 PLACA TUBULAR

La placa de tubos consiste en una placa circular plana taladrada con orificios circulares a través de los cuales se insertan las lámparas. En el presente proyecto tiene como función la sujeción del sistema de lámparas ultravioletas.

Dada la necesidad de poder extraer las lámparas de los agujeros para limpiarlas, no se realiza una soldadura perimetral en los extremos de los tubos con el fin de unirlos a las placas tubulares permanentemente. No obstante, tanto en la base de conexión de cada lámpara como en su otro extremo se coloca un sistema de sellado de acero inoxidable AISI 304L, que se enrosca alrededor del tubo de cuarzo y de esta forma comprime el retén y la junta del tubo exterior para evitar posibles fugas.

Además, se incluye una brida ciega con orificios para permitir la combinación del reactor con un cabezal desmontable con el propósito de cerrar el otro extremo de la carcasa si se desea. De este modo se permite aumentar la protección de la base de conexión de las lámparas en caso que sea necesario y además, como el cabezal es desmontable, el personal de mantenimiento seguirá disponiendo de cierta flexibilidad en determinar cómo instalar y operar sobre el sistema.

Una vez definidas las medidas de las lámparas y la carcasa, se puede conocer el dimensionamiento de la placa tubular a excepción del espesor. Para ello se utiliza una página web que calcula el espesor en función del resto de magnitudes.⁴³

Se obtiene un valor mínimo para el espesor de 3 mm, no obstante, teniendo en cuenta los cálculos realizados anteriormente, se decide utilizar un espesor de placa tubular de 5 mm.

Los parámetros característicos de la placa tubular se recogen en la *Tabla A.3.8*.

Tabla A.3.8 Parámetros característicos de la placa tubular.

PLACA TUBULAR					
Material	Ø Placa tubular	Ø Orificios	Pitch	Espesor	Peso
AISI 304L	3,565 m	32 mm	316 mm	5 mm	390,43 kg

Por lo tanto, el presupuesto de la placa tubular se muestra en la siguiente tabla.

Tabla A.3.9 Presupuesto placa tubular.

PLACA TUBULAR				
Material	Cantidad	Precio unitario	Peso	Precio total
AISI 304L	2	3,45 €/kg	780,87 kg	2.694,02 €

⁴³ <https://ingenieriacolaborativa.com/espesor-placa-tubular-de-un-intercambiador-de-calor/>

3.5 CONEXIÓN DE ENTRADA Y DE SALIDA

El reactor fotocatalítico dispone de una primera y una segunda conexión para su acoplamiento a los conductos de entrada y salida del agua. Estas conexiones consisten en un tubo de 20 cm de longitud y un diámetro que se obtiene mediante el caudal de agua a tratar.

Los valores del diámetro de la tubería en función del caudal a tratar se recogen en la *Tabla A.3.10*.

Tabla A.3.10 Relación entre diámetro tubería y caudal a tratar.⁴⁴

DIÁMETRO TUBERÍA (m)	CAUDAL (m ³ /h)
0,050	11-14
0,075	25-40
0,100	50-79
0,125	90-140
0,150	140-230
0,175	220-340
0,200	290-470
0,250	500-790
0,300	790-1.260
0,350	1.150-1.800
0,500	2.950-4.540
0,750	7.920-13.680

Por consiguiente, conociendo que el caudal de agua a tratar es de 983 m³/h se fija un diámetro de 0,300 m.

Así mismo, se incluye una brida plana DIN-2576 PN-10 que permite unir el tubo con la tubería correspondiente, de modo que estos elementos se puedan desunir de manera sencilla en un momento concreto, sin la necesidad de operaciones destructivas.

⁴⁴ <http://maquinariasyequiposindustriales.blogspot.com/2014/03/relacion-diametro-tuberia-caudal.html>

3.6 TIPOS DE SOLDADURA

Los tipos de soldadura que se van a analizar a continuación son los más utilizados para acero inoxidable, puesto que todas las partes que constituyen el reactor fotocatalítico son de este material.

En primer lugar, se evalúa la soldadura por arco manual con electrodo revestido o SMAW (Shielded Metal Arc Welding). Este proceso se caracteriza por el mantenimiento y creación de un arco eléctrico entre el material base a soldar y una varilla metálica denominada electrodo. El electrodo es un alambre revestido, donde el soldador controla el proceso manualmente sobre la longitud y la dirección del arco que se establece entre la pieza a soldar y el extremo del electrodo.

El calor que genera el arco eléctrico consigue fundir tanto el revestimiento como la varilla metálica del electrodo, y a su vez, la combustión del revestimiento permite crear una atmósfera que impide la contaminación del material que se está fundiendo.

En segundo lugar, se estudia el proceso TIG (Tungsten Inert Gas) que resulta un procedimiento muy adecuado para soldar acero inoxidable. En este caso, el arco eléctrico se establece entre el metal base y un electrodo no consumible de Tungsteno, bajo una atmósfera protectora que ha sido generada por el gas inerte, que normalmente se trata de argón.

Este tipo de soldadura, generalmente se utiliza para soldar piezas de poco espesor, hasta 6 mm aproximadamente, ya que para espesores de piezas mayores no resulta económico. De esta manera, para espesores mayores a los 6 mm, se suele emplear procedimientos de soldadura por arco sumergido.⁴⁴

En tercer lugar, el proceso de soldadura por arco sumergido o SAW (Submerged Arc Welding), el cual es un tipo de soldadura con arco eléctrico en el que no se ve el arco de soldadura quemándose entre el electrodo sin fin y la pieza. El arco eléctrico y el baño de fusión están cubiertos por un polvo granulado. La escoria formada por el polvo sirve para proteger la zona de soldadura frente a la influencia de la atmósfera.

⁴⁴ <https://solmetal.wordpress.com/2017/08/10/que-tipo-de-soldadura-se-utiliza-para-acero-inoxidable/>

Este tipo de soldadura pasa a ser económicamente rentable a partir de un espesor de chapa de 6 mm.

En el presente proyecto las distintas piezas que constituyen el reactor fotocatalítico, tienen un espesor de 5 mm, a excepción de la brida ciega y la brida plana, que tienen un espesor de 46 y 26 mm, respectivamente. De manera que se utiliza el proceso de soldadura TIG y el procedimiento por arco sumergido para unir las diferentes piezas.

3.7 DIOXIDO DE TITANIO DEGUSSA P25

El catalizador empleado en el presente proyecto es el producido por la compañía alemana Evonik-Degussa ya que posee una excelente actividad fotocatalítica y una elevada eficiencia. En la *Tabla A.3.11* se detallan las cantidades utilizadas para tratar el caudal de agua residual.

Tabla A.3.11 Consumo de catalizador.

DIÓXIDO DE TITANIO DEGUSSA P25		
Consumo diario (kg)	Consumo anual (kg)	Consumo (kg/m ³ agua)
235,81	86.070,65	0,01

El precio del dióxido de titanio P25 se ha determinado mediante un compendio de los suministradores más próximos. Cabe destacar que el precio de catalizador puede ser ampliamente mayor, lo cual es determinante, ya que en consecuencia el proyecto puede no ser viable; no obstante, el presente proyecto se realiza con fines medioambientales.

La *Tabla A.3.12*, muestra los costes anuales relacionados con el catalizador.

Tabla A.3.12 Coste catalizador.

DIÓXIDO DE TITANIO DEGUSSA P25			
Unidad	Precio unitario (€/Un)	Consumo anual (kg/año)	Precio (€)
kg	25	86.070,65	2.151.766,25

A continuación se muestra la ficha técnica ofrecida por el proveedor.

ADDITIONAL PRODUCT INFORMATION

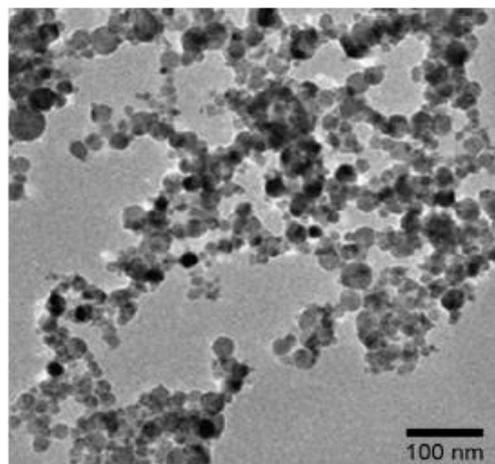
Titanium (IV) oxide, TiO₂ nanoparticles

Mixed rutile / anatase phase
Average particles size ca. 21 nm
Catalogue number: PL-TiO-P25

Physico-chemical Data

Properties	Average Value
Specific surface area (BET), m ² /g	50±15
Average primary particle size, nm	21
Tapped density, g/L	130
Moisture, 2 hours at 105 °C, wt. %	< 1,5
Ignition loss, 2 hours at 1000 °C based on material dried 2 hours at 105 °C, %	< 2,0
pH in 4% dispersion	3,5-4,5
TiO ₂ content based on ignited material, wt. %	> 99,5
Al ₂ O ₃ content based on ignited material, wt. %	< 0,3
SiO ₂ content based on ignited material, wt. %	<0,2
Fe ₂ O ₃ content based on ignited material, wt. %	< 0,01
HCl content based on ignited material, wt. %	< 0,3
Sieve residue (45µm) acc. to DIN EN ISO 787/18, wt. %	< 0,05

TEM



Page 1 of 1

Figura A.3.6 Ficha técnica del dióxido de titanio Degussa P25.

4 ANEXO 4. ESTUDIO DE SEGURIDAD Y SALUD

La realización de un análisis de riesgos sirve para identificar, evaluar y cuantificar las causas de posibles daños y las consecuencias que se puedan producir.

Existen muchos tipos de análisis de riesgos que se utilizan en la industria y que siguen principios diferentes o se centran en otros receptores de los riesgos. En el caso del presente proyecto, se ha elegido el HAZOP como método de evaluación y gestión de los posibles riesgos que puedan ocurrir. Esta metodología es altamente efectiva para identificar desviaciones a los diseños previstos en la ingeniería de los sistemas evaluados.

El Análisis Funcional de Operatividad (HAZOP) consiste en analizar sistemáticamente las causas y las consecuencias de las desviaciones que pueden darse en determinadas variables de proceso con respecto a los parámetros normales de operación.

El primer paso en el desarrollo del análisis es la selección de los elementos críticos que deben estudiarse, en este caso, el reactor fotocatalítico.

Seguidamente, de forma secuencial y repetitiva, se aplican unas palabras guía a cada una de las condiciones de operación del proceso, las sustancias y las variables que intervienen. En la *Tabla A.4.1*, se recogen algunas de las palabras guía más utilizadas y su significado.

Tabla A.4.1 Algunas palabras guía utilizadas en el HAZOP.

PALABRA GUÍA	SIGNIFICADO
NO	Ausencia de la variable a la cual se aplica
MÁS	Aumento cuantitativo de una variable
MENOS	Disminución cuantitativa de una variable
INVERSO	Obtención del efecto contrario al que se pretende

El presente proyecto está enfocado en el diseño y dimensionamiento del reactor fotocatalítico; no obstante, para poder llevar a cabo el estudio de seguridad y salud, se realiza una representación esquemática del tratamiento avanzado completo (véase Figura A.4.1).

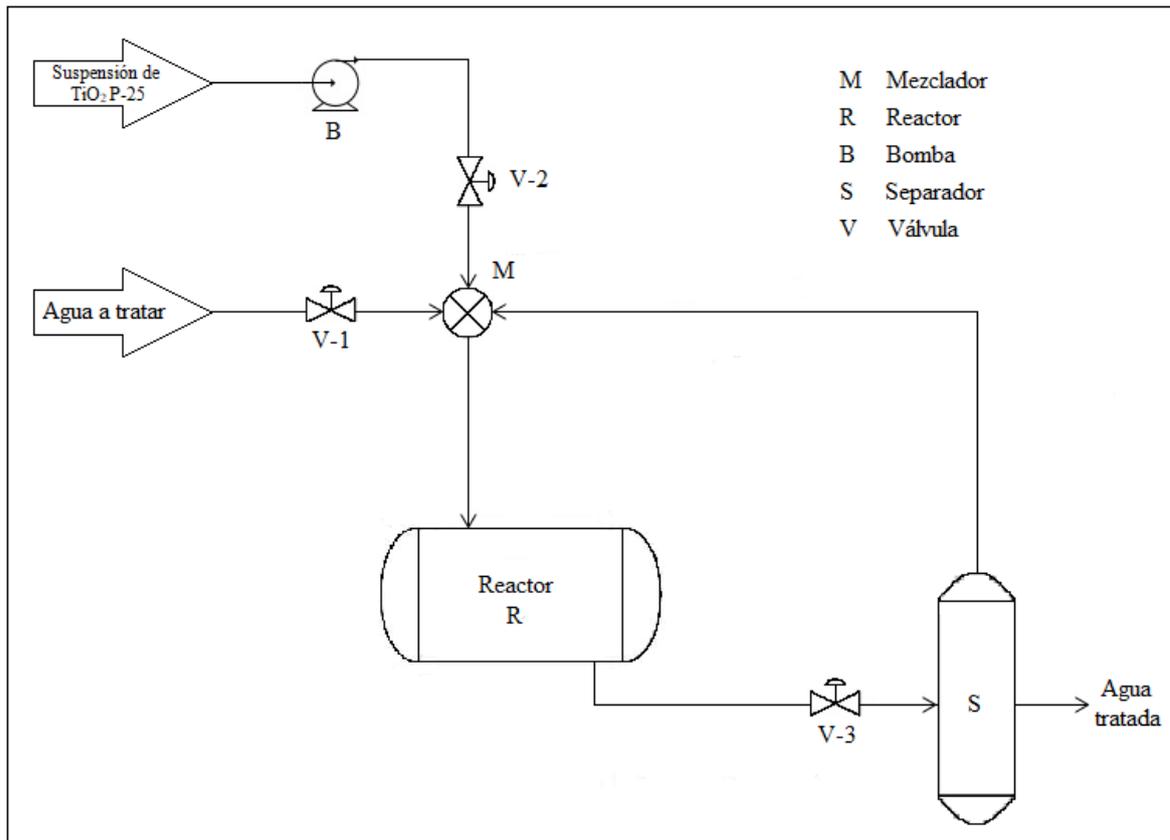


Figura A.4.1 Representación esquemática del tratamiento avanzado.

A continuación, se plantea de forma sistemática todas las desviaciones que implican la aplicación de cada palabra guía a una determinada variable o actividad (ver *Tabla A.4.2*).

Cabe destacar que aunque el método HAZOP tiene como finalidad identificar cualitativamente los posibles riesgos desde el punto de vista de la seguridad, también se han evaluado las consecuencias que pueden darse en la producción. De modo que en la *Tabla A.4.2* se detalla si las consecuencias son de seguridad o de producción, con la letra S o P, respectivamente.

Diseño de un reactor fotocatalítico para la degradación de contaminantes emergentes presentes en el efluente de una Estación Depuradora de Aguas Residuales

Tabla A.4.2 Aplicación de la técnica HAZOP al reactor fotocatalítico.

HAZOP REACTOR					
Palabra guía	Variable	Desviación	Causas posibles	Consecuencias posibles	Medidas correctivas
NO	Flujo	No hay flujo de entrada (agua)	<ul style="list-style-type: none"> - Válvula V-1 estropeada, cerrada. - Fuga por rotura de la tubería. - Obstrucción en el circuito. 	<ul style="list-style-type: none"> - Posible pérdida de materias primas. (P) - Aumenta la temperatura en el reactor. (S) 	<ul style="list-style-type: none"> - Introducir comprobación periódica de V-1 y tuberías en el manual de operaciones. - Instalar indicadores de apertura de válvulas manuales.
MÁS	Flujo	Flujo de materia prima aumenta	- Válvula de entrada V-2 no funciona y se abre.	- Disminución de la conversión. (P)	<ul style="list-style-type: none"> - Inspeccionar tuberías, para encontrar la causa del bloqueo. - Mantenimiento regular de la válvula V-2.
	Flujo	Flujo de entrada (agua)	<ul style="list-style-type: none"> - Fallo válvula de control de entrada de líquido (V-1). - Válvula de salida cerrada (V-3). 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor caudal de salida. (S) - Disminución de la conversión. (P) 	<ul style="list-style-type: none"> - Revisiones rutinarias de válvulas V-1 y V-3. - Instalación punto de drenaje en el caso de tener un pico de caudal.
	Presión	Presión en exceso	- Obstrucción tubería de salida del reactor.	<ul style="list-style-type: none"> - La reacción no sucede de manera adecuada. (P) - Mayor desgaste de tuberías y equipos. (S) 	<ul style="list-style-type: none"> - Instalar sensores de presión y alarma de presión alta. - Inspecciones rutinarias de tuberías.

HAZOP REACTOR					
Palabra guía	Variable	Desviación	Posibles causas	Posibles consecuencias	Medidas correctivas
MÁS	Temperatura	Temperatura en el reactor aumenta	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura alta en el exterior. - Temperaturas de las corrientes de entrada por encima de las de diseño. - Flujo de entrada menor. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de la producción de subproductos. (S) - Mayor desgaste en equipo y tuberías. (S) - Variaciones de las condiciones de operación óptimas. (S) 	<ul style="list-style-type: none"> - Instalar sensores de temperatura. - Instalar alarma de temperatura alta. - Revisiones rutinarias de válvulas V-1 y V-2.
MENOS	Flujo	Flujo de materia prima disminuye	<ul style="list-style-type: none"> - Válvula cerrada parcialmente (V-2). - Fallo bomba (B). - Fuga en tuberías. 	<ul style="list-style-type: none"> - Disminución de la producción de producto. (P) - Se reduce el grado de conversión. (P) 	<ul style="list-style-type: none"> - Inspeccionar tuberías, para encontrar la causa del bloqueo. - Mantenimiento regular de la válvula V-2 y de la bomba B.
	Actividad	Menos actividad del catalizador	<ul style="list-style-type: none"> - Ensuciamiento del reactor. - Disminución de la concentración de catalizador o salida de catalizador en exceso 	<ul style="list-style-type: none"> - Disminución de la conversión. (P) 	<ul style="list-style-type: none"> - Realizar estudio de la desactivación del catalizador.

HAZOP REACTOR					
Palabra guía	Variable	Desviación	Causas posibles	Consecuencias posibles	Medidas correctivas
MENOS	Presión	Menos presión	<ul style="list-style-type: none"> - Avería de válvula de control de entrada (V-1 y/o V-2) - Válvula de entrada cerrada (V-1 y/o V-2) 	<ul style="list-style-type: none"> - Disminución de la conversión. (P) 	<ul style="list-style-type: none"> - Revisiones rutinarias de válvulas (V-1 y V-2).
	Temperatura	Temperatura en el reactor disminuye	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de las corrientes de entrada por debajo de las de diseño. - Flujo de entrada mayor. - Fallo en el suministro eléctrico. - Mal intercambio de calor por ensuciamiento de las lámparas UV. 	<ul style="list-style-type: none"> - Disminución de la conversión. (P) - Producción de producto decrece. (P) - La velocidad de reacción varía. (S) 	<ul style="list-style-type: none"> - Instalar sensor de temperatura a la entrada del reactor. - Centro de control del sistema de lámparas UV. - Sensor de intensidad UV. - Revisiones rutinarias de las fuentes UV.
INVERSO	Flujo	Caudal inverso	<ul style="list-style-type: none"> - Obstrucción/rotura de las válvulas de retención. 	<ul style="list-style-type: none"> - Parada de la producción. (S y P) 	<ul style="list-style-type: none"> - Instalar válvula antirretorno.

5 ANEXO 5. ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL

El presente proyecto consiste en el diseño de un reactor fotocatalítico para la degradación de contaminantes emergentes presentes en el efluente de una estación depuradora de aguas residuales. Por tanto, se propone un tratamiento terciario avanzado como posible ampliación de la EDAR; por lo que, con respecto al impacto ambiental no modifica sustancialmente el impacto ambiental de una planta depuradora ya existente.

Así mismo, el tratamiento de agua residual con luz UV no altera las propiedades del agua tratada y no suele generar residuos ni subproductos que posteriormente requieran de un tratamiento. Sin embargo, algunos compuestos químicos pueden ser alterados por la radiación ultravioleta, con la ventaja de que los compuestos formados son inofensivos o reducidos a formas más inofensivas. Por todo ello, actualmente se considera que la desinfección UV no tiene impactos ambientales adversos.

Por otro lado, se requiere llevar a cabo una etapa de recuperación o un proceso integrado de separación para evitar la pérdida de fotocatalizador. No obstante, en caso que se generen residuos de TiO_2 , la Salud Ambiental de la Organización Mundial de la Salud (OMS) afirma que presentan un potencial de bajo riesgo en mamíferos o especies acuáticas.³⁶ Sin embargo, falta una evaluación general de los efectos toxicológicos de las nanopartículas de dióxido de titanio en términos de interacciones perjudiciales con los sistemas biológicos y químicos, y el medio ambiente. Por tanto, respecto a los efectos ambientales, el dióxido de titanio presenta una baja toxicidad y no se han documentado efectos negativos, pero aún deben ser evaluados de manera más precisa, puesto que actualmente todavía presentan características ambientales y de salud indefinidas.

Finalmente, respecto a la exposición al ruido por el flujo turbulento que caracteriza el movimiento del agua residual por el reactor, y las vibraciones que puedan darse en las lámparas, se propone la instalación de aislantes para disiparlo, además de facilitar a los trabajadores los equipamientos de protección individual adecuados.

³⁶ Warheit, DB. et al. (2007). “Desarrollo de un conjunto básico de pruebas de toxicidad utilizando partículas ultrafinas de TiO_2 como componente del manejo del riesgo de nanopartículas” en *Toxicology Letters*, vol.171, issue. 3, p. 99-110.

6 ANEXO 6. FICHA TÉCNICA Y DE SEGURIDAD DEL DIÓXIDO DE TITANIO DEGUSSA P25



FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Fecha de preparación 21-sep-2009

Fecha de revisión 05-mar-2019

Número de Revisión 7

SECCIÓN 1: IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O LA MEZCLA Y DE LA SOCIEDAD O LA EMPRESA

1.1 Identificador del producto

Nombre del producto	Titanium(IV) oxide
Cat No. :	384290000; 384290010; 384290500; 384292500
Sinónimos	Titanium dioxide
Nº. CAS	13463-67-7
Nº. CE.	236-675-5
Fórmula molecular	O2 Ti
Número de registro REACH	01-2119489379-17

1.2. Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Uso recomendado	Productos químicos de laboratorio.
Sector de uso	SU3 - Usos industriales: Usos de sustancias como tales o en preparados en emplazamientos industriales
Categoría del producto	PC21 - Productos químicos de laboratorio
Categorías de procesos	PROC15 - Uso como reactivo de laboratorio
Categoría de emisión al medio ambiente	ERC6a: Uso industrial que da lugar a la fabricación de otra sustancia (uso de sustancias intermedias)
Usos desaconsejados	No hay información disponible

1.3. Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Empresa	Entidad de la UE / nombre de la empresa Acros Organics BVBA Janssen Pharmaceuticalaan 3a 2440 Geel, Belgium
	Nombre de la entidad / negocio del Reino Unido Fisher Scientific UK Bishop Meadow Road, Loughborough, Leicestershire LE11 5RG, United Kingdom
Dirección de correo electrónico	begel.sdsdesk@thermofisher.com

1.4. Teléfono de emergencia

Para obtener información en EE.UU., llame al: 800-ACROS-01
Para obtener información en Europa, llame al: +32 14 57 52 11

Número de emergencia, Europa: +32 14 57 52 99
Número de emergencia, EE.UU.: 201-796-7100
Número de teléfono de CHEMTREC, EE.UU.: 800-424-9300
Número de teléfono de CHEMTREC, Europa: 703-527-3887

SECCIÓN 2: IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

2.1. Clasificación de la sustancia o de la mezcla

ACR38429

Página 1 / 11

Figura A.6.1 Ficha técnica y de seguridad del dióxido de titanio Degussa P25.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Titanium(IV) oxide

Fecha de revisión 05-mar-2019

CLP clasificación - Reglamento (CE) n° 1272/2008

Peligros físicos

A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación

Peligros para la salud

A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación

Peligros para el medio ambiente

A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación

2.2. Elementos de la etiqueta

Indicaciones de peligro

Consejos de prudencia

2.3. Otros peligros

No hay información disponible

SECCIÓN 3: COMPOSICIÓN/INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

3.1. Sustancias

Componente	Nº. CAS	Nº. CE.	Porcentaje en peso	CLP clasificación - Reglamento (CE) n° 1272/2008
Dióxido de titanio	13463-67-7	EEC No. 236-675-5	>95	-

Número de registro REACH

01-2119489379-17

Texto completo de las Indicaciones de peligro: ver la sección 16

SECCIÓN 4: PRIMEROS AUXILIOS

4.1. Descripción de los primeros auxilios

Contacto con los ojos

Enjuagar inmediatamente con abundante agua, también bajo los párpados, durante al menos 15 minutos. Consultar a un médico.

Contacto con la piel

Consulte al médico. Lavar inmediatamente con abundante agua durante al menos 15 minutos.

Ingestión

No provocar el vómito. Consulte al médico.

ACR38429

Página 2 / 11

Figura A.6.1 Ficha técnica y de seguridad del dióxido de titanio Degussa P25.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD	
Titanium(IV) oxide	Fecha de revisión 05-mar-2019
Inhalación	Sacar al aire libre. Si la respiración es difícil, proporcionar oxígeno. Consultar a un médico inmediatamente si se producen síntomas.
Equipo de protección para el personal de primeros auxilios	No se requieren precauciones especiales.
<u>4.2. Principales síntomas y efectos, agudos y retardados</u>	
No hay información disponible.	
<u>4.3. Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente</u>	
Notas para el médico	Tratar los síntomas.
SECCIÓN 5: MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS	
<u>5.1. Medios de extinción</u>	
Medios de extinción apropiados Esta sustancia no es inflamable; utilizar el agente más adecuado para extinguir el incendio circundante.	
Medios de extinción que no deben utilizarse por razones de seguridad No hay información disponible.	
<u>5.2. Peligros específicos derivados de la sustancia o de la mezcla</u>	
Su descomposición térmica puede dar lugar a la liberación de vapores y gases irritantes.	
Productos de combustión peligrosos Ninguna en condiciones normales de uso.	
<u>5.3. Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios</u>	
Como en cualquier incendio, llevar un aparato de respiración autónomo de presión a demanda MSHA/NIOSH (aprobado o equivalente) y todo el equipo de protección necesario.	
SECCIÓN 6: MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL	
<u>6.1. Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia</u>	
Utilícese equipo de protección individual. Asegurar una ventilación adecuada. Evitar la formación de polvo.	
<u>6.2. Precauciones relativas al medio ambiente</u>	
Para más información ecológica, ver el apartado 12.	
<u>6.3. Métodos y material de contención y de limpieza</u>	
Recoger o aspirar el derrame y ponerlo en un contenedor adecuado para la eliminación. Evitar la formación de polvo.	
<u>6.4. Referencia a otras secciones</u>	
Consultar las medidas de protección en las listas de las secciones 8 y 13.	
SECCIÓN 7: MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO	
ACR38429	Página 3 / 11

Figura A.6.1 Ficha técnica y de seguridad del dióxido de titanio Degussa P25.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Titanium(IV) oxide

Fecha de revisión 05-mar-2019

7.1. Precauciones para una manipulación segura

Llevar equipo de protección individual. Asegurar una ventilación adecuada. Evitese el contacto con los ojos y la piel. Evitar el contacto con la ropa. Evitar respirar vapores o neblas. No ingerir. Evitar la formación de polvo. Evitar respirar el polvo.

Medidas higiénicas

Manipular respetando las buenas prácticas de higiene industrial y seguridad. Manténgase lejos de alimentos, bebidas y piensos. No comer, beber ni fumar durante su utilización. Quitar y lavar la ropa contaminada antes de reutilizar. Lávense las manos antes de los descansos y después de terminar la jornada laboral.

7.2. Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

Mantener el contenedor perfectamente cerrado y en un lugar seco y bien ventilado.

7.3. Usos específicos finales

Uso en laboratorios

SECCIÓN 8: CONTROLES DE EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN INDIVIDUAL

8.1 Parámetros de control

Límites de exposición

Lista fuente (s) **ES** Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. Límites de Exposición Profesional Para Agentes Químicos en España. Establecidos bajo Ley 31/1995, Prevención de Riesgos Laborales y Real Decreto 39/1997, Reglamento de los Servicios de Prevención. La Implementación de esta legislación en el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) es bajo Real Decreto 374/2001 de Mayo 1, 2001. Publicado inicialmente en 1995. actualizada en el 2011.

Componente	Unión Europea	Reino Unido	Francia	Bélgica	España
Dióxido de titanio		STEL: 30 mg/m ³ 15 min STEL: 12 mg/m ³ 15 min TWA: 10 mg/m ³ 8 hr TWA: 4 mg/m ³ 8 hr	TWA / VME: 10 mg/m ³ (8 heures).	TWA: 10 mg/m ³ 8 uren	TWA / VLA-ED: 10 mg/m ³ (8 horas)
Componente	Italia	Alemania	Portugal	Países Bajos	Finlandia
Dióxido de titanio		TWA: 0.3 mg/m ³ (8 Stunden). MAK multiplied by the material density, except ultrafine particles Höhepunkt: 2.4 mg/m ³	TWA: 10 mg/m ³ 8 horas		
Componente	Austria	Dinamarca	Suiza	Polonia	Noruega
Dióxido de titanio	MAK-KZW: 10 mg/m ³ 15 Minuten MAK-TMW: 5 mg/m ³ 8 Stunden	TWA: 6 mg/m ³ 8 timer	TWA: 3 mg/m ³ 8 Stunden	TWA: 10 mg/m ³ 8 godzinach	TWA: 5 mg/m ³ 8 timer STEL: 10 mg/m ³ 15 minutter. value calculated
Componente	Bulgaria	Croacia	Irlanda	Chipre	República Checa
Dióxido de titanio	TWA: 10.0 mg/m ³	TWA-GVI: 10 mg/m ³ 8 satima. total dust TWA-GVI: 4 mg/m ³ 8 satima. respirable dust	TWA: 10 mg/m ³ 8 hr. total inhalable dust TWA: 4 mg/m ³ 8 hr. respirable dust STEL: 30 mg/m ³ 15 min STEL: 12 mg/m ³ 15 min		
Componente	Estonia	Gibraltar	Grecia	Hungría	Islandia
Dióxido de titanio	TWA: 5 mg/m ³ 8 tundides.		TWA: 10 mg/m ³ TWA: 5 mg/m ³		TWA: 6 mg/m ³ 8 klukkustundum. Ti Celling: 12 mg/m ³ Ti

ACR38429

Página 4 / 11

Figura A.6.1 Ficha técnica y de seguridad del dióxido de titanio Degussa P25.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Titanium(IV) oxide

Fecha de revisión 05-mar-2019

Componente	Letonia	Lituania	Luxemburgo	Malta	Rumania
Dióxido de titanio	TWA: 10 mg/m ³	TWA: 5 mg/m ³ IPRD			TWA: 10 mg/m ³ 8 ore STEL: 15 mg/m ³ 15 minute

Componente	Rusia	República Eslovaca	Eslovenia	Suecia	Turquía
Dióxido de titanio	TWA: 10 mg/m ³ 2003	TWA: 5 mg/m ³		TLV: 5 mg/m ³ 8 timmar. NGV	

Valores límite biológicos

Este producto, tal como se suministra, no contiene ningún material peligroso con límites biológicos establecidos por los organismos reguladores regionales específicos

Métodos de seguimiento

EN 14042:2003 Título de identificación: Atmósferas en los lugares de trabajo. Directrices para la aplicación y uso de procedimientos para evaluar la exposición a agentes químicos y biológicos.

Nivel sin efecto derivado (DNEL) No hay información disponible

Ruta de exposición	Efecto agudo (local)	Efecto agudo (sistémica)	Los efectos crónicos (local)	Los efectos crónicos (sistémica)
Oral Cutánea Inhalación				

Concentración prevista sin efecto (PNEC) No hay información disponible.

Agua dulce	0,127 mg/l
Sedimentos de agua dulce	>1000 mg/kg
Agua marina	>1 mg/l
Sedimentos de agua marina	>100 mg/kg

8.2 Controles de la exposición

Medidas técnicas

Ninguna en condiciones normales de uso.

Equipos de protección personal

Protección de los ojos

Gafas protectoras con cubiertas laterales (Norma de la UE - EN 166)

Material de los guantes	Tiempo de penetración	Espesor de los guantes	Norma de la UE	Guante de los comentarios
Caucho natural Goma de nitrilo Neopreno PVC	Consulte las recomendaciones del fabricante	-	EN 374	(requisito mínimo)

Protección de la piel y el cuerpo Utilizar guantes y ropas de protección adecuados para evitar la exposición de la piel

Inspeccione los guantes antes de su uso

Por favor, observe las instrucciones en cuanto a la permeabilidad y el tiempo de adelanto que son provistos por el proveedor de los guantes. (Consulte al fabricante / proveedor para obtener información).

Asegurarse de que los guantes son adecuados para la tarea química compatibilidad, destreza, condiciones de funcionamiento

También tener en cuenta las condiciones locales específicas bajo las cuales el producto es utilizado, tal como el

ACR38429

Página 5 / 11

Figura A.6.1 Ficha técnica y de seguridad del dióxido de titanio Degussa P25.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Titanium(IV) oxide

Fecha de revisión 05-mar-2019

Quítese los guantes con cuidado para evitar contaminación de la piel.

Protección respiratoria No necesario usar equipo protector en las condiciones normales de su uso.

A gran escala / uso de emergencia Utilice un NIOSH / MSHA o la norma europea EN 136 respirador aprobado si los límites de exposición son excedidos o irritación u otros síntomas son experimentados
Tipo de filtro recomendado: Partículas filtrar

Pequeña escala / uso en laboratorio Mantener una ventilación adecuada

Controles de exposición medioambiental No hay información disponible.

SECCIÓN 9: PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

9.1. Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

Aspecto	Blancuzco	
Estado físico	Polvo(s) Sólido	
Olor	Inodoro	
Umbral olfativo	No hay datos disponibles	
pH	3.5-4.5 @ 20°C	40 g/l water
Punto/intervalo de fusión	1855 °C / 3371 °F	
Punto de reblandecimiento	No hay datos disponibles	
Punto /intervalo de ebullición	2900 °C / 5252 °F	
Punto de Inflamación	No hay información disponible	Método - No hay información disponible
Índice de Evaporación	No es aplicable	Sólido
Inflamabilidad (sólido, gas)	No hay información disponible	
Límites de explosión	No hay datos disponibles	
Presión de vapor	No hay información disponible	
Densidad de vapor	No es aplicable	Sólido
Densidad relativa / Densidad	4.230	
Densidad aparente	No hay datos disponibles	
Solubilidad en el agua	Insoluble	
Solubilidad en otros disolventes	No hay información disponible	
Coefficiente de reparto (n-octanol/agua)		
Temperatura de autoignición		
Temperatura de descomposición	No hay datos disponibles	
Viscosidad	No es aplicable	Sólido
Propiedades explosivas	No hay información disponible	
Propiedades comburentes	No hay información disponible	

9.2. Otros datos

Fórmula molecular	O2 Ti
Peso molecular	79.88

SECCIÓN 10: ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

10.1. Reactividad Ninguno conocido, en base a la información facilitada

10.2. Estabilidad química

ACR38429

Página 6 / 11

Figura A.6.1 Ficha técnica y de seguridad del dióxido de titanio Degussa P25.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Titanium(IV) oxide

Fecha de revisión 05-mar-2019

Estable en condiciones normales.

10.3. Posibilidad de reacciones peligrosas

Polimerización peligrosa No se produce ninguna polimerización peligrosa.
Reacciones peligrosas No hay información disponible.

10.4. Condiciones que deben evitarse

Productos incompatibles. Evitar la formación de polvo.

10.5. Materiales incompatibles

Agentes oxidantes fuertes. Ácidos fuertes. Metales.

10.6. Productos de descomposición peligrosos

Ninguna en condiciones normales de uso.

SECCIÓN 11: INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

11.1. Información sobre los efectos toxicológicos

Información del producto

(a) toxicidad aguda;
Oral A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación
Cutánea A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación
Inhalación A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación

Componente	DL50 Oral	DL50 cutánea	LC50 Inhalación
Dióxido de titanio	>10000 mg/kg (Rat)	>10000 mg/kg (Rabbit)	>5.09 mg/l/4h (Rat)

(b) corrosión o irritación cutáneas; A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación

(c) lesiones o irritación ocular graves; A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación

(d) sensibilización respiratoria o cutánea;
Respiratorio A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación
Piel A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación

(e) mutagenicidad en células germinales; A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación
 No mutagénico en la prueba de AMES

(f) carcinogenicidad; A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación

Componente	UE	UK	Alemania	IARC
Dióxido de titanio				Group 2B

(g) toxicidad para la reproducción; A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación

(h) toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición única; A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación

ACR38429

Página 7 / 11

Figura A.6.1 Ficha técnica y de seguridad del dióxido de titanio Degussa P25.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD	
Titanium(IV) oxide	Fecha de revisión 05-mar-2019
SECCIÓN 12: INFORMACIÓN ECOLÓGICA	
(i) toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición repetida;	A la vista de los datos disponibles, no se cumplen los criterios de clasificación
Órganos diana	No hay información disponible.
(j) peligro de aspiración;	No es aplicable Sólido
Otros efectos adversos	No se han estudiado completamente las propiedades toxicológicas. Consulte la información completa en la entrada concreta de RTECS.
Síntomas / efectos, agudos y retardados	No hay información disponible
SECCIÓN 12: INFORMACIÓN ECOLÓGICA	
12.1. Toxicidad	
Efectos de ecotoxicidad	No tirar los residuos por el desagüe.
12.2. Persistencia y degradabilidad	No fácilmente biodegradable
Persistencia	Insoluble en agua.
Degradabilidad	No es pertinente para sustancias inorgánicas.
12.3. Potencial de bioacumulación	Este material puede tener cierto potencial de bioacumulación
12.4. Movilidad en el suelo	Derrame poco probable que penetrar en el suelo No es probable que sea móvil en el medio ambiente debido a su baja solubilidad en agua.
12.5. Resultados de la valoración PBT y mPmB	No hay datos disponibles para la evaluación.
12.6. Otros efectos adversos	
Información del alterador del sistema endocrino	Este producto no contiene ningún alterador del sistema endocrino conocido o sospechoso de serlo
Contaminantes Orgánicos Persistentes	Este producto no contiene ningún conocido o sospechado sustancia
Potencial de reducción de ozono	Este producto no contiene ningún conocido o sospechado sustancia
SECCIÓN 13: CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACIÓN	
13.1. Métodos para el tratamiento de residuos	
Desechos de residuos / producto no utilizado	Quienes generen residuos químicos deberán determinar si los productos químicos desechados se clasifican como residuos peligrosos. Los generadores de residuos químicos deberán consultar también las normativas locales, regionales y nacionales relativas a residuos peligrosos con el fin de asegurar una clasificación completa y exacta.
Embalaje contaminado	Vaciar el contenido restante. Eliminar, observando las normas locales en vigor. No reutilizar los recipientes vacíos.
ACR38429	
Página 8 / 11	

Figura A.6.1 Ficha técnica y de seguridad del dióxido de titanio Degussa P25.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Titanium(IV) oxide

Fecha de revisión 05-mar-2019

Catálogo de Desechos Europeos Según el Catálogo de Desechos Europeos, los Códigos de Desecho no son específico al producto, pero específicos a la aplicación.
Otra información El usuario debe asignar códigos de residuos basándose en la aplicación para la que se utilizó el producto.

SECCIÓN 14: INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

IMDG/IMO No regulado

14.1. Número ONU
14.2. Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas
14.3. Clase(s) de peligro para el transporte
14.4. Grupo de embalaje

ADR No regulado

14.1. Número ONU
14.2. Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas
14.3. Clase(s) de peligro para el transporte
14.4. Grupo de embalaje

IATA No regulado

14.1. Número ONU
14.2. Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas
14.3. Clase(s) de peligro para el transporte
14.4. Grupo de embalaje

14.5. Peligros para el medio ambiente No hay peligros identificados

14.6. Precauciones particulares para los usuarios No se requieren precauciones especiales

14.7. Transporte a granel con arreglo al anexo II del Convenio Marpol 73/78 y del Código IBC No aplicable, productos envasados

SECCIÓN 15: INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

15.1. Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla

Inventarios internacionales Australia, Complete Regulatory Information contained in following SDS's, X = enumeran, China, Canadá, El producto ha sido clasificado y etiquetado conforme a las directivas de la CE o las correspondientes leyes nacionales, El producto está clasificado y etiquetado de acuerdo con la Directiva 1999/45/CE, Europa, TSCA, Corea, Filipinas, Japón, U.S.A. (TSCA), Canadá (DSL/NDSL), Europa (EINECS/ELINCS/NLP), Australia (AICS), Korea (ECL), China (IECSC), Japan (ENCS), Filipinas (PICCS).

Componente	EINECS	ELINCS	NLP	TSCA	DSL	NDSL	PICCS	ENCS	IECSC	AICS	KECL
Dióxido de titanio	236-675-5	-		X	X	-	X	X	X	X	KE-3390

ACR38429

Página 9 / 11

Figura A.6.1 Ficha técnica y de seguridad del dióxido de titanio Degussa P25.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Titanium(IV) oxide

Fecha de revisión 05-mar-2019

											0
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---

Reglamentos nacionales

Componente	Alemania Clasificación de las Aguas (VwVwS)	Alemania - TA-Luft Class
Dióxido de titanio	nwg - nicht wassergefährdend (non-hazardous to waters)	

15.2. Evaluación de la seguridad química

Un Seguridad Química Evaluación / Informe (CSA / CSR) no se ha llevado a cabo

SECCIÓN 16: OTRA INFORMACIÓN

Texto completo de las indicaciones H mencionadas en las secciones 2 y 3

Leyenda

CAS - Chemical Abstracts Service

EINECS/ELINCS : Inventario europeo de sustancias químicas comercializadas existentes/Lista europea de sustancias químicas notificadas

PICCS - Inventario de productos químicos y sustancias químicas de Filipinas

IECSC - Inventario chino de sustancias químicas existentes

KECL - Sustancias químicas existentes y evaluadas de Corea

WEL - Límites de exposición profesionales

ACGIH - American Conference of Governmental Industrial Hygienists (Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales)

DNEL - Nivel obtenido sin efecto

RPE - Equipos de protección respiratoria

LC50 - Concentración letal 50%

NOEC - Concentración sin efecto observado

PBT - Persistentes, bioacumulativas, tóxicas

ADR - Acuerdo europeo sobre el transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera

IMO/IMDG - International Maritime Organization/International Maritime Dangerous Goods Code

OECD - Organización para la Cooperación y el Desarrollo

BCF - Factor de bioconcentración (FBC)

Bibliografía fundamental y fuentes de datos

Los proveedores de datos de seguridad,

ChemADVISOR - LOLI,

Merck Index,

RTECS

Consejo de formación

Formación de concienciación sobre peligros químicos, cubriendo etiquetado, fichas de datos de seguridad, equipos de protección personal e higiene.

Fecha de preparación

21-sep-2009

Fecha de revisión

05-mar-2019

TSCA - Ley de control de sustancias tóxicas (Toxic Substances Control Act) estadounidense, apartado 8(b), Inventario

DSL/NDSL - Lista de sustancias domésticas/no domésticas de Canadá

ENCS - Inventario japonés de sustancias químicas existentes y nuevas

AICS - Inventario australiano de sustancias químicas (Australian Inventory of Chemical Substances)

NZIoC - Inventario de productos químicos de Nueva Zelanda

TWA - Tiempo Promedio Ponderado

IARC - Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer

PNEC - Concentración prevista sin efecto

LD50 - Dosis Letal 50%

EC50 - Concentración efectiva 50%

POW - Coeficiente de reparto octanol: agua

vPvB - Muy persistente y muy bioacumulable

ICAO/IATA - International Civil Aviation Organization/International Air Transport Association

MARPOL - Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques

ATE - Estimación de la toxicidad aguda

VOC - Compuestos orgánicos volátiles

ACR38429

Página 10 / 11

Figura A.6.1 Ficha técnica y de seguridad del dióxido de titanio Degussa P25.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Titanium(IV) oxide

Fecha de revisión 05-mar-2019

Resumen de la revisión

No es aplicable.

La hoja técnica de seguridad cumple con los requisitos del Reglamento (CE) No. 1907/2006

Descargo de responsabilidad

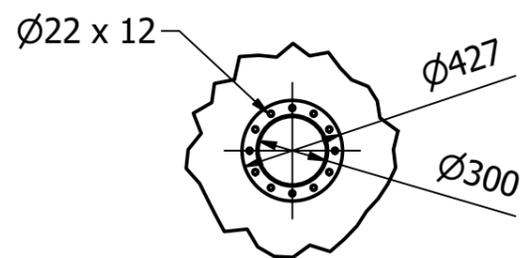
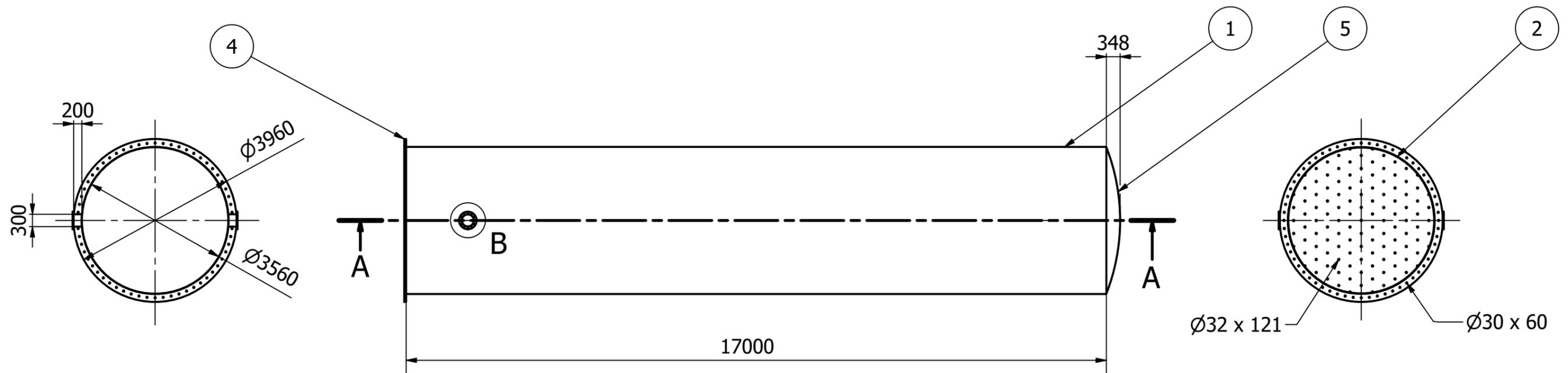
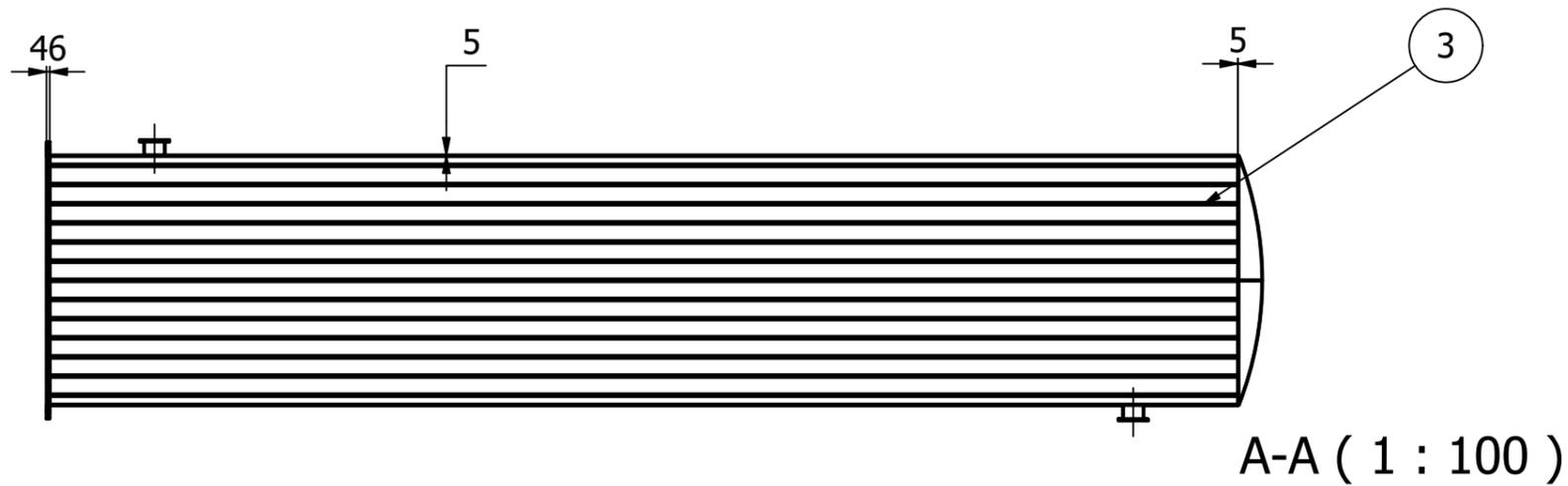
La información facilitada en esta Ficha de Datos de Seguridad es correcta, a nuestro leal saber y entender, en la fecha de su publicación. Dicha información está concebida únicamente como guía para la seguridad en la manipulación, el uso, el procesamiento, el almacenamiento, el transporte, la eliminación y la liberación, no debiendo tomarse como garantía o especificación de calidades. La información se refiere únicamente al material específico mencionado y puede no ser válida para tal material usado en combinación con cualesquiera otros materiales o en cualquier proceso salvo que se especifique expresamente en el texto

Fin de la ficha de datos de seguridad

4. PLANOS

ÍNDICE

1. REACTOR FOTOCATALÍTICO: CONJUNTO	2
--	----------



B (1 : 30)

5	Fondo bombeado	1	
4	Brida ciega	1	
3	Lámparas UV	121	L = 17000
2	Placa tubular	2	
1	Coraza	1	
ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	CTDAD	OBSERVACIONES

LISTA DE PIEZAS

Grado IQ	Escala 1 : 100	Reactor Fotocatalítico: Conjunto	Unid. dim. mm	Formato papel A3
		Autora: Carla Martínez Castillo	Fecha	Plano nº
		Tutor: Sergio Mestre Beltrán	Julio 2020	1

5. PLIEGO DE CONDICIONES

ÍNDICE

1. DISPOSICIONES GENERALES	3
1.1 OBJETO DEL PLIEGO DE CONDICIONES	3
1.2 CONTRATO DE OBRA.....	3
1.3 DOCUMENTACIÓN DEL CONTRATO DE OBRA	3
1.4 PROYECTO ARQUITECTÓNICO	4
1.5 REGLAMENTACIÓN URBANÍSTICA	5
1.6 FORMALIZACIÓN DEL CONTRATO DE OBRA	5
1.7 JURISDICCIÓN COMPETENTE	5
1.8 EJECUCIÓN DE LAS OBRAS Y RESPONSABILIDAD DEL CONTRATISTA	5
1.9 ACCIDENTES DE TRABAJO.....	6
1.10 DAÑOS Y PERJUICIOS A TERCEROS	6
1.11 COPIA DE DOCUMENTOS.....	7
1.12 CAUSAS DE RESCISIÓN DEL CONTRATO DE OBRA	7
1.13 EFECTOS DE RESCISIÓN DEL CONTRATO DE OBRA	8
2. DISPOSICIONES FACULTATIVAS	9
2.1 EL PROMOTOR.....	9
2.2 EL PROYECTISTA.....	10
2.3 EL CONSTRUCTOR O CONTRATISTA	11
2.4 EL DIRECTOR DE OBRA	13
2.5 EL DIRECTOR DE LA EJECUCIÓN DE LA OBRA	14
2.6 LOS SUMINISTRADORES DE PRODUCTOS	15
2.7 COORDINADOR DE SEGURIDAD Y SALUD.....	15
3. DISPOSICIONES ECONÓMICAS.....	17
3.1 CONTRATO DE OBRA.....	17
3.2 FIANZAS	18
3.2.1 EJECUCIÓN DE TRABAJOS CON CARGO A LA FIANZA	18
3.2.2 DEVOLUCIÓN DE LAS FIANZAS	18
3.2.3 DEVOLUCIÓN DE LA FIANZA EN EL CASO DE EFECTUARSE RECEPCIONES PARCIALES ..	19
3.3 PRECIOS	19
3.3.1 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM).....	19
3.3.2 RECLAMACIÓN DE AUMENTO DE PRECIOS	19
3.3.3 REVISIÓN DE LOS PRECIOS CONTRATADOS	20
3.3.4 ACOPIO DE MATERIALES.....	20
3.4 VALORACIÓN Y ABONO DE LOS TRABAJOS	20
3.4.1 FORMA Y PLAZOS DE ABONO DE LAS OBRAS	20

3.4.2 RELACIONES VALORADAS Y CERTIFICACIONES	21
3.5 INDEMNIZACIONES MUTUAS	21
3.5.1 INDEMNIZACIÓN POR RETRASO DEL PLAZO DE TERMINACIÓN DE LAS OBRAS	21
3.5.2 DEMORA DE LOS PAGOS POR PARTE DEL PROMOTOR	22
3.6 PLAZOS DE EJECUCIÓN: PLANNING DE OBRA	22
3.7 LIQUIDACIÓN ECONÓMICA DE LAS OBRAS	22
3.8 LIQUIDACIÓN FINAL DE LA OBRA	22
4. DISPOSICIONES LEGALES.....	23
4.1 RECONOCIMIENTO DE MARCAS REGISTRADAS	23
4.2 DERECHOS DE AUTOR.....	23
5. CONDICIONES TÉCNICAS PARTICULARES	24
5.1 ESPECIFICACIONES DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA	24
5.2 ESPECIFICACIONES DE LA INSTALACIÓN DE FONTANERÍA	24
5.3 INSTALACIÓN DE LA MAQUINARIA	25

1. DISPOSICIONES GENERALES

1.1 OBJETO DEL PLIEGO DE CONDICIONES

La finalidad de este Pliego es que se cumpla la ordenación de las condiciones facultativas, económicas y técnicas que han de regir en los concursos y contratos destinados a la ejecución de los trabajos de obra civil, siempre y cuando se mencione este pliego en cada uno de los particulares de la obra.

1.2 CONTRATO DE OBRA

En el caso del proyecto aquí presente no será necesaria la construcción de la cimentación de la nave industrial, ya que esta se encuentra ubicada y construida.

Los documentos que definen las obras y que la propiedad entrega al contratista, pueden tener carácter contractual o meramente informativo. Se entiende como documentos contractuales los Planos, Pliego de Condiciones, Cuadros de Precios y Presupuestos Parcial y Total, incluidos en el presente proyecto.

Los datos y las marcas comerciales incluidas en la Memoria y Anejos, así como la justificación de precios tienen carácter meramente informativo.

Cualquier cambio de planteamiento de la Obra que implique un cambio sustancial respecto al proyecto deberá ponerse en conocimiento de la Dirección Técnica para que lo apruebe, si procede, y redacte el oportuno proyecto reformado.

El Director de Obra ofrece la documentación necesaria para la realización del contrato de obra.

1.3 DOCUMENTACIÓN DEL CONTRATO DE OBRA

Integran el contrato de obra los siguientes documentos, relacionados por orden de prelación atendiendo al valor de sus especificaciones, en el caso de posibles interpretaciones, omisiones o contradicciones:

- ❖ Las condiciones fijadas en el propio documento de contrato de empresa o arrendamiento de obra.
- ❖ El presente Pliego de Condiciones.
- ❖ La documentación gráfica y escrita del Proyecto: planos generales y de detalle, memorias, anejos, mediciones y presupuestos.

En el caso de interpretación, prevalecen las especificaciones literales sobre las gráficas y las cotas sobre las medidas a escala tomadas de los planos.

1.4 PROYECTO ARQUITECTÓNICO

El Proyecto Arquitectónico es el conjunto de documentos que definen y determinan las exigencias técnicas, funcionales y estéticas de las obras contempladas en la “Ley 38/1999. Ley de Ordenación de la Edificación”. En él se justificará técnicamente las soluciones propuestas de acuerdo con las especificaciones requeridas por la normativa técnica aplicable.

Los documentos complementarios al proyecto serán:

- ❖ Los planos.
- ❖ El libro de Órdenes y Asistencias.
- ❖ El programa de Control de Calidad de Edificación y su Libro de Control.
- ❖ El Estudio de Seguridad y Salud o Estudio Básico de Seguridad y Salud en las obras.
- ❖ El Plan de Seguridad y Salud en el Trabajo, elaborado por cada contratista.
- ❖ Estudio de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición.
- ❖ Licencias y otras autorizaciones administrativas.

1.5 REGLAMENTACIÓN URBANÍSTICA

La obra a construir se ajustará a todas las limitaciones del proyecto aprobado por los organismos competentes, especialmente las que se refieren al volumen, alturas, emplazamiento y ocupación del solar, así como a todas las condiciones de reforma del proyecto que pueda exigir la Administración para ajustarlo a las Ordenanzas, a las Normas y al Planteamiento Vigente.

1.6 FORMALIZACIÓN DEL CONTRATO DE OBRA

Los contratos se formalizarán, en general, mediante documento privado, que podrá elevarse a escritura pública a petición de cualquiera de las partes.

El contratista, antes de la formalización del contrato de obra, dará también su conformidad con la firma al pie del Pliego de Condiciones, los Planos, Cuadro de Precios y Presupuesto General. Serán a cuenta del adjudicatario todos los gastos que ocasione la extensión del documento en que se consigne el contratista.

1.7 JURISDICCIÓN COMPETENTE

En el caso de no llegar a un acuerdo cuando surjan diferencias entre las partes implicadas, ambas quedan obligadas a someter la discusión de todas las cuestiones derivadas de su contrato a las Autoridades y Tribunales Administrativos con arreglo a la legislación vigente, renunciando al derecho común y al privilegio de su domicilio, siendo competente la jurisdicción de Castellón de la Plana.

1.8 EJECUCIÓN DE LAS OBRAS Y RESPONSABILIDAD DEL CONTRATISTA

Las obras se ejecutarán con estricta sujeción al proyecto que sirve de base al contrato y conforme a las instrucciones que la Dirección Facultativa de las obras diere al contratista.

El contratista es responsable de la ejecución de las obras y de todos los imprevistos que en la construcción puedan advertirse durante el desarrollo de las obras y hasta que se cumpla

el plazo de garantía, en las condiciones establecidas en el contrato y en los documentos que componen el Proyecto.

En consecuencia, quedará obligado a la demolición y reconstrucción de todas las unidades de obra con deficiencias o mal ejecutadas, sin que pueda servir de excusa el hecho de que la Dirección Facultativa haya examinado y reconocido la construcción durante sus visitas de obra, ni que hayan sido abonadas en liquidaciones parciales.

1.9 ACCIDENTES DE TRABAJO

Es de obligado cumplimiento el “Real Decreto 1627/1997. Disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las obras de construcción” y demás legislación vigente que, tanto directa como indirectamente, inciden sobre la planificación de la seguridad y salud en el trabajo de la construcción, conservación y mantenimiento de edificios.

1.10 DAÑOS Y PERJUICIOS A TERCEROS

El contratista será responsable de todos los accidentes que, por inexperiencia o descuido, sobrevinieran tanto en la edificación donde se efectúen las obras como en las colindantes o contiguas. Es por ello que el abono de las indemnizaciones a quien corresponda y cuando a ello hubiere lugar, y de todos los daños y perjuicios que puedan ocasionarse o causarse en las operaciones de la ejecución de las obras, es responsabilidad del contratista.

Asimismo, será responsable de los daños y perjuicios directos o indirectos que se puedan ocasionar frente a terceros como consecuencia de la obra, tanto en ella como en sus alrededores, incluso los que se produzcan por omisión o negligencia del personal a su cargo, así como los que se deriven de los subcontratistas e industriales que intervengan en la obra.

El contratista es responsable de mantener vigente durante la ejecución de los trabajos una póliza de seguros frente a terceros, en la modalidad de “Todo riesgo al derribo y la construcción”, suscrita por una compañía aseguradora con la suficiente solvencia para la cobertura de los trabajos contratados. Dicha póliza será aportada y ratificada por el

promotor, no pudiendo ser cancelada mientras no se firme el Acta de Recepción Provisional de la obra.

1.11 COPIA DE DOCUMENTOS

El contratista, a su costa, tiene derecho a sacar copias de los documentos integrantes del Proyecto.

1.12 CAUSAS DE RESCISIÓN DEL CONTRATO DE OBRA

Se considerarán causas suficientes de rescisión de contrato:

- ❖ La muerte o incapacitación del contratista.
- ❖ La quiebra del contratista.
- ❖ Las alteraciones del contrato por las causas siguientes:
 - a. La modificación del proyecto en forma tal que represente alteraciones fundamentales del mismo a juicio del director de obra y siempre que la variación del Presupuesto de Ejecución Material, como consecuencia de estas modificaciones, represente una desviación mayor del 20%.
 - b. Las modificaciones de unidades de obra, siempre que representen variaciones en más o en menos del 40% del proyecto original, o más de un 50% de unidades de obra del proyecto reformado.
- ❖ La suspensión de la obra comenzada, siempre que el plazo de suspensión haya excedido de un año y en todo caso, siempre que por causas ajenas al contratista no se da el comienzo a la obra adjudicada dentro del plazo de tres meses a partir de la adjudicación. En este caso, la devolución de la fianza será automática.
- ❖ La suspensión de la iniciación de las obras por plazo superior a cuatro meses.
- ❖ Que el contratista no comience los trabajos dentro del plazo señalado en el contrato.
- ❖ La demora injustificada en la comprobación del replanteo.

- ❖ La suspensión de las obras por plazo superior a ocho meses por parte del promotor.
- ❖ El incumplimiento de las condiciones del contrato cuando implique descuido o mala fe, con perjuicio de los intereses de las obras.
- ❖ El vencimiento del plazo de ejecución de la obra.
- ❖ El desistimiento o el abandono de la obra sin causas justificadas.

1.13 EFECTOS DE RESCISIÓN DEL CONTRATO DE OBRA

La resolución del contrato conlleva la comprobación, medición y liquidación de las obras realizadas con arreglo al proyecto, fijando los saldos pertinentes a favor o en contra del contratista.

Si se demorase injustificadamente la comprobación del replanteo, dando lugar a la resolución del contrato, el contratista sólo tendrá derecho por todos los conceptos a una indemnización equivalente al 2% del precio de la adjudicación, excluidos los impuestos.

En el supuesto de desistimiento antes de la iniciación de las obras, o de suspensión de la iniciación de las mismas por parte del promotor por plazo superior a cuatro meses, el contratista tendrá derecho a percibir por todos los conceptos una indemnización del 3% del precio de adjudicación, excluidos los impuestos.

Una vez iniciada la ejecución de las obras, o de suspensión de las obras iniciadas por plazo superior a ocho meses, el contratista tendrá derecho por todos los conceptos al 6% del precio de adjudicación del contrato de las obras dejadas de realizar en concepto de beneficio industrial, excluidos los impuestos.

2. DISPOSICIONES FACULTATIVAS

Las condiciones facultativas describen y regulan las relaciones entre la Contrata, la Propiedad y la Dirección Facultativa derivada de la ejecución técnica de las obras.

Las atribuciones de los distintos agentes intervinientes en la edificación son las reguladas por la “Ley 38/1999. Ley de Ordenación de la Edificación”.

A continuación, se describirá las funciones de cada uno de los agentes que intervienen en la edificación.

2.1 EL PROMOTOR

El promotor es la persona física o jurídica, pública o privada, que individual o colectivamente decide, impulsa, programa y financia con recursos propios o ajenos, las obras de edificación para sí o para su posterior enajenación, entrega o cesión a terceros bajo cualquier título.

Asume la iniciativa de todo el proceso de la edificación, impulsando la gestión necesaria para llevar a cabo la obra proyectada, y se hace cargo de todos los costes necesarios.

Según la legislación vigente, a la figura del promotor se equiparán también las de gestor de sociedades cooperativas, comunidades de propietarios, u otras análogas que asumen la gestión económica de la edificación.

Los promotores de este proyecto, al tratarse de un trabajo final de grado, son los entes físicos que han realizado la petición de la realización del mismo, por lo tanto, se puede establecer a la comisión académica del título como promotor del mismo.

Las obligaciones del promotor son las siguientes:

- ❖ Ostentar sobre la propiedad la titularidad de un permiso que le faculte para construir en él.

- ❖ Facilitar la documentación e información previa necesaria para la redacción del proyecto, así como autorizar al director de obra las posteriores modificaciones del mismo.
- ❖ Elegir y contratar a los distintos agentes, con la titulación y capacitación profesional necesaria, que garanticen el cumplimiento de las condiciones legalmente exigibles para realizar en su globalidad y realizar el objeto de lo promovido.
- ❖ Gestionar y obtener las preceptivas licencias y autorizaciones administrativas, así como suscribir el acta de recepción de la obra.
- ❖ Designar al coordinador de seguridad y salud para el proyecto y la ejecución de la obra.
- ❖ Suscribir los seguros previstos en la LOE, que cubra los daños materiales que ocasionen en el edificio el incumplimiento de las condiciones de habitabilidad en tres años o que afecten a la seguridad estructural en el plazo de diez años.
- ❖ Entregar al adquirente y usuario inicial, en su caso, la documentación de obra ejecutada, o cualquier otro documento exigible por las administraciones competentes.

2.2 EL PROYECTISTA

El proyectista es el agente que, por encargo del promotor y con sujeción a la normativa técnica y urbanística correspondiente, redacta el proyecto.

Las obligaciones del proyectista son las siguientes:

- ❖ Redactar el proyecto por encargo del promotor, con sujeción a la normativa urbanística y técnica en vigor y conteniendo la documentación necesaria para tramitar tanto la licencia de obras y demás permisos administrativos –proyecto básico- como para ser interpretada y poder ejecutar totalmente la obra, entregando al promotor las copias autorizadas correspondientes, debidamente visadas por su colegio profesional.

- ❖ Acordar con el promotor la contratación de colaboraciones parciales de otros técnicos profesionales.
- ❖ Ostentar la propiedad intelectual de su trabajo, tanto de la documentación escrita como de los cálculos de cualquier tipo, así como de los planos contenidos en la totalidad del proyecto y cualquiera de sus documentos complementarios.

2.3 EL CONSTRUCTOR O CONTRATISTA

El constructor es el agente que asume, contractualmente ante el promotor, el compromiso de ejecutar con medios humanos y materiales, propios o ajenos, las obras o parte de las mismas con sujeción al Proyecto y al Contrato de obra.

Entre las obligaciones del constructor se encuentran las que se citan a continuación:

- ❖ Ejecutar la obra con sujeción al proyecto, a la legislación aplicable y a las instrucciones del director de obra y del director de la ejecución de la obra, a fin de alcanzar la calidad exigida en el proyecto.
- ❖ Tener la titulación o capacitación profesional que habilita para el cumplimiento de las condiciones legalmente exigibles.
- ❖ Designar al jefe de obra que asumirá la representación técnica del constructor en la obra y que por su titulación o experiencia deberá tener la capacitación adecuada de acuerdo con las características y la complejidad de la obra.
- ❖ Asignar a la obra los medios humanos y materiales que su importancia requiera.
- ❖ Organizar los trabajos de construcción para cumplir con los plazos previstos, de acuerdo al correspondiente Plan de Obra, efectuando las instalaciones provisionales y disponiendo de los medios auxiliares necesarios.
- ❖ Elaborar el plan de seguridad y salud en el trabajo en el que se analicen, estudien y ejecuten las medidas preventivas, velando por su cumplimiento y por la observancia de la normativa vigente en materia de seguridad y salud en el trabajo.

- ❖ Atender las indicaciones y cumplir las instrucciones del coordinador en materia de seguridad y salud durante la ejecución de la obra, y en su caso de la dirección facultativa.
- ❖ Formalizar las subcontrataciones de determinadas partes o instalaciones de la obra dentro de los límites establecidos en el contrato.
- ❖ Firmar el acta de replanteo o de comienzo y el acta de recepción de la obra.
- ❖ Asegurar la idoneidad de todos y cada uno de los materiales utilizados y elementos constructivos, comprobando los preparados en obra y rechazando, por iniciativa propia o por prescripción del director, los suministros de material que no cuenten con las garantías, documentación mínima exigible o documentos de idoneidad requeridos por las normas de aplicación.
- ❖ Custodiar los libros de órdenes y seguimiento de la obra, así como los de seguridad y salud y el del control de calidad.
- ❖ Facilitar al director de la obra o arquitecto técnico con antelación suficiente, los datos necesarios para la elaboración de la documentación final de obra ejecutada.
- ❖ Preparar las certificaciones parciales de obra y la propuesta de liquidación final.
- ❖ Poner a disposición del director de ejecución material de la obra los medios auxiliares y personal necesario para efectuar las pruebas pertinentes para el Control de Calidad.
- ❖ Suscribir con el promotor las actas de recepción provisional y definitiva.
- ❖ Suscribir las garantías por daños que se señalan en la “Ley 38/1999. Ley de Ordenación de la Edificación” y que, en función de su naturaleza, alcanzan periodos de 1 año (daños por defectos de terminación o acabado de las obras), 3 años (daños por defectos o vicios de elementos constructivos o de instalaciones que afecten a la habitabilidad) o 10 años (daños en cimentación o estructura que comprometan directamente la resistencia mecánica y la estabilidad del edificio).

2.4 EL DIRECTOR DE OBRA

El director de obra es el agente que, formando parte de la dirección facultativa, dirige el desarrollo de la obra en los aspectos técnicos, estéticos, urbanísticos y medioambientales, de conformidad con el proyecto que la define, la licencia de edificación y demás autorizaciones preceptivas, y las condiciones del contrato, con el objeto de asegurar su adecuación al fin propuesto.

Las funciones del director de la obra, se muestran a continuación:

- ❖ Poseer la titulación académica y profesional habilitante de arquitecto, arquitecto técnico, ingeniero o ingeniero técnico, según corresponde, así como el cumplimiento de las condiciones exigibles para el ejercicio de la profesión.
- ❖ Verificar el replanteo y adecuación de la cimentación o estructura proyectada a las características del terreno.
- ❖ Dirigir la obra coordinándola con el Proyecto de Ejecución, facilitando la interpretación técnica, económica y estética a los agentes intervinientes en el proceso constructivo.
- ❖ Asistir a las obras, a fin de resolver las contingencias que se produzcan para asegurar la correcta interpretación y ejecución del proyecto, así como impartir las soluciones aclaratorias que fueran necesarias.
- ❖ Informar al promotor de las posibles modificaciones del proyecto, que vengan exigidas por razones técnicas o normativas.
- ❖ Coordinar la intervención en obra de otros técnicos.
- ❖ Dar conformidad a las certificaciones parciales de obra y la liquidación final.
- ❖ Firmar el acta de replanteo o de comienzo de obra y el certificado final de obra.
- ❖ Preparar con el contratista la documentación gráfica y escrita del proyecto ejecutado, incorporando las modificaciones efectuadas.

- ❖ Se adjuntará, el acta de recepción final; la relación identificativa de los agentes que han intervenido durante el proceso de edificación y las instrucciones de uso y mantenimiento del edificio y sus instalaciones.

2.5 EL DIRECTOR DE LA EJECUCIÓN DE LA OBRA

El director de la ejecución de la obra también conocido como el aparejador o arquitecto técnico, es el agente que, formando parte de la Dirección Facultativa, asume la función técnica de dirigir la Ejecución Material de la Obra y de controlar cualitativa y cuantitativamente la construcción y calidad de lo edificado. Para ello es requisito indispensable el estudio y análisis previo del proyecto de ejecución una vez redactado por el director de obra, procediendo a solicitarle, con antelación al inicio de las obras, todas aquellas aclaraciones, subsanaciones o documentos complementarios que, dentro de su competencia y atribuciones legales, estimare necesario para poder dirigir de manera solvéntela ejecución de las mismas.

Las funciones específicas, se detallan a continuación:

- ❖ Estar en posesión de la titulación académica y profesional habilitante y cumplir las condiciones exigibles para el ejercicio de la profesión.
- ❖ Redactar el documento de estudio y análisis del proyecto para elaborar los programas e organización y de desarrollo de obra.
- ❖ Elaborar y suscribir el proyecto de control de calidad de la edificación, desarrollando lo especificado en el proyecto de ejecución.
- ❖ Redactar el estudio de los sistemas adecuados a los riesgos del trabajo en la realización de la obra y aprobar el Estudio de Seguridad y Salud para la aplicación del mismo.
- ❖ Efectuar el replanteo de la obra y preparar el acta correspondiente.
- ❖ Comprobación de las instalaciones provisionales, medios auxiliares y medidas de seguridad y salud en el trabajo, controlando la correcta ejecución.

- ❖ Consignar en el libro de órdenes y asistencias las instrucciones precisas que considerara oportuno reseñar para la correcta ejecución material de las obras.
- ❖ Verificar la recepción a pie de obra, de todos los productos de construcción, ordenando la realización de ensayos y pruebas precisas.

2.6 LOS SUMINISTRADORES DE PRODUCTOS

Se consideran suministradores de productos los fabricantes, almacenistas, importadores o vendedores de productos de construcción. Son los encargados de realizar las entregas de los productos de acuerdo con las especificaciones del pedido, respondiendo de su origen, identidad y calidad, así como del cumplimiento de las exigencias que, en su caso, establezca la normativa técnica aplicable.

Asimismo, facilitan las instrucciones de uso y mantenimiento de los productos suministrados, así como las garantías de calidad correspondientes, para su inclusión en la documentación de la obra ejecutada.

2.7 COORDINADOR DE SEGURIDAD Y SALUD

El coordinador de seguridad y salud durante la ejecución de la obra deberá desarrollar las siguientes funciones:

- ❖ Coordinar la aplicación de los principios generales de prevención y de seguridad.
- ❖ Coordinar las actividades de la obra para garantizar que los contratistas, subcontratistas y los trabajadores autónomos utilicen de manera coherente y responsable los principios de la acción preventiva que se recogen en el artículo 15 de la Ley Preventiva.
- ❖ Aprobación del plan de seguridad y salud elaborado por el contratista.
- ❖ Coordinar las acciones y funciones de control de la aplicación correcta de los métodos de trabajo.
- ❖ Adoptar las medidas necesarias para que sólo las personas autorizadas puedan acceder a la obra.

- ❖ Justificar la capacidad suficiente de medios materiales y humanos necesarios para realizar adecuadamente los trabajos contratados, en su caso, a través de la correspondiente acreditación oficial otorgada por la Comunidad Valenciana.

3. DISPOSICIONES ECONÓMICAS

Las condiciones económicas fijan el marco de relaciones económicas para el abono y recepción de la obra. Puesto que el trabajo se ha realizado con carácter académico, no se tiene previsto el pago de ninguna cantidad económica; sin embargo, para la correcta realización de este apartado se supone que no es de carácter académico.

3.1 CONTRATO DE OBRA

Se aconseja que se firme el contrato de obra, entre el promotor y el contratista, antes de iniciarse las obras, evitando en lo posible la realización de la obra por administración. A la Dirección Facultativa (director de obra y director de ejecución de la obra) se le facilitará una copia del contrato de obra, para poder certificar en los términos pactados.

El contrato de obra deberá prever las posibles interpretaciones y discrepancias que pudieran surgir entre las partes, así como garantizar que la Dirección Facultativa pueda, de hecho, coordinar, dirigir y controlar la obra, por lo que es conveniente que se especifiquen y determinen con claridad, como mínimo, los siguientes puntos:

- ❖ Documentos a aportar por el contratista.
- ❖ Condiciones de ocupación del terreno e inicio de las obras.
- ❖ Determinación de los gastos de enganches y consumos.
- ❖ Responsabilidades y obligaciones del contratista: Legislación laboral.
- ❖ Responsabilidades y obligaciones del promotor.
- ❖ Presupuesto del contratista.
- ❖ Revisión de precios.
- ❖ Forma de pago: Certificaciones.
- ❖ Plazos de ejecución: Planning.
- ❖ Retraso de la obra: Penalizaciones.

- ❖ Recepción de la obra: Provisional y definitiva.
- ❖ Litigio entre las partes.

Todos los agentes que intervienen en el proceso de la construcción, definidos en la “Ley 38/1999. Ley de Ordenación de la Edificación”, tienen derecho a percibir puntualmente las cantidades devengadas por su correcta actuación con arreglo a las condiciones contractualmente establecidas, pudiendo exigirse recíprocamente las garantías suficientes para el cumplimiento diligente de sus obligaciones de pago.

3.2 FIANZAS

El contratista prestará una fianza con arreglo al procedimiento que se estipule en el contrato de obra.

3.2.1 EJECUCIÓN DE TRABAJOS CON CARGO A LA FIANZA

Si el contratista se negase a hacer por su cuenta los trabajos precisos para ultimar la obra en las condiciones contratadas, el director de obra, en nombre y representación del promotor, los ordenará ejecutar a un tercero, o podrá realizarlos directamente por administración, abonando su importe con la fianza depositada, sin perjuicio de las acciones a que tenga derecho el promotor, en el caso de que el importe de la fianza no bastase para cubrir el importe de los gastos efectuados en las unidades de obra que no fuesen de recibo.

3.2.2 DEVOLUCIÓN DE LAS FIANZAS

La fianza recibida será devuelta al contratista en un plazo establecido en el contrato de obra, una vez firmada el Acta de Recepción Definitiva de la obra. El promotor podrá exigir que el contratista le acredite la liquidación y finiquito de sus deudas causadas por la ejecución de la obra, tales como salarios, suministros y subcontratos.

3.2.3 DEVOLUCIÓN DE LA FIANZA EN EL CASO DE EFECTUARSE RECEPCIONES PARCIALES

Si el promotor, con la conformidad del director de obra, accediera a hacer recepciones parciales, tendrá derecho el contratista a que se le devuelva la parte proporcional de la fianza.

3.3 PRECIOS

El objetivo principal de la elaboración del presupuesto es anticipar el coste del proceso de construir la obra. Se descompondrá el presupuesto en unidades de obra, componente menor que se contrata y certifica por separado, y basándonos en esos precios, calcularemos el presupuesto.

3.3.1 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)

Es el resultado de la suma de los precios unitarios de las diferentes unidades de obra que la componen.

Se denomina Presupuesto de Ejecución Material al resultado obtenido por la suma de los productos del número de cada unidad de obra por su precio unitario y de las partidas alzadas. Es decir, el coste de la obra sin incluir los gastos generales, el beneficio industrial y el impuesto sobre el valor añadido.

3.3.2 RECLAMACIÓN DE AUMENTO DE PRECIOS

Si el contratista, antes de la firma del contrato de obra, no hubiese hecho la reclamación u observación oportuna, no podrá bajo ningún pretexto de error u omisión reclamar aumento de los precios fijados en el cuadro correspondiente del presupuesto que sirva de base para la ejecución de las obras.

3.3.3 REVISIÓN DE LOS PRECIOS CONTRATADOS

El presupuesto presentado por el contratista se entiende que es cerrado, por lo que no se aplicará revisión de precios.

Sólo se procederá a efectuar revisión de precios cuando haya quedado explícitamente determinado en el contrato de obra entre el promotor y el contratista.

3.3.4 ACOPIO DE MATERIALES

El contratista queda obligado a ejecutar los acopios de materiales o aparatos de obra que el promotor ordene por escrito. Los materiales acopiados, una vez abonados por el propietario, son de la exclusiva propiedad de éste, siendo el contratista responsable de su guarda y conservación.

3.4 VALORACIÓN Y ABONO DE LOS TRABAJOS

3.4.1 FORMA Y PLAZOS DE ABONO DE LAS OBRAS

Se realizará por certificaciones de obra y se recogerán las condiciones en el contrato de obra establecido entre las partes que intervienen (promotor y contratista) que, en definitiva, es el que tiene validez.

Los pagos se efectuarán por el promotor en los plazos previamente establecidos en el contrato de obra, y su importe corresponderá precisamente al de las certificaciones de la obra conformadas por el director de ejecución de la obra, en virtud de las cuáles se verifican aquéllos.

Para las obras o partes de obra que, por sus dimensiones y características, hayan de quedar posterior y definitivamente ocultas, el contratista está obligado a avisar al director de ejecución de la obra con la suficiente antelación, a fin de que éste pueda realizar las correspondientes mediciones y toma de datos, levantando los planos que las definan, cuya conformidad suscribirá el contratista.

A falta de aviso anticipado, cuya existencia corresponde probar al contratista, queda este obligado a aceptar las decisiones del promotor sobre el particular.

3.4.2 RELACIONES VALORADAS Y CERTIFICACIONES

En los plazos fijados en el contrato de obra entre el promotor y el contratista, éste último formulará una relación valorada de las obras ejecutadas durante las fechas previstas, según la medición practicada por el Director de Ejecución de la Obra.

Las certificaciones de obra serán el resultado de aplicar, a la cantidad de obra realmente ejecutada, los precios contratados de las unidades de obra. Sin embargo, los excesos de obra realizada en unidades, tales como excavaciones y hormigones, que sean imputables al contratista, no serán objeto de certificación alguna.

Los pagos se efectuarán por el promotor en los plazos previamente establecidos, y su importe corresponderá al de las certificaciones de obra, conformadas por la Dirección Facultativa. Tendrán el carácter de documento y entregas a buena cuenta, sujetas a las rectificaciones y variaciones que se deriven de la Liquidación Final, no suponiendo tampoco dichas certificaciones parciales la aceptación, la aprobación, ni la recepción de las obras que comprenden.

Las relaciones valoradas contendrán solamente la obra ejecutada en el plazo a que la valoración se refiere. Si la Dirección Facultativa lo exigiera, las certificaciones se extenderán a origen.

3.5 INDEMNIZACIONES MUTUAS

3.5.1 INDEMNIZACIÓN POR RETRASO DEL PLAZO DE TERMINACIÓN DE LAS OBRAS

Si, por causas imputables al contratista, las obras sufrieran un retraso en su finalización con relación al plazo de ejecución previsto, el promotor podrá imponer al contratista, con cargo a la última certificación, las penalizaciones establecidas en el contrato, que nunca serán inferiores al perjuicio que pudiera causar el retraso de la obra.

3.5.2 DEMORA DE LOS PAGOS POR PARTE DEL PROMOTOR

Se regulará en el contrato de obra las condiciones a cumplir por parte de ambos.

3.6 PLAZOS DE EJECUCIÓN: PLANNING DE OBRA

En el contrato de obra deberán figurar los plazos de ejecución y entregas, tanto totales como parciales. Además, será conveniente adjuntar al respectivo contrato un Planning de la ejecución de la obra donde figuren de forma gráfica y detallada la duración de las distintas partidas de obra que deberán conformar las partes contratantes.

3.7 LIQUIDACIÓN ECONÓMICA DE LAS OBRAS

Simultáneamente al libramiento de la última certificación, se procederá al otorgamiento del Acta de Liquidación Económica de las obras, que deberán firmar el promotor y el contratista. En este acto se dará por terminada la obra y se entregarán, en su caso, las llaves, los correspondientes boletines debidamente cumplimentados de acuerdo a la Normativa Vigente, así como los Proyectos Técnicos y permisos de las instalaciones contratadas.

Dicha Acta de Liquidación Económica servirá de Acta de Recepción Provisional de las obras, para lo cual será conformada por el promotor, el contratista, el director de obra y el director de ejecución de la obra, quedando desde dicho momento la conservación y custodia de las mismas a cargo del promotor.

La citada recepción de las obras, provisional y definitiva, queda regulada según se describe en las Disposiciones Generales del presente Pliego.

3.8 LIQUIDACIÓN FINAL DE LA OBRA

Entre el promotor y contratista, la liquidación de la obra deberá hacerse de acuerdo con las certificaciones conformadas por la Dirección de Obra. Si la liquidación se realizara sin el visto bueno de la Dirección de Obra, ésta sólo mediará, en caso de desavenencia o desacuerdo, en el recurso ante los Tribunales.

4. DISPOSICIONES LEGALES

4.1 RECONOCIMIENTO DE MARCAS REGISTRADAS

La autora de este proyecto, así como su promotor, reconocen las marcas registradas que han aparecido a lo largo del desarrollo y ejecución, además de los derechos de autor recogidos en la bibliografía consultada y citada en el mismo.

4.2 DERECHOS DE AUTOR

Respecto a los derechos de autor, serán los estipulados por la legislación y reglamentación vigente en el momento del comienzo del proyecto, a excepción de posibles correcciones legales resultantes de los recursos legales que se hayan interpuesto contra las mencionadas leyes y reglamentos.

5. CONDICIONES TÉCNICAS PARTICULARES

El objeto del presente documento es reflejar los requisitos técnicos básicos para realizar la puesta en marcha de un reactor fotocatalítico para la degradación de contaminantes emergentes.

5.1 ESPECIFICACIONES DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA

Las instalaciones eléctricas serán ejecutadas por una empresa especializada, cumpliendo todos los requisitos que establece la legislación vigente. Por otro lado, la documentación acreditativa será presentada por el director de obra para que pueda emitir la oportuna autorización de comienzo de los trabajos.

El personal que intervenga en la ejecución de cualquier instalación eléctrica, aunque sea accesoria, deberá estar en posesión de los oportunos certificados de calificación profesional.

Será condición necesaria para que la dirección autorice su intervención en los trabajos, la entrega de una copia, autenticada por la empresa especializada, de los certificados mencionados, así como la justificación de estar de alta en el Libro de Matrícula.

Antes de iniciar la obra, el Contratista presentará unos planos de detalle que indiquen preferentemente una situación real de los recorridos de canalizaciones y conductores. Al finalizar la obra, presentará los mismos planos corregidos en la forma como se hizo.

5.2 ESPECIFICACIONES DE LA INSTALACIÓN DE FONTANERÍA

Las tuberías serán del tipo, diámetro y presión de servicio que se indican en las Mediciones y Presupuestos de este proyecto y cumplirán las especificaciones contenidas en dichos documentos.

Las piezas especiales, serán capaces de soportar presiones de prueba y trabajo iguales a las tuberías en que hayan de instalarse. El cuerpo principal de estos elementos será el material que garantice el fabricante de reconocida solvencia nacional, previa aprobación del director

de obra, quien también ha de autorizar los modelos a utilizar. En todo caso, el acabado de las piezas especiales, será perfecto y de amplio funcionamiento, durabilidad y resistencia. Deberán acreditarse mediante los oportunos certificados oficiales.

La superficie interior de cualquier elemento será lisa, no pudiendo admitirse otros defectos de regularidad que los de carácter accidental o local que queden dentro de las tolerancias prescritas y que no representen ninguna merma de la calidad de circulación de agua. La reparación de tales defectos no podrá realizarse sin la previa autorización del director de la obra.

5.3 INSTALACIÓN DE LA MAQUINARIA

Todas las partes de la maquinaria que deben estar en contacto con la materia prima, serán de material inalterable, con la superficie lisa y fácil de limpiar. De la misma manera, el exterior de la maquinaria deberá estar esmaltado o cubierto de materia inalterable y sin ángulos entrantes que impidan una limpieza perfecta.

En el caso de tener partes móviles deberán estar provistos de los debidos dispositivos de protección para el manejo del operador. Si en condiciones de trabajo normales una máquina, con fuerza de acondicionamiento suficiente y manejada de acuerdo con las instrucciones, no diera el rendimiento garantizado, se comunicará a la casa vendedora para que comunique las deficiencias y haga las modificaciones oportunas. Si en el plazo de un mes, estas deficiencias no fueran subsanadas, la casa se hará cargo de la maquinaria, puesta, embalada en la estación más próxima a la residencia del cliente, devolviendo el mismo importe que haya pagado, o suministrándole a elección de éste, en sustitución de la maquinaria retirada, otra de rendimiento correcto.

Serán de cuenta de la casa suministradora el transporte, embalaje, derechos e aduanas, riesgos, seguros e impuestos hasta que la maquinaria se encuentre en el lugar de su emplazamiento. El montaje será por cuenta de la casa vendedora, si bien el promotor proporcionará las escaleras, instalación eléctrica, herramienta gruesa y material de albañilería, carpintería y cerrajería necesaria para el montaje, así como personal auxiliar para ayudar al especializado que enviará la empresa suministradora.

El plazo que para la entrega de maquinaria pacte el promotor con el vendedor de la misma, no podrá ser ampliado más que por causa de fuerza mayor, como huelgas, lock-out, movilización del ejército, guerra o revolución. Si el retraso es imputable a la casa vendedora, el promotor tendrá derecho a un 1% de rebaja en el precio por cada semana de retraso como compensación por los perjuicios ocasionados.

Será por cuenta de la entidad vendedora suministrar los aparatos y útiles precisos para ejecutar las pruebas de las máquinas y verificar las comprobaciones necesarias, siendo de su cuenta los gastos que originen éstas.

En cada máquina o grupo de máquinas, se establecerá una fecha de prueba con el objeto de poder efectuar la recepción provisional, para el plazo mínimo de garantía de un año, en el cual su funcionamiento ha de ser perfecto, comprometiéndose la empresa suministradora a reponer por su cuenta las piezas que aparezcan deterioradas a causa de una defectuosa construcción o instalación y a subsanar por su cuenta las anomalías o irregularidades de funcionamiento que impidan su uso normal.

6. ESTADO DE MEDICIONES

ÍNDICE

1. ESTADO DE MEDICIONES.....	3
-------------------------------------	----------

1. ESTADO DE MEDICIONES

El Estado de Mediciones constituye uno de los documentos básicos del proyecto. Su finalidad es definir y determinar de manera detallada, las unidades de cada partida o unidad de obra que constituyen la totalidad del objeto del presupuesto.

En este documento se incluye el número de unidades y se definen las características, modelos y dimensiones de cada partida de obra. Por lo que este documento servirá como punto de partida para la elaboración del presupuesto del proyecto. La unidad de obra se concibe como cada una de las distintas partes en las que puede dividirse y medirse un proyecto.

El presente proyecto está compuesto por una partida, los materiales. En la *Tabla E.1.1* se muestra el estado de mediciones de los materiales necesarios para la construcción del reactor.

Tabla E.1.1 Estado de mediciones de los materiales.

ELEMENTO	UNIDAD	CANTIDAD
Lámparas UV	Ud.	121
Coraza	Ud.	1
Placa tubular	Ud.	2
Fondo bombeado	Ud.	1
Sistema de sellado	Ud.	242
Tubos termorretráctiles	Ud.	1
Cuadro eléctrico	Ud.	1
Brida ciega DIN 2527 PN 10/16	Ud.	1
Reposición lámparas UV	Ud.	605
Conexión de entrada	Ud.	1
Conexión de salida	Ud.	1

7. PRESUPUESTO

ÍNDICE

1. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DE MATERIAL (PEM).....	3
1.1 MATERIALES	3
1.2 MANO DE OBRA	4
1.3 PEM TOTAL	5
2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA (PEC).....	6
3. PRESUPUESTO TOTAL.....	7

1. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DE MATERIAL (PEM)

El Presupuesto de Ejecución de Material corresponde al coste de los materiales y de la mano de obra, necesarios para la realización del proyecto.

En los subapartados consiguientes se exponen detalladamente cada una de las partidas presupuestarias que lo componen.

1.1 MATERIALES

La primera partida presupuestaria está formada por los materiales que constituyen el reactor fotocatalítico. Se debe tener en cuenta que el precio del material se considera proyecto llave en mano, por lo tanto en su precio se incluye: la fabricación, la manipulación, el embalaje, descuentos por número de unidades, transporte, descarga, instalación y puesta en funcionamiento.

En la *Tabla P.1.1* se especifican los materiales empleados.

Tabla P.1.1 Presupuesto de los materiales empleados.

ELEMENTO	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (€/Ud)	PRECIO (€)
Lámparas UV	Ud.	121	2.680,00	324.280,00
Coraza	Ud.	1	60.233,00	60.233,00
Placa tubular	Ud.	2	1.347,01	2.694,02
Fondo bombeado	Ud.	1	1.541,63	1.541,63
Cuadro eléctrico	Ud.	1	10.000,00	10.000,00
Sistema de sellado	Ud.	242	7,36	1.781,12
Tubos termorretráctiles	Ud.	1	80,00	80,00
Brida ciega DIN 2527 PN 10/16	Ud.	1	1.449,16	1.449,16
Reposición lámparas UV	Ud.	605	2.680,00	1.621.400,00
Conexión de entrada	Ud.	1	113,30	113,30
Conexión de salida	Ud.	1	113,30	113,30
TOTAL				2.023.685,53

1.2 MANO DE OBRA

Los costes de la mano de obra, según el Colegio de Ingenieros Industriales de la Comunidad Valenciana, son un 15% del precio total de los equipos principales. En esta partida se incluyen los honorarios del proyectista.

Por tanto, los costes proporcionales a la mano de obra se recogen en la *Tabla P.1.2*.

Tabla P.1.2 Presupuesto de la mano de obra.

	PROPORCIÓN	PRECIO TOTAL EQUIPOS (€)	PRECIO (€)
Mano de obra	% 15	2.023.685,53	303.552,83

1.3. PEM TOTAL

Una vez conocido el presupuesto de las partidas anteriormente descritas, se procede a detallar el Presupuesto de Ejecución de Material total, el cual se define como el sumatorio de las dos partidas presupuestarias que componen el Presupuesto de Ejecución de Material.

En la *Tabla P.1.3* se muestra el coste total del PEM.

Tabla P.1.3 Presupuesto de Ejecución de Material total.

PARTIDA PRESUPUESTARIA	PRECIO (€)
Materiales	2.023.685,53
Mano de obra	303.552,83
TOTAL	2.327.238,36

2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA (PEC)

El presupuesto de ejecución por contrata es el importe que cobra al contratista de modo que al valor de materiales y mano de obra (PEM), se le añade la parte proporcional de sus gastos generales y del beneficio económico o beneficio industrial a obtener de la obra.

Los porcentajes aplicados para cada uno de estos conceptos, al no estar fijados por ninguna normativa, se pueden determinar a partir de los valores habituales empleados en la contratación de obras oficiales, que son el 13% del PEM en concepto de gastos generales y el 6% del PEM en concepto de beneficio industrial.

En los gastos generales se incluyen los costes derivados de seguimiento y control, licencias, seguridad y salud.

El Presupuesto de Ejecución por Contrata se calcula por la suma de estos conceptos del modo que se recoge en la *Tabla P.1.4*.

Tabla P.1.4 Presupuesto de Ejecución por Contrata.

	COSTE (€)
PEM	2.327.238,36
Gastos generales	302.540,99
Beneficio industrial	139.634,30
TOTAL	2.769.413,65

3. PRESUPUESTO TOTAL

El Presupuesto Total es el importe a desembolsar, tras aplicar el 21% de IVA al Presupuesto de Ejecución por Contrata. Este coste corresponde a la inversión inicial y se muestra en la *Tabla P.1.5*.

Tabla P.1.5 Presupuesto total.

	COSTE (€)
PEC	2.769.413,65
IVA (21%)	581.576,87
TOTAL	3.350.990,52

El presupuesto total del proyecto “Diseño de un reactor fotocatalítico para la degradación de contaminantes emergentes presentes en el efluente de una Estación Depuradora de Aguas Residuales” asciende a TRES MILLONES TRESCIENTOS CINCUENTA MIL NOVECIENTOS NOVENTA EUROS CON CINCUENTA Y DOS CÉNTIMOS.