



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE PURIFICADOR DE AIRE EN BASE A OXIDACIÓN FOTOCATALÍTICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

JUAN IGNACIO ANDAI CASTILLA

PROFESOR GUÍA:
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MÓNICA ZAMORA ZAPATA
REYNALDO CABEZAS CIFUENTES

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
Bluetek Global

SANTIAGO DE CHILE
2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: **JUAN IGNACIO ANDAI CASTILLA**
FECHA: 2023
PROF. GUÍA: RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE PURIFICADOR DE AIRE EN BASE A OXIDACIÓN FOTOCATALÍTICA

La calidad del aire en espacios interiores tiene un impacto importante en la salud humana. Considerando la gran cantidad de tiempo que pasan las personas en espacios de este tipo, el estudio y la comprensión de distintas tecnologías para la purificación y limpieza del aire se vuelve indispensable para continuar avanzando hacia espacios mas limpios.

Una tecnología para la purificación corresponde a la oxidación fotocatalítica, basada en la difusión de partículas hacia la superficie de un material catalizador, lo que facilita que ocurran reacciones de óxido-reducción que resultan en la degradación de diversos contaminantes del aire.

En el presente trabajo se aborda el diseño y evaluación experimental de un prototipo de purificador de aire basado en oxidación fotocatalítica, con la finalidad de estudiar la tecnología, analizar el comportamiento de la misma y poder concluir acerca de la factibilidad de construcción de un dispositivo de bajo costo, bajo el marco comparativo entre el prototipo y sistemas comerciales y académicos estudiados durante la realización del trabajo.

Para lograr lo anterior, se levantaron requerimientos de diseño para un purificador de aire, luego se diseñó y construyó el prototipo. Se finalizó el trabajo con la etapa de evaluación experimental, diseñada bajo el método de experimentación robusta de Taguchi y para la cual se construyó un banco de pruebas, al que se le acopló un sistema de adquisición de datos. La evaluación se realizó utilizando etanol como contaminante objetivo.

El objetivo general del trabajo fue alcanzado con éxito, ya que se diseñó y evaluó un prototipo de purificador de aire basado en oxidación fotocatalítica. Los objetivos específicos también se lograron ya que se levantaron requerimientos de diseño, se integraron los componentes necesarios y se estudió la reducción de compuestos orgánicos volátiles totales provocada por el sistema.

Se concluyó que, para los flujos investigados, la tecnología no representa un aporte real si se cuenta con la opción de ventilar el espacio que se está tratando. A pesar de esto, se lograron determinar los factores determinantes que afectan a la eficiencia de uno de estos purificadores, resultando de mayor importancia la radiación incidente, seguida de la cantidad de soportes para el catalizador.

Finalmente, el trabajo permitió entregar lineamientos generales y proyecciones para futuros trabajos relacionados a la tecnología estudiada.

*Al final,
todo va a estar bien.*
Mi Papá y yo

Dedicado a mi Laurita. Pienso en ti todos los días.

Agradecimientos

Después de tantos años, llegó el momento de terminar esta etapa de mi vida, por lejos los mejores años que he vivido. Llevo postergando mucho tiempo la escritura de esta página. Es difícil resumir en tan pocas palabras todo lo vivido estos años y agradecer todo lo que me ha pasado y he crecido.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia. A mi Mamá, por hacer de mi vida una gran vida, por estar para mí siempre, por apoyarme, ayudarme y ser tan fuerte siempre. A mi Papá, por estar siempre para mí, hacerme reír, compartir conmigo la pasión por aprender, su apoyo, consejos e incondicional amor. A mi hermana, por ser la mejor hermana que alguien podría tener, por enseñarme tanto con su forma de ser y por todo su amor. A mi hermano, por todo lo vivido en los años que compartimos pieza, por aguantarme, enseñarme y por todo su amor. Finalmente, a mis abuelos, paternos y maternos, son una parte fundamental de mi vida y siempre los admiraré y aprenderé de ustedes.

A mi compañera en todo este proceso, Cami. Gracias por transitar conmigo este camino, por apoyarme en los momentos difíciles, guiarme cuando era necesario y estar todos los días para mí. Sin ti, esto, y todo, hubiera sido imposible. Gracias por enseñarme a confiar en mí mismo. Agradezco también a tu familia, por hacerme sentir como uno más desde el día uno.

No puedo olvidar en estos agradecimientos a tantos grandes amigos que hice en la Universidad. Los que estuvieron desde el día uno y los que aparecieron en el camino. Hicieron de todo esto una alegría constante. También agradecer a mi amigo de la vida, Ramiro, por compartir junto a mí los altos y bajos de estudiar ingeniería.

Agradezco a la Universidad de Chile, por ser mi segunda casa todo estos años. A los profesores que compartieron su conocimiento conmigo y en especial al profesor Rubén, por ayudarme en este proceso.

Finalmente, agradezco al equipo de Bluetek, por su apoyo durante este trabajo y el año que me aceptaron como uno más de su equipo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivo General	2
1.3. Objetivos Específicos	2
1.4. Alcances	2
2. Antecedentes	3
2.1. Desinfección inducida por radiación ultravioleta	3
2.1.1. Lámparas Ultravioletas	4
2.2. Compuestos orgánicos volátiles	5
2.2.1. Medición	6
2.3. Oxidación Fotocatalítica	6
2.3.1. Mecanismos fotocatalíticos de óxido-reducción	8
2.3.1.1. Degradación de compuestos orgánicos	8
2.3.2. Sistemas de purificación en base a oxidación fotocatalítica	9
2.3.3. Sistemas comerciales	10
2.3.4. Sistemas académicos	10
3. Metodología	16
3.1. Antecedentes de estudio	16
3.2. Diseño	17
3.3. Experimentación	17
3.3.1. Criterios de evaluación	17
4. Requerimientos de Diseño	19
4.1. Requerimientos Básicos	19
4.1.1. Catalizador	19
4.1.2. Fuente de Radiación	20
4.2. Requerimientos Específicos	20
4.2.1. Contaminantes Objetivo	20
4.2.2. Estructura de soporte para el catalizador	21
4.2.3. Flujos y tiempos de residencia	22
4.2.4. Distancia entre fuente de radiación y catalizador	22
4.3. Requerimientos Electrónicos	22
4.4. Requerimientos Adicionales	23
4.5. Resumen de requerimientos	23
5. Diseño del Equipo	24

5.1.	Componentes mecánicos	24
5.1.1.	Caja acrílica para montaje	24
5.1.2.	Ventilador	25
5.1.3.	Filtro fotocatalítico	26
5.1.4.	Lámparas UV	28
5.1.5.	Montajes	29
5.2.	Componentes electrónicos	29
5.2.1.	Ballast electrónico	29
5.2.2.	Caja de conexiones	30
5.3.	Prototipo	31
5.4.	Costos	33
6.	Experimentación	34
6.1.	Diseño del Experimento	34
6.1.1.	Método de Taguchi	34
6.1.2.	Configuración experimental	36
6.1.2.1.	Circuito de recirculación	37
6.1.2.2.	Ventilador axial	38
6.1.2.3.	Inyección de contaminantes	39
6.1.2.4.	Sistema de adquisición de datos (DAS)	40
6.2.	Experimentación	45
6.3.	Análisis de Resultados	49
6.3.1.	General	49
6.3.2.	Taguchi	53
7.	Conclusiones	55
	Bibliografía	57
	Anexos	60
	Anexo A. Memoria de Cálculo	60
	Anexo B. Planos	62
	Anexo C. Código sensor ultravioleta	67
	Anexo D. Esquemático	68
	Anexo E. Desglose de costos	69
	Anexo F. Imágenes SEM	70

Índice de Tablas

2.1.	Clases de VOCs y sus posibles fuentes de emisión. Fuente: [23].	5
2.2.	Concentración típica de compuestos orgánicos en espacios interiores. Fuente: [23].	6
4.1.	Resumen de requerimientos	23
5.1.	Características principales caja estanca	25
5.2.	Características principales del ventilador axial <i>PBF0812UHE</i> . Adaptación a partir de datos obtenidos en [25].	25
5.3.	Características principales del filtro fotocatalítico.	26
5.4.	Resultados cuantitativos de peso y concentración atómica para la zona recubierta con TiO_2	27
5.5.	Resultados cuantitativos de peso y concentración atómica para la malla de soporte	28
5.6.	Características principales de la lámpara UVC.	28
6.1.	Arreglo ortogonal L_9 para la experimentación.	35
6.2.	Niveles de flujo para la experimentación.	38
6.3.	Características atomizador.	39
6.4.	Características principales sensor SEN54x.	41
6.5.	Características sensor GUVA-S12SD. Fuente: [32]	42
6.6.	Niveles de contaminante según índice de TVOC. Fuente: elaboración propia con datos de Bluetek Global.	46
6.7.	Resultados Experimentales.	49
6.8.	Influencia de factores en la respuesta del sistema	53
A.1.	Datos utilizados para calcular las tasas de decaimiento.	60
A.2.	Eficiencias de cada configuración.	61

Índice de Ilustraciones

2.1.	Espectro de radiaciones ópticas. Fuente: [5]	3
2.2.	Espectro Ultravioleta. Fuente: [6]	4
2.3.	Esquema básico de una lámpara UV. Fuente: [7]	4
2.4.	Diagrama esquemático de la fotocatalisis: (a) excitación electrónica debido a radiación (CB = banda de conducción, VB = banda de valencia), (b) recombinación electrón-hueco, (c) recombinación electrón-hueco superficial, (d) reacción de un hueco con un electrón donante (D) absorbido en la superficie de grano. (e) reacción entre un electrón y un electrón aceptor (A) absorbido en la superficie de grano. (f) excitación electrónica debido a radiación en la superficie de grano y recombinación localizada. Fuente: [10].	7
2.5.	Mecanismos de degradación de contaminantes mediante oxidación fotocatalítica. Fuente: [10]	9
2.6.	Esquema básico de un purificador en base a PCO. Fuente: [14]	9
2.7.	Características sistemas comerciales estudiados. Fuentes: [15], [16], [17] y [18].	10
2.8.	Configuración Experimental. Fuente: [19]	11
2.9.	Distintos arreglos utilizados. Fuente: [19]	11
2.10.	Resultados Experimentales. Fuente: [21]	13
2.11.	Dispositivo desarrollado. Fuente: [21]	14
2.12.	Configuración experimental. Fuente: [22]	14
2.13.	Filtro tipo plisado.	15
3.1.	Metodología del trabajo de título	16
4.1.	Espectro de absorción del Dióxido de Titanio. Fuente: [10]	20
4.2.	Tipos de reactores fotocatalíticos. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de [10]	21
5.1.	Diseño general del prototipo	24
5.2.	Ventilador axial <i>PBF0812UHE</i>	26
5.3.	Filtro fotocatalítico	26
5.4.	Imagen SEM para el análisis químico del recubrimiento del soporte	27
5.5.	Imagen SEM para el análisis químico de la malla del soporte	28
5.6.	Especificaciones espectrales de la lámpara UVC OSRAM HNS L 18W. Adaptación a partir de datos obtenidos en [26].	29
5.7.	Ensamble de la base 2G11 y el montaje para la caja acrílica.	29
5.8.	Ballast electrónico QT-ECO 1X18S. Fuente: [29].	30
5.9.	Conexión entre el ballast y la lámpara UV.	30
5.10.	Esquemáticos de conexión. Fuente: Bluetek Global.	31
5.11.	Caja de conexiones	31
5.12.	Prototipo fabricado.	32
6.1.	Pasos del método Taguchi.	35

6.2.	Esquemático de la configuración experimental	36
6.3.	Configuración experimental	36
6.4.	Medidas circuito de recirculación.	37
6.5.	Reducción para acople.	38
6.6.	Atomizador utilizado. Fuente: [30].	39
6.7.	Configuración para el subsistema de inyección (izquierda), sistema de inyección (arriba) y montaje en el circuito de aire (abajo).	40
6.8.	Sensor medioambiental SEN54x.	40
6.9.	Correlación entre el índice de TVOC y la concentración de etanol. Fuente: [31].	41
6.10.	Responsividad sensor GUVA-S12SD. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de [32].	43
6.11.	Sensor GUVA-S12SD	43
6.12.	Conexión GUVA-S12SD a Arduino UNO.	44
6.13.	Curva de fotocorriente vs. irradiación para el sensor GUVA-S12SD. Fuente: [33].	45
6.14.	Concentración en el tiempo para el caso de decantación natural.	46
6.15.	Concentración en el tiempo para los experimentos 1 y 2.	47
6.16.	Concentración en el tiempo para los experimentos 3 y 4.	47
6.17.	Concentración en el tiempo para los experimentos 5 y 6.	47
6.18.	Concentración en el tiempo para los experimentos 7 y 8.	48
6.19.	Concentración en el tiempo para el experimento 9.	48
6.20.	Comportamiento ideal de la fotoactividad frente a la humedad relativa. Fuente: [34]	52
6.21.	CADR frente a humedad relativa para casos fotocatalíticos.	53
6.22.	Efectos principales para relaciones S/N	54
B.1.	Plano caja acrílica y disposición accesorios.	63
B.2.	Plano accesorios caja de montaje.	64
B.3.	Plano reducción para acople.	65
B.4.	Plano sistema inyección contaminantes. Detalle anclaje y atomizador.	66
D.1.	Esquemático general del sistema.	68
E.1.	Desglose de costos	69
F.1.	Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) del soporte del catalizador	71

Capítulo 1

Introducción

Actualmente, las personas pasan más del 90 % de su tiempo en espacios interiores [1]. Si a lo anterior, le agregamos que la contaminación del aire en dichos espacios es 2 a 5 veces la contaminación del aire exterior [2], la calidad del aire puede tener un impacto significativo en la salud, el confort y la productividad humana.

Es tanto el impacto que puede tener la calidad del aire interior en las personas, que la Organización Mundial de la Salud estima que, cada año, 3,2 millones de personas mueren prematuramente por enfermedades atribuibles a la contaminación del aire doméstico [3].

Una forma de enfrentar esta problemática corresponde a encontrar métodos y tecnologías capaces de limpiar y purificar el aire contaminado. Dentro de estas tecnologías, se encuentra la oxidación fotocatalítica. Dicha tecnología corresponde a una reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador, que al absorber la energía de una fuente de radiación incidente en él, es capaz de promover sus electrones desde la banda de valencia hasta la banda de conducción, los que a su vez serán capaces de alcanzar la superficie del material y reaccionar con contaminantes del medio, degradándolos en componentes no nocivos para el humano, mediante reacciones de óxido - reducción.

En el presente informe se detalla el trabajo de diseñar, integrar y evaluar experimentalmente un prototipo de purificador de aire en base a la tecnología mencionada.

1.1. Motivación

Dentro de las formas de enfrentar la problemática de la contaminación del aire interior, podemos reconocer tres principales estrategias: ventilación, control de la fuente de emisión y tratamiento y purificación.

A pesar de que la primera de estas estrategias representa una opción sencilla, muchas veces puede resultar contraproducente, pues al ventilar se permite el ingreso de nuevos contaminantes al espacio que se quiere tratar. En segundo lugar, en cuanto al control de la fuente, la cantidad de contaminantes en el aire puede ascender a cifras entre los cientos y miles, por lo que reconocer la fuente de emisión de cada uno comprende una tarea de alta complejidad. En último lugar encontramos el tratamiento del aire. Esta última estrategia ha ganado popularidad en los últimos años, ya que con ella se pueden conseguir tasas de reducción de la

contaminación interior altas.

Son variadas las formas que existen para tratar y purificar el aire, cada una con ventajas y desventajas. Dentro de estas formas se encuentra la oxidación fotocatalítica, la que corresponde a una tecnología basada en el proceso de catálisis producido en un semiconductor a través de la radiación de energía sobre él, lo que permite la formación de pares electrón-hueco, que en presencia de agua y oxígeno son capaces de generar una reacción redox y degradar los contaminantes.

Si bien la tecnología de oxidación fotocatalítica representa una buena alternativa a la degradación de contaminantes del aire, los purificadores de aire basados en ella poseen elevados costos, lo que hace que sean productos difíciles de comercializar.

La razón de este elevado costo se contradice con la simplicidad de este tipo de tecnología en cuanto a componentes que requiere para su funcionamiento.

Debido a lo anterior, el presente trabajo abordará el diseño, manufactura, análisis de costos y la evaluación experimental de un prototipo de purificador de aire en base a oxidación fotocatalítica. Con el fin de comprender la tecnología y su costo asociado, además de estudiar la posibilidad de manufacturar un dispositivo de bajo costo análogo a los dispositivos disponibles comercialmente.

1.2. Objetivo General

Diseñar y evaluar experimentalmente un prototipo de purificador de aire en base a la tecnología de oxidación fotocatalítica.

1.3. Objetivos Específicos

Para lograr el objetivo general propuesto, se consideran los siguientes objetivos específicos:

1. Levantar requerimientos de diseño para un purificador de aire.
2. Diseñar un prototipo de purificador de aire que utilice la tecnología de oxidación fotocatalítica.
3. Realizar la integración de componentes necesaria para el prototipado.
4. Realizar la evaluación experimental del prototipo, en cuanto a reducción de compuestos orgánicos volátiles.
5. Estudiar la factibilidad de fabricar un dispositivo de bajo costo.

1.4. Alcances

1. Se diseñará considerando la tecnología de oxidación fotocatalítica.
2. La etapa de experimentación considera la medición de compuestos orgánicos volátiles totales.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Desinfección inducida por radiación ultravioleta

Dentro del espectro electromagnético podemos encontrar el subconjunto de ondas denominadas “radiación óptica”. Este rango comprende toda radiación cuya longitud de onda se encuentre entre 100 nanómetros y 1 milímetro, como se aprecia en la figura 2.1

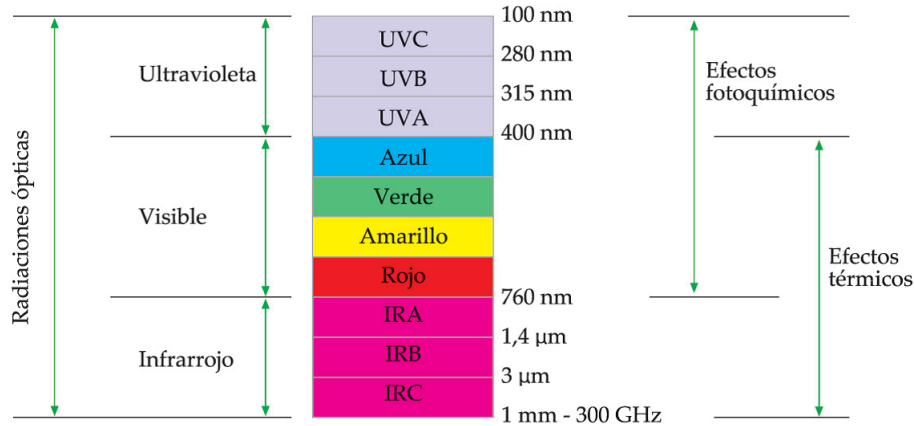


Figura 2.1: Espectro de radiaciones ópticas. Fuente: [5]

Bajo esta clasificación encontramos tres bandas; Los rayos ultravioleta (UV), que abarcan ondas desde los 100 [nm] hasta los 400 [nm]; la luz visible, que incluye radiaciones entre 400 [nm] y 760 [nm], y los infrarrojos, que incluyen ondas con longitudes entre 760 [nm] y 1 [mm].

Sumado a lo anterior, cada banda puede subdivirse en subbandas. En específico, son de interés para el presente trabajo, los tres tipos de radiación UV que se pueden identificar en la figura 2.2. En primer lugar encontramos la radiación UV-C, que comprende ondas entre 200 y 280 [nm]. Luego, se encuentra la radiación UV-B, comprendida entre 280 y 315 [nm] y finalmente la UV-A, comprendida entre 315 y 400 [nm].

La radiación ultravioleta es ampliamente utilizada para la inactivación de microorganismos, como hongos, bacterias y virus, con el fin de desinfectar espacios y/o superficies. El mecanismo mas utilizado para lograr dicha inactivación consiste en la emisión de radiación UV de longitudes de onda corta (UV-C), mayoritariamente a 254 [nm], lo que causa que el microorganismo irradiado sea incapaz de replicarse y por lo tanto se inactive.

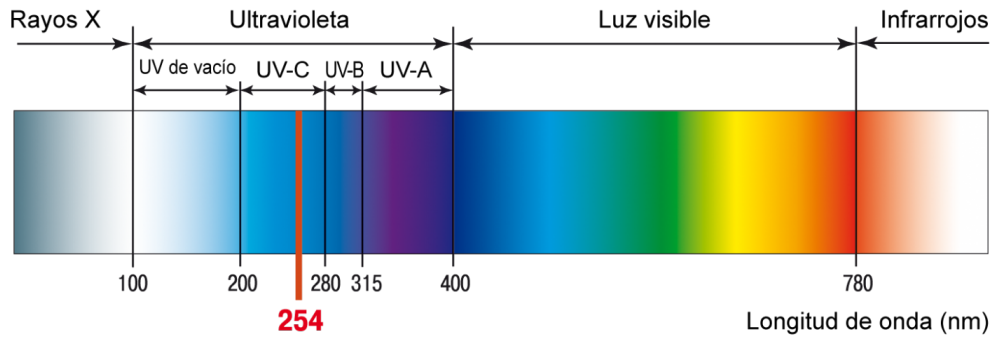


Figura 2.2: Espectro Ultravioleta. Fuente: [6]

2.1.1. Lámparas Ultravioletas

Este tipo de lámparas consisten en un tubo relleno de gas inerte y una pequeña cantidad de mercurio. Además, en uno o en ambos de sus extremos, poseen electrodos, que al ser suministrados con corriente, son capaces de emitir electrones. Los electrones emitidos ionizan el gas inerte, generando un arco eléctrico. Luego, el calor producido por dicho arco, vaporiza el mercurio dentro de la lámpara, lo que provoca colisiones entre los electrones emitidos y los átomos de mercurio, permitiéndoles a estos últimos alcanzar un estado de excitación energético.

Los átomos de mercurio excitados emiten alrededor de un 85 % de su energía a una longitud de onda de 253,7 [nm] [7]. La cantidad de energía restante es emitida en varias longitudes de onda pertenecientes al espectro UV, principalmente a 185 [nm]. Por lo general, las lámparas germicidas son recubiertas internamente con el fin de evitar la transmisión de estas últimas longitudes, ya que de transmitirse hacia afuera de la lámpara, pueden generar ozono, el cual corresponde a un subproducto indeseado, nocivo para la salud.

El material del tubo de las lámparas UVC corresponde a cuarzo o a un vidrio especial, capaz de transmitir radiaciones ultravioletas. Lo anterior permite transmitir radiaciones correspondientes solo a la longitud de onda deseada (aproximadamente 254 [nm]) y filtrar las indeseadas.

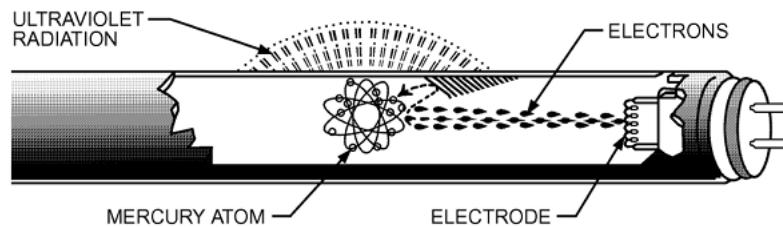


Figura 2.3: Esquema básico de una lámpara UV. Fuente: [7]

2.2. Compuestos orgánicos volátiles

Dentro de los contaminantes que se pueden presentar en el aire son de importancia para el trabajo los denominados compuestos orgánicos volátiles.

Los compuestos orgánicos volátiles, o VOCs por sus siglas en inglés, son todos aquellos hidrocarburos presentes en estado gaseoso a temperatura ambiente o que son muy volátiles a dicha temperatura. Dada la amplia definición, se pueden considerar como VOC hasta un millar de sustancias.

Su origen puede ser natural o artificial, donde los pertenecientes a la primera categoría se originan principalmente debido a la formación de metano a través de la descomposición de materia orgánica. En segundo lugar, los artificiales poseen origen diverso, pudiendo ser este la industria de la pintura, del calzado, siderúrgica, etc. En espacios interiores, específicamente dentro de los hogares, los VOCs son principalmente emitidos por productos de limpieza, productos de aseo personal, uso de pinturas, pisos de madera y alfombras.

A continuación se presentan las principales clases de VOCs en conjunto con sus posibles fuentes de emisión y ambientes donde se pueden encontrar.

Tabla 2.1: Clases de VOCs y sus posibles fuentes de emisión. Fuente: [23].

Clase	Ambiente y fuentes
Hidrocarburos alifáticos y cíclicos	1, 2, 4, 5, 7, 9-11
Hidrocarburos aromáticos	1-7, 9, 11, 12
Aldehídos	1-12
Terpenos	1-4, 7-10
Alcoholes	1-9, 11
Ésteres	1, 2, 4, 7-9
Halocarburos	1, 2, 7, 11
Glicoles/éteres de glicol/ésteres de glicol	1-4, 7, 9
Cetonas	1-4, 6-12
Siloxanos	11
Alquenos	2, 7
Ácidos orgánicos	2, 3, 7-9, 11
Éteres	9
Otros VOCs	1, 2, 4, 7, 11

1: edificios establecidos, 2: edificios nuevos y renovados, 3: escuelas, 4: interiores de autos nuevos, 5: alfombras, 6: coberturas/acabados de pisos, 7: muebles de madera, 8: maderas sólidas, 9: pinturas, 10: productos de limpieza, 11: calentadores sin salida de humos y hornos eléctricos, 12: equipamiento de oficina.

Dentro de estas clases de compuestos, existen químicos que destacan por su concentración en ambientes interiores. Los principales se presentan a continuación:

Tabla 2.2: Concentración típica de compuestos orgánicos en espacios interiores. Fuente: [23].

Químico (clase)	Concentración [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Acetona (acetonas)	32 - 120
Benceno (hidrocarburos aromáticos)	8 - 34
Etanol (alcoholes)	120 - 490
Limoneno (terpenos)	21 - 450
Tolueno (hidrocarburos aromáticos)	37 - 320
<i>m/p</i> -xilenos (hidrocarburos aromáticos)	18 - 120

2.2.1. Medición

Debido a la gran cantidad de sustancias que conforman este grupo de contaminantes, su medición a bajo costo puede resultar compleja. A nivel de laboratorio, el método utilizado para medirlos corresponde a la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), la que permite medir con exactitud cuales y que cantidad se encuentra en el espacio en estudio. Dicha técnica es costosa y resulta poco viable a nivel comercial.

Con la finalidad de poder cuantificar este tipo de compuesto es que surge el concepto de “compuestos orgánicos volátiles totales” (TVOCs). Los TVOCs corresponden a la totalidad de VOCs que existe en el ambiente en un determinado momento y son cuantificados usando medidas de concentración de masa ($[\mu\text{g}/\text{m}^3]$) o concentración molar (partes por billón [ppb]).

2.3. Oxidación Fotocatalítica

La oxidación fotocatalítica (PCO, por sus siglas en inglés), corresponde a una tecnología de purificación de aire que se basa en la fotocatálisis. La fotocatálisis es una reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador. En el caso de la limpieza del aire, esta tecnología permite degradar contaminantes, mediante la oxidación de los mismos, degradándolos en productos no nocivos.

El mecanismo de funcionamiento de la fotocatálisis oxidativa encuentra sus bases en la estructura de los materiales semiconductores, la que permite que se produzca la reacción deseada. La estructura de bandas de energía de este tipo de materiales consiste en; una banda de valencia (VB), ocupada por electrones, y una banda de conducción (CB), sin electrones presentes. Las bandas de energía se encuentran separadas por un espacio, conocido en la literatura [10] como “*Band Gap*” (E_g), el que representa una barrera energética para los electrones.

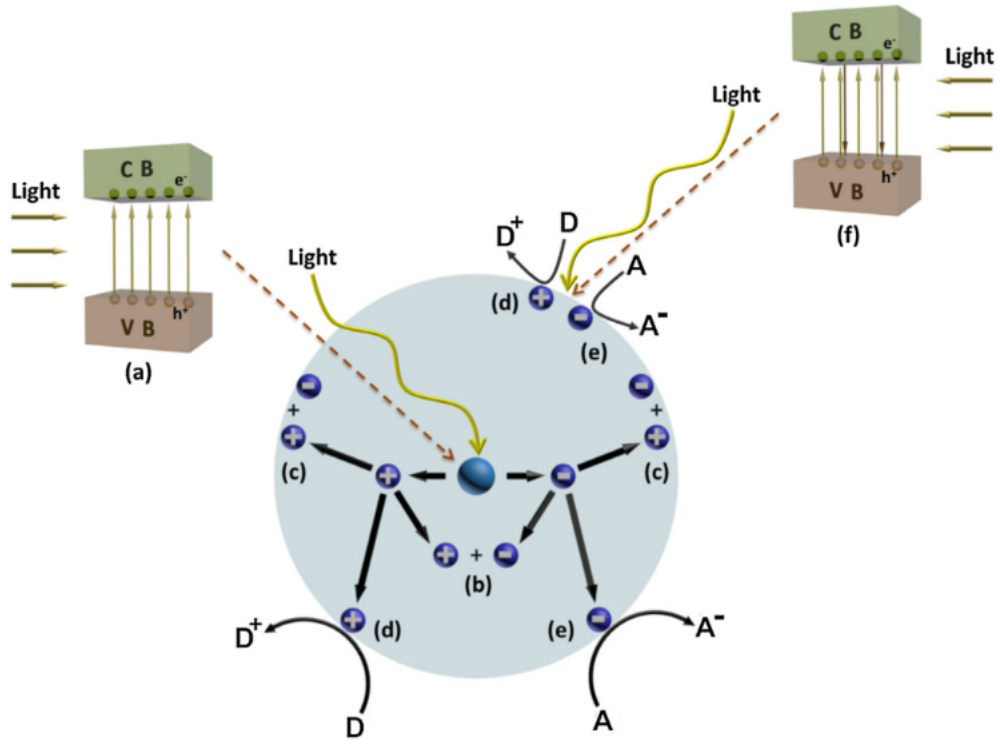
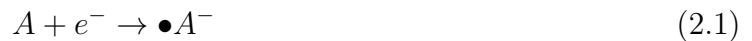


Figura 2.4: Diagrama esquemático de la fotocatalisis: (a) excitación electrónica debido a radiación (CB = banda de conducción, VB = banda de valencia), (b) recombinación electrón-hueco, (c) recombinación electrón-hueco superficial, (d) reacción de un hueco con un electrón donante (D) absorbido en la superficie de grano. (e) reacción entre un electrón y un electrón aceptor (A) absorbido en la superficie de grano. (f) excitación electrónica debido a radiación en la superficie de grano y recombinación localizada. Fuente: [10].

Como se puede observar en la figura 2.4, al incidir radiación sobre el catalizador, si los fotones absorbidos poseen la suficiente energía, los electrones de la banda de valencia son capaces de superar la barrera energética entre bandas y son excitados hasta la banda de conducción, dejando un número equivalente de huecos de electrón en la banda de valencia. Posterior al movimiento de los electrones, ambos portadores de carga se encuentran disponibles para difundir hacia la superficie del fotocatalizador, donde pueden reaccionar.

La presencia de estos sitios activos en la superficie, facilita la absorción de contaminantes presentes en el ambiente, lo que da origen a reacciones óxido-reducción: los electrones (e^-) pueden reaccionar con aceptores de electrones (A) (ecuación 2.1), por ejemplo O_2 mediante reducción, y los huecos (h^+) pueden reaccionar con donadores de electrones (ecuación 2.2), por ejemplo H_2O mediante oxidación [10].



Donde: \bullet = electrón desapareado.

Si bien en los párrafos anteriores se detalla el proceso de difusión que pueden ocurrir du-

rante la fotocatalisis, cabe destacar que la excitación y posterior difusión de los electrones no corresponde al único proceso que puede suceder durante la iluminación. Tanto en la superficie como en la porción interna del material irradiado puede darse la situación de que los electrones y los huecos se recombinen (figura 2.4 (b) y (c)), neutralizando así su acción de degradación. Dichos mecanismos escapan los alcances de este trabajo.

2.3.1. Mecanismos fotocatalíticos de óxido-reducción

2.3.1.1. Degradación de compuestos orgánicos

Cuando los electrones excitados y los huecos no se recombinan y logran alcanzar la superficie, se identifican tres posibles caminos que estos pueden seguir. En primer lugar, pueden causar una reacción redox con las moléculas de oxígeno y agua presentes en el aire, respectivamente, formando así radicales hidroxilo y superóxido ($\bullet OH$ y $\bullet O_2^-$).

En segundo lugar, se pueden desprender de la superficie y tornar móviles, formando especies reactivas de oxígeno (ROS) (Por lo general, H_2O_2 y $\bullet HO_2$). A su vez, estas especies son capaces de mantenerse inalteradas o reaccionar para formar otros ROS.

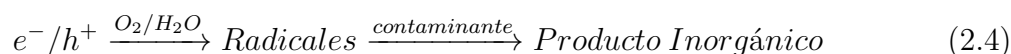
En tercer lugar, los electrones y huecos pueden reaccionar directamente mediante óxido-reducción con los contaminantes presentes en el aire.

Teniendo lo anterior en consideración, se tienen tres posibles mecanismos de degradación de contaminantes [10], como sigue:

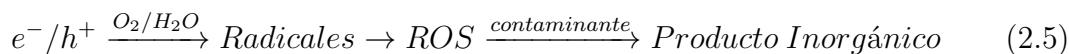
1. Proceso de una sola etapa (redox directa):



2. Proceso de dos etapas (Formación de radicales y redox):



3. Proceso de tres etapas (Formación de radicales, formación de ROS intermedia y redox):



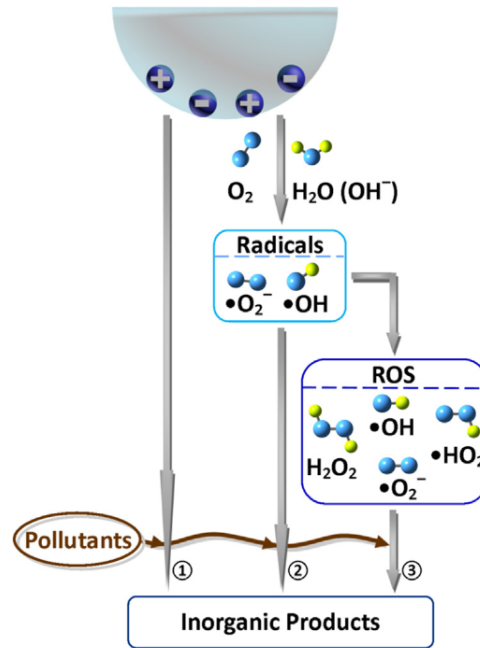


Figura 2.5: Mecanismos de degradación de contaminantes mediante oxidación fotocatalítica. Fuente: [10]

2.3.2. Sistemas de purificación en base a oxidación fotocatalítica

Como ya ha sido mencionado, para lograr la reacción y la posterior degradación deseada, se requiere de un catalizador y una fuente de radiación que sea capaz de proveer de la energía suficiente para la difusión de los electrones. De esta forma un sistema de purificación de aire en base a oxidación fotocatalítica esta formado por dos componentes principales: un catalizador y una fuente de energía.

Con el motivo de levantar los requerimientos necesarios para diseñar y fabricar el prototipo deseado, en las siguientes secciones se presentan dispositivos comerciales y académicos basados en la tecnología de interés.

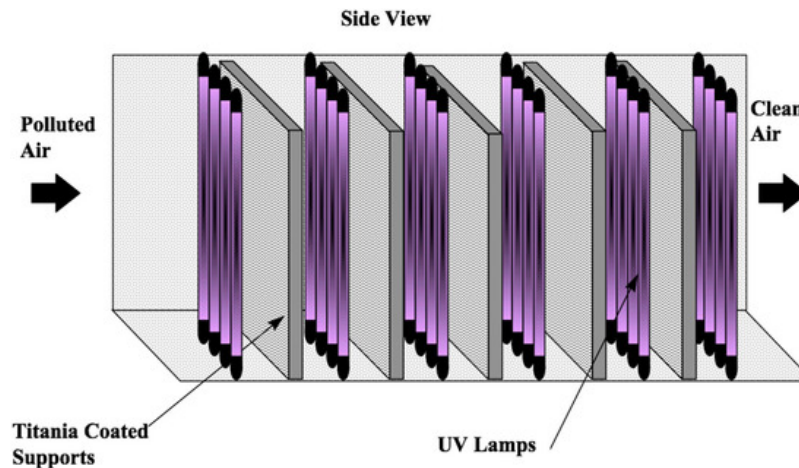


Figura 2.6: Esquema básico de un purificador en base a PCO. Fuente: [14]

2.3.3. Sistemas comerciales

Existen diversos sistemas comerciales que utilizan la tecnología de oxidación fotocatalítica para lograr la limpieza del aire. Por lo general, la diferencia entre ellos radica en el caudal que son capaces de tratar y el catalizador utilizado.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las características de los sistemas comerciales estudiados. Cabe destacar que por lo general, los fabricantes no especifican ni la eficiencia de conversión, ni la tasa de entrega de aire limpio de sus sistemas, sino que la eficiencia que declaran corresponde a la obtenida mediante ensayos de laboratorio.

Dependiendo del caso, se presenta el rango de flujos de trabajo recomendado por el fabricante o bien el espacio que es capaz de cubrir el purificador.

Modelos	Reme Halo Zero	Vitesy Natede Smart	AirOasis Ionic Air	EnviroKlenz Air System
Catalizador	TiO ₂ , Ag, Cu, Rh	Trióxido de Wolframio (WO ₃)	No especificado	TiO ₂
Fuente de energía	UVC	LEDS (450 nm)	UVC	UVC
Caudal de trabajo [m ³ /h]	1359 - 4078	-	-	144,15 - 424,75
Cobertura [m ²]	-	12	55,7	92,9
Eficiencia declarada	85%	99%	85%	92,31%
VOC Ensayado	Etileno	Formaldehído	VOCs Totales	Ácido Sulfhídrico
Tiempo en lograr la eficiencia [hr]	12	1	3	4
Precio de Venta [USD]	\$449,99	\$349,00	\$304,77	\$699,00

Figura 2.7: Características sistemas comerciales estudiados. Fuentes: [15], [16], [17] y [18].

De la tabla 2.7 se puede extraer que la fuente de energía mas utilizada para este tipo de aplicaciones corresponde al rango UVC. Sumado a esto, el rango de trabajo de los purificadores posee amplias diferencias de un modelo a otro. En cuanto a las eficiencias, en todos los casos se presenta una eficiencia mayor o igual al 85 %, sin embargo en todos los casos menos uno, el tiempo en lograr esa eficiencia es bastante alto y por lo tanto no representa una métrica totalmente válida ni representativa.

Para el caso del purificador que logra la eficiencia declarada en un tiempo razonable (Vitesy Natede Smart - 1 [hr]), lo logra a expensas de cubrir un área mucho menor que el resto (12 [m²]).

2.3.4. Sistemas académicos

Existen diversos trabajos académicos en los cuales se estudia el comportamiento de la tecnología de oxidación fotocatalítica con respecto a la degradación de contaminantes del aire. Dichos estudios son de suma importancia para el presenta trabajo, pues permiten levantar requerimientos de diseño y establecer objetivos.

Taranto, Frochot y Pichat

Taranto, Frochot y Pichat [19], compararon la eficacia en la purificación fotocatalítica entre dos formas distintas de soporte para el catalizador. En específico, compararon un soporte con forma de paralelepípedo recto con estructura de panel de abeja y uno del tipo tela no tejida. Ambos soportes se impregnaron con TiO_2 como catalizador.

La configuración experimental consistió en un loop cerrado de $0,4 m^3$, sellado al escape del aire. A este loop se le integró en uno de sus tramos un paralelepípedo (560 mm x 295 mm x 200 mm) en el cual se alternaron distintas fuentes de energía y cantidad de ellas (UVC de 18 [W] y 35 [W]), así como también se alternaron los dos soportes mencionados. Los contaminantes inyectados al loop correspondieron a metanol y tolueno (concentración inicial = 100 ppmv). Los flujos fueron variados desde $50 m^3/h$ (0,34 m/s) hasta $1800 m^3/h$ (12,25 m/s).



Figura 2.8: Configuración Experimental. Fuente: [19]

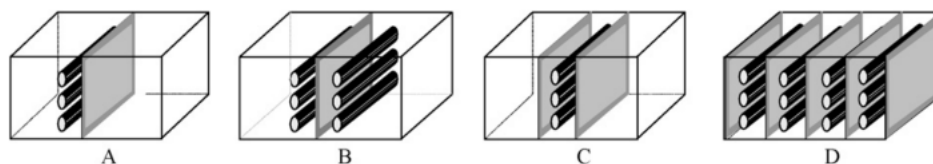


Figura 2.9: Distintos arreglos utilizados. Fuente: [19]

Dentro de las conclusiones sacadas del estudio, destaca que se logró establecer una relación lineal entre la remoción de metanol y la irradiación hasta un valor aproximado de $60 [W/m^2]$, posterior a este valor, se observó un fuerte declive en la tasa de remoción del contaminante. Para la configuración de mayor potencia (3 lámparas de 35 [W] cada una) la tasa obtenida fue menor a la obtenida con una sola de estas lámparas, y no mucho mayor a la que produjo la configuración con una sola lámpara de 18 [W]. Este efecto fue atribuido a la desactivación

del catalizador, provocada por la alta cantidad de energía radiante.

Con respecto a la eficiencia de cada uno de los soportes, se encontró que para el caso del soporte con estructura de panal de abeja, la tasa de remoción fue hasta 4 veces mayor.

Al comparar las distintas configuraciones (2.9), se observó que la configuración C (dos materiales para un banco de lámparas) no solo produjo una mayor eficiencia que la configuración A (un banco de lámparas para un material), sino que también produjo una eficiencia equivalente a la configuración B (dos bancos de lámparas para un material), a pesar de utilizar la mitad de la potencia eléctrica.

Finalmente, destaca que se midieron menores caídas de presión para el material con estructura de panal de abeja. El resultado anterior resulta útil debido a que permite obtener ahorros considerables en cuanto a energía utilizada para operar los ventiladores.

Ginestet, et al.

Otro trabajo que vale la pena destacar, corresponde a lo realizado por Ginestet, et al. [21], quienes desarrollaron un sistema de oxidación fotocatalítica modular para instalarlo en cabinas de aviones.

El sistema consistió en un banco de luces UV (4x36 [W] UVA ó 4x36 [W] UVC) colocado entre dos sustratos impregnados con dióxido de titanio. Se comparó la eficiencia de conversión de una sola pasada y la tasa de entrega de aire limpio para distintas estructuras de los sustratos (malla fina, malla ancha y celdas triangulares).

Los contaminantes utilizados para realizar las pruebas correspondieron a Tolueno, Etanol y Acetona. Se realizaron en una pieza de 48 m^3 (4 x 4 x 3 m), se ubicó el dispositivo en el centro de la misma y se le agregó un ventilador axial, con el fin de generar un flujo de aire por él. Se utilizaron dos flujos, 40 y 80 m^3/h .

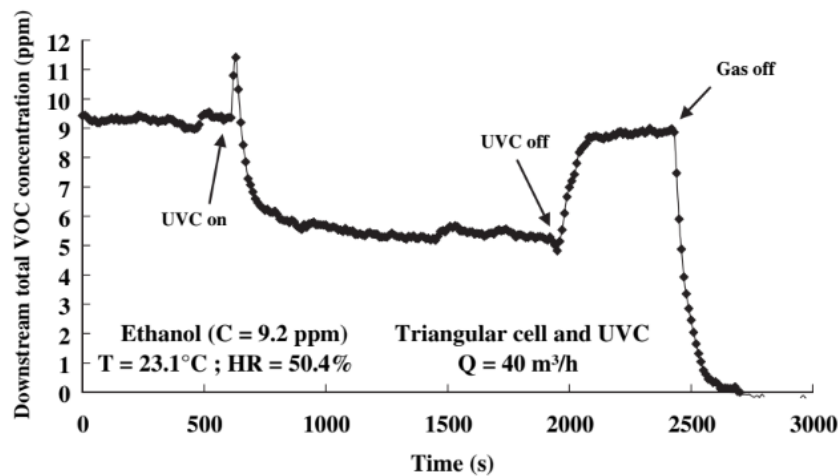
Se concluyó que la estructura con mejores resultados correspondió a la de celdas triangulares.

Para el caso del tolueno, se obtuvo una eficiencia de una sola pasada de 8,6 y 15,6 % para flujos de 80 y 40 m^3/h respectivamente, utilizando lámparas UVA. Para el caso de las lámparas UVC, se obtuvieron eficiencias de 8,1 y 17,8 %, para flujos de 80 y 40 m^3/h respectivamente.

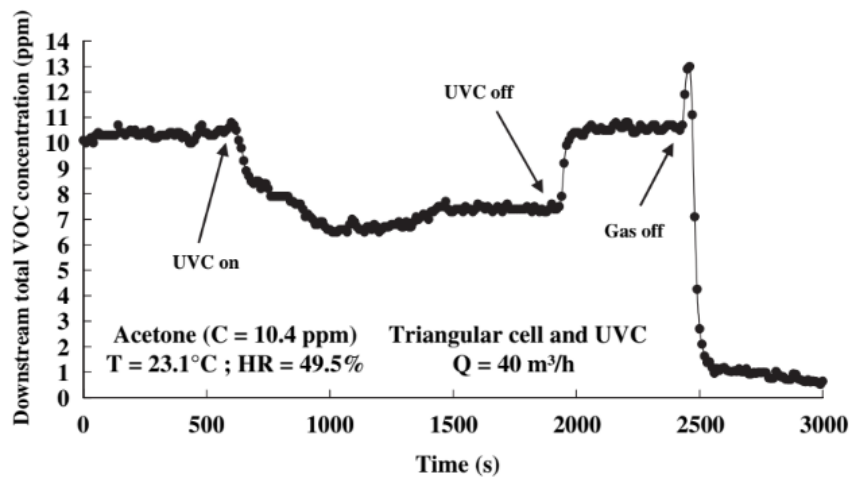
Para el caso del etanol, se obtuvo una eficiencia de una sola pasada de 24,5 y 42,9 % para flujos de 80 y 40 m^3/h respectivamente, utilizando lámparas UVA. Para el caso de las lámparas UVC, se obtuvieron eficiencias de 21,9 y 40,9 %, para flujos de 80 y 40 m^3/h respectivamente.

Para el caso de la acetona, se obtuvo una eficiencia de una sola pasada de 13,9 y 29,5 % para flujos de 80 y 40 m^3/h respectivamente, utilizando lámparas UVA. Para el caso de las lámparas UVC, se obtuvieron eficiencias de 13,2 y 28,4 %, para flujos de 80 y 40 m^3/h res-

pectivamente.



(a) Concentración en el tiempo de etanol.



(b) Concentración en el tiempo de acetona.

Figura 2.10: Resultados Experimentales. Fuente: [21]

De los resultados obtenidos para la estructura con mejor eficiencia se concluyó que la eficiencia de la unidad es función del contaminante al cual se enfrenta, donde el tolueno resultó ser el mas complejo de degradar. Además, se apreció de manera clara que el flujo de aire tiene una influencia directa en los resultados. Al aumentar el flujo al doble (de 40 m³/h a 80 m³/h), la eficiencia de la unidad se vio disminuida en un factor de 2.

Finalmente, no se observaron diferencias en la eficiencia al variar el tipo de radiación usada.

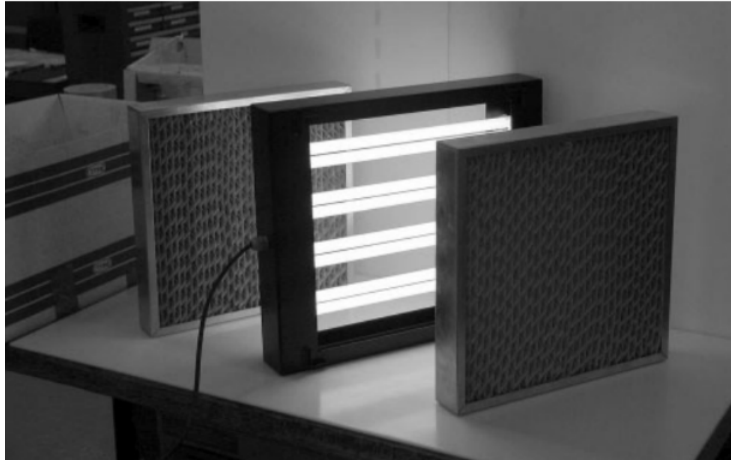


Figura 2.11: Dispositivo desarrollado. Fuente: [21]

Destailats, et al.

En el presente trabajo se estudiaron los principales factores que afectan el rendimiento de un purificador de aire en base a oxidación fotocatalítica bajo condiciones realistas.

Se utilizó una mezcla de contaminantes, entre los cuales destacan benceno, tolueno y formaldehído. Fueron introducidos en una cámara de 20 m^3 y se mantuvieron sus concentraciones individuales en rangos realistas, entre 2 y $40\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. A esta configuración se le acopló un prototipo de purificador de aire, instalado mediante un ducto de recirculación (figura 2.12).

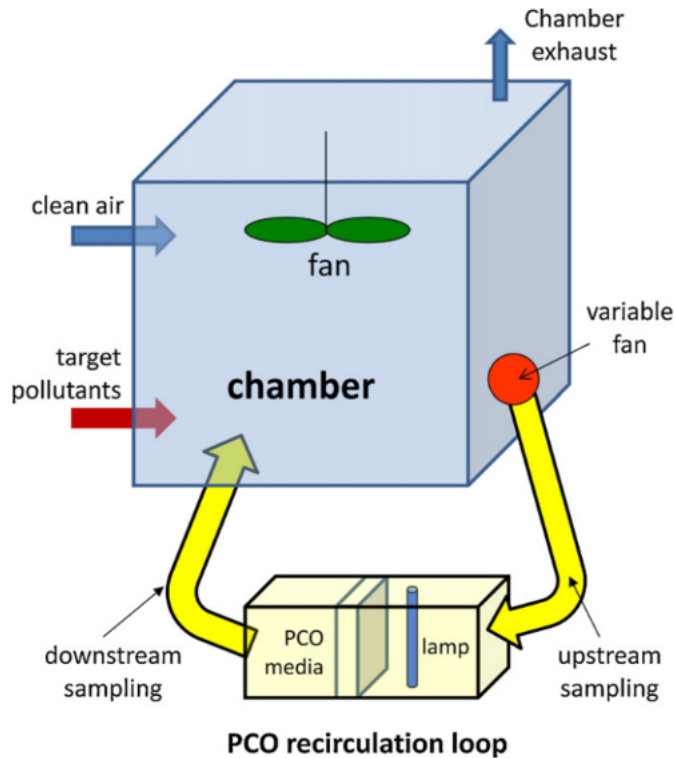


Figura 2.12: Configuración experimental. Fuente: [22]

Los parámetros variados fueron el tipo de soporte utilizado para el dióxido de titanio y las fuentes de energía. Se estudiaron dos distintos tipos de soporte: de placa plana y plisado (figura 2.13). Las fuentes de energía se variaron entre UVA de 36 [W] y UVC de 36 [W]



Figura 2.13: Filtro tipo plisado.

Sumado a lo anterior, se estudió la respuesta del sistema frente a un rango de flujos de aire entre $178\text{-}878\text{ m}^3/h$ y flujo de ingreso de contaminantes entre $1\text{ y }12\text{ }\mu\text{l}/h$.

Para el caso del filtro de placa plana se realizaron tres experimentos en condiciones idénticas, variando el flujo. De los resultados obtenidos para estos casos se pudo estudiar el efecto del tiempo de residencia en la eficiencia del dispositivo. De manera similar a los otros estudios, se concluyó que, mientras mayor sea el tiempo de residencia de los contaminantes en el reactor, mejor su efectividad al degradarlos. A modo de comparación, para los tres casos se obtuvieron eficiencias de: 5 % para el caso de mayor flujo, 18,2 % para el caso de flujo intermedio y 44,25 % para el caso de menor flujo. Cabe destacar que estos tres experimentos se realizaron con lámparas UVC.

Además, se realizó un cuarto experimento para analizar la influencia del tipo de radiación en la respuesta del sistema, utilizando el menor flujo para ambos casos. Se obtuvo una eficiencia de 40,45 % utilizando UVA, lo que demostró que no existe una gran diferencia al cambiar entre fuentes UVC y UVA.

Finalmente, con el fin de comparar la influencia que tiene la forma del soporte utilizado para el catalizador, se realizó otro experimento, donde se impuso el flujo intermedio y se utilizaron lámparas UVA. La eficiencia obtenida fue aproximadamente 70 %, eficiencia mayor a la obtenida para el caso con filtro de placa plana y el menor flujo. De esta forma se concluyó que la forma plisada del filtro, al poseer mayor área, provocó un mayor tiempo de contacto entre los contaminantes y el filtro, lo que aumentó la eficiencia.

Capítulo 3

Metodología

En la figura 3.1 se muestra la metodología general a seguir para el desarrollo del trabajo de título. De manera general, el proceso comienza con el levantamiento de requerimientos a partir de una revisión bibliográfica para luego dar paso a la etapa de diseño, en la cual se diseñará el prototipo a construir, para luego adquirir los componentes e integrarlos.

Una vez integrado el prototipo, se pasará a la etapa de validación experimental, que considera el diseño de la validación, la experimentación y el análisis de los resultados obtenidos.

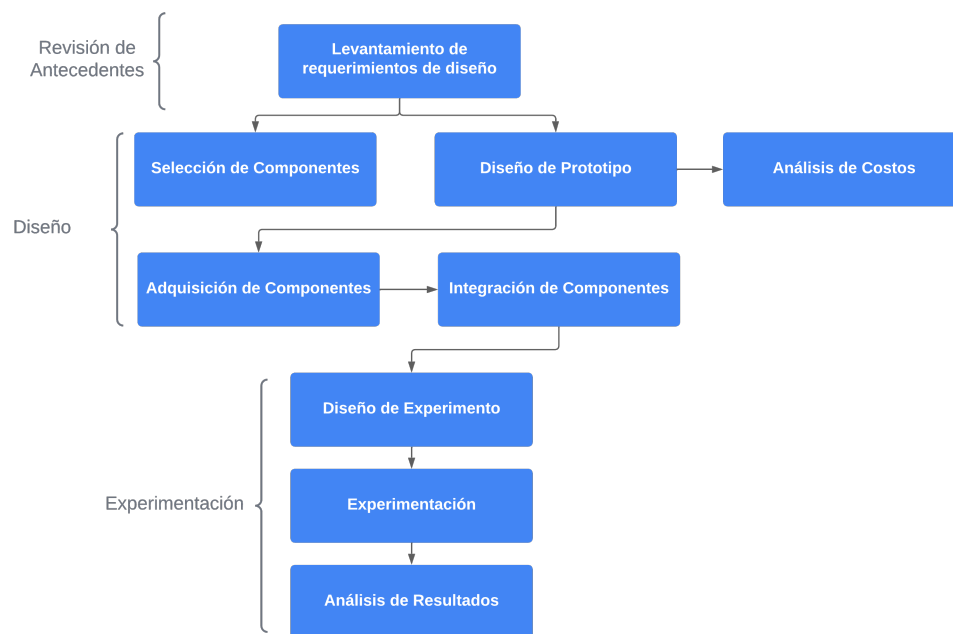


Figura 3.1: Metodología del trabajo de título

3.1. Antecedentes de estudio

Esta etapa consiste en la realización de una revisión de antecedentes con el fin de levantar los requerimientos necesarios para el diseño del prototipo y fijar objetivos en cuanto a los resultados experimentales que se quieren obtener del mismo.

Lo anterior se realizó estudiando diversas publicaciones científicas e investigando sobre los

principales purificadores de aire en base a oxidación fotocatalítica presentes en el mercado.

3.2. Diseño

La etapa de diseño considera varias sub-etapas. En primer lugar y de forma paralela, se realizaron la selección de componentes y diseño del prototipo. El carácter en paralelo de esta etapa fue escogido principalmente por el hecho de que para la realización del trabajo se contaba con un presupuesto acotado de alrededor de 150 [USD] (\approx 122.000 [CLP]), lo que hace mas factible un diseño conducido por la previa elección de componentes comerciales que permitan mantenerse dentro de dicho presupuesto.

Una vez realizada la selección de componentes comerciales, se diseñó el prototipo inicial de purificador mediante el software CAD *Fusion 360*.

Posterior al diseño computacional, se adquirieron los componentes necesarios para fabricar el prototipo de purificador y se procedió a la etapa de integrar los mismos. Como se detallará mas adelante en el capítulo de diseño, se utilizaron materiales ya disponibles, puestos a disposición por la empresa, para realizar el trabajo. Dichos componentes fueron los condicionantes a la hora de seleccionar el resto.

3.3. Experimentación

Esta etapa representa la fase mas importante del presente trabajo, ya que permite determinar si los objetivos planteados fueron alcanzados con éxito o no.

En específico, esta etapa considera tres sub-etapas: (1) diseño del experimento, (2) experimentación y (3) análisis de resultados.

Para diseñar la experimentación se recurrió al método de Taguchi de experimentación robusta [24], el que entrega valiosas herramientas para el correcto diseño experimental y la experimentación misma. En específico, con el método se determinaron la cantidad de experimentos a realizar y se construyó la matriz de experimentación, que a su vez, permitió estudiar como afecta la variación de los distintos factores en la respuesta del sistema.

La etapa de diseño correspondió a un proceso iterativo, en el cual a medida que se iban haciendo los distintos experimentos fueron apareciendo nuevos requerimientos, problemas e ideas que requirieron del rediseño del sistema de validación.

Si bien el capítulo de experimentación profundiza de manera extensa en esta etapa, a continuación se definen los criterios de evaluación utilizados para mediar la eficiencia del prototipo.

3.3.1. Criterios de evaluación

Debido a que la finalidad última de un purificador de aire es tal como lo sugiere su nombre, purificar el aire, es que la eficiencia de los mismos se define en base a que tan efectivos son al realizar esta tarea. Para evaluar lo anterior, existe el concepto de “tasa de entrega de aire

limpio” o CADR, por sus siglas en inglés, que cuantifica el flujo de aire limpio que es capaz de entregar un determinado purificador.

Para calcular la métrica descrita, se utilizaron las fórmulas entregadas por la norma ANSI/AHAM AC-1-2006 [27], como sigue:

$$CADR = V \cdot (k_t - k_n) \quad (3.1)$$

Donde:

- V : volumen del sistema de pruebas [m^3]
- k_t : tasa de decaimiento de la prueba [$1/h$]
- k_n : tasa de decaimiento natural [$1/h$]

La tasa de decaimiento se calcula mediante:

$$C_{ti} = C_{to} \cdot e^{-kti} \quad (3.2)$$

Donde:

- C_{ti} : concentración en el tiempo t_i [$\mu g/m^3$]
- C_{to} : concentración inicial en $t = 0$ [$\mu g/m^3$]
- k : tasa de decaimiento [$1/h$]
- t_i : tiempo en $t = i$ [hr]

Para poder adquirir los datos necesarios y realizar los cálculos presentados, se utilizó un sensor MOX, modelo SEN54x de la marca *SENSIRION* [28], que entrega como salida un índice de compuestos orgánicos volátiles totales.

Sumado a lo anterior, para realizar el análisis de datos, se utilizó el software *Microsoft Excel* y el software estadístico *Minitab*, que facilita el análisis para el método de Taguchi.

Capítulo 4

Requerimientos de Diseño

Para poder diseñar de manera correcta el prototipo de purificador y teniendo en consideración la bibliografía estudiada, en conjunto con los purificadores comerciales basados en la tecnología de interés, es importante tener claridad en cuanto a los requerimientos básicos y específicos de diseño. En las siguientes secciones se presentan dichos requerimientos.

Los requerimientos presentados en esta sección son los requerimientos exclusivos del prototipo en sí. Los requerimientos para realizar la evaluación experimental son presentados en la sección de mismo nombre, para así mantener el orden y la claridad del trabajo.

4.1. Requerimientos Básicos

4.1.1. Catalizador

Para el caso del catalizador a utilizar no se realizó un levantamiento de requerimientos como tal, ya que al realizar la revisión bibliográfica se pudo notar la gran popularidad con la que cuenta el dióxido de titanio para estas aplicaciones. Sumado a lo anterior, la facilidad para conseguirlo comparado a otros catalizadores lo convirtió en el candidato ideal para el trabajo.

El dióxido de titanio (TiO_2) es el material mas utilizado como catalizador en aplicaciones fotocatalíticas. Esto, debido a diversas ventajas comparativas que presenta [4], como: superficie de área específica, alta actividad oxidante, costo comparativo reducido y naturaleza no tóxica.

El TiO_2 es capaz de absorber fotones, y en consecuencia presentar actividad catalítica, en longitudes de onda correspondientes al espectro ultravioleta (figura 4.1). La activación de este material mediante radiación se puede describir según:



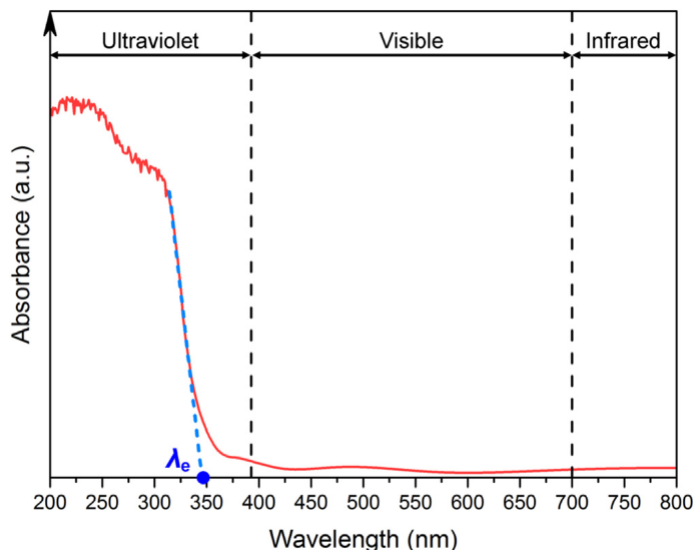


Figura 4.1: Espectro de absorción del Dióxido de Titanio. Fuente: [10]

4.1.2. Fuente de Radiación

Una vez decidido el material catalizador a utilizar, es importante definir que longitudes de onda serán utilizadas para provocar las reacciones deseadas. Como ya se explicó, a partir del espectro de absorción del dióxido de titanio, las longitudes de onda que permitirán dichas reacciones corresponden a longitudes de espectro pertenecientes al rango ultravioleta.

Si bien en el estudio bibliográfico no se encontraron diferencias al usar fuentes UVA o UVC, se priorizará el uso de las últimas, debido a la acción germicida por si solas que poseen.

Sumado a la selección del tipo de fuente de radiación, se debe seleccionar la cantidad de ellas que se utilizará. Como se pudo observar en los sistemas académicos estudiados, este factor tiene incidencia en la eficiencia del reactor y en la potencia eléctrica utilizada por el mismo, lo que afecta de forma directa el costo del sistema.

4.2. Requerimientos Específicos

4.2.1. Contaminantes Objetivo

Para tener la facultad de estudiar la eficiencia del prototipo construido, es importante definir previamente que contaminantes se buscará degradar.

Al utilizar la tecnología de oxidación fotocatalítica se pueden eliminar del aire microorganismos y compuestos orgánicos volátiles. En una primera aproximación, el presente trabajo y por lo tanto el prototipo, se enfocará en la reducción de compuestos orgánicos volátiles, principalmente debido a que se cuenta con mas antecedentes experimentales, métodos y dispositivos para cuantificar la reducción de ellos.

4.2.2. Estructura de soporte para el catalizador

Un factor que puede ser determinante para la eficacia del purificador, corresponde a la estructura donde se depositará el catalizador.

La forma y el tipo de estructura escogida tiene influencia directa en el área de reacción disponible, lo que a su vez condiciona el aprovechamiento de los fotones irradiados. También, posee relación con la caída de presión que se produce al pasar el aire por el purificador.

Se reconocen tres estructuras o configuraciones posibles para los purificadores de oxidación fotocatalítica, cada uno con sus ventajas y desventajas. A continuación se presenta una tabla resumen de dichas configuraciones:

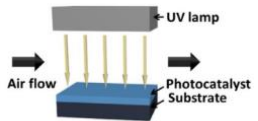

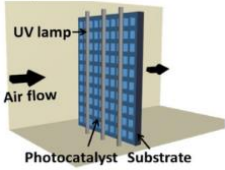
Configuración	Descripción
<p>Placa plana sólida</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - UV paralela a la placa - Flujo perpendicular a la placa - Fotocatalizador impregnado en la superficie de la placa - Geometría simple - Caída de presión pequeña - Área de reacción pequeña
<p>Anular</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - UV al interior de soporte tipo cilindro - Fotocatalizador impregnado en la cara interna del cilindro - Flujo axial - Geometría simple - Caída de presión pequeña - Área de reacción pequeña
<p>Placa plana con estructura panal de abeja</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - UV paralela a la placa - Placa perforada con estructura tipo panal de abeja - Fotocatalizador impregnado en la superficie y en las paredes internas - Gran área de reacción - Tasa de aprovechamiento de fotones baja si el espesor de la placa es muy delgada

Figura 4.2: Tipos de reactores fotocatalíticos. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de [10]

Como se puede apreciar en la figura 4.2, la configuración del reactor puede variar en cuanto a la posición del flujo con respecto al sustrato que posee el fotocatalizador, las caras del sustrato impregnadas con el fotocatalizador y la posición del sustrato con respecto a la fuente de radiación.

La elección del tipo de configuración, muchas veces se ve condicionada por el formato de instalación del purificador. Para el caso de instalaciones industriales, donde el purificador por lo general se instala en ductos de aire acondicionado, se tiende a utilizar reactores del tipo anular, como lo es el caso del modelo comercial *Reme Halo* ([15]). Por otro lado, si el formato de instalación consiste en un purificador de hogar, se puede optar por utilizar un soporte para el catalizador con forma de placa, la cual puede ser sólida o con alguna estructura perforada, como por ejemplo tipo panal de abeja.

De forma similar a los requerimientos de la fuente de radiación, la cantidad de soportes

a utilizar también debe ser estudiada. Se observó en el estudio bibliográfico que este factor puede producir un aumento en la eficiencia del reactor.

A modo de nota, de aquí en adelante, se le nombrará de forma indistinta a la estructura de soporte para el catalizador impregnada con dióxido de titanio como filtro fotocatalítico o como catalizador, con el fin de simplificar la escritura.

4.2.3. Flujos y tiempos de residencia

Como ya se pudo apreciar en las conclusiones de los sistemas académicos, un aspecto fundamental a la hora de diseñar un reactor de fotocátalisis y que tiene influencia directa en su rendimiento, corresponde al flujo de aire que se encontrará fluyendo por el reactor. Lo anterior se debe a que este factor determina el tiempo de residencia de los contaminantes en el purificador y por lo tanto el tiempo que pasan en contacto con la superficie del catalizador. De manera general, al aumentar el flujo, el tiempo de residencia disminuye y por lo tanto la eficiencia en la remoción de compuestos se esperaría que aumentase.

Del estudio previamente realizado, se concluyó que el flujo y los tiempos de residencia son quizás el factor mas determinante a la hora de diseñar y validar un purificador en base a la tecnología de interés, esto debido a que en los estudios se observaron mejoras considerables al reducir el flujo, llegando incluso a doblarse la eficiencia de los dispositivos estudiados.

Teniendo esto en mente, resulta de suma importancia poder variar este parámetro con el fin de estudiar y establecer un flujo óptimo para el prototipo.

4.2.4. Distancia entre fuente de radiación y catalizador

Otro factor importante a la hora de diseñar un purificador de fotocátalisis corresponde a la distancia entre la fuente de radiación y el catalizador. Su importancia radica en que permite estudiar el parámetro de variación de la radiación incidente en el soporte del catalizador sin tener que agregar mas lámparas, lo que significaría un mayor costo para el desarrollo del trabajo.

Como se concluyó en el trabajo realizado por Taranto, et al ([19]), mayor radiación incidente sobre la superficie del soporte se traduce en una mayor tasa de remoción de contaminantes. Lo anterior es válido hasta un límite, donde la radiación pasa a ser perjudicial para el rendimiento del sistema, debido a que puede desactivar el fotocatalizador.

Teniendo esto en consideración, para la validación experimental se consideró la variación de las distancias internas del reactor.

4.3. Requerimientos Electrónicos

Como requerimientos electrónicos para el prototipo, en primer lugar, tiene que poseer un ventilador para proveer del flujo necesario al sistema, además de un sistema de control para dicho ventilador. En segundo lugar se tienen que poder encender y apagar las fuentes de radiación.

En específico para las fuentes de radiación, las lámparas germicidas son capaces de convertir entre el 30 y el 40 % de la energía en salida UV. Para que sean capaces de operar cercanas a este valor óptimo, deben ser controladas por dispositivos llamados balastos, que permiten mantener el flujo de corriente a través de la lámpara constante.

4.4. Requerimientos Adicionales

Como requerimiento adicional, se debe cubrir la superficie del prototipo para evitar la exposición radiante con la piel y ojos de las personas, debido a que esta interacción provoca efectos negativos en la salud de las personas.

En segundo lugar, y de forma similar al primero de estos requerimientos, las superficies del prototipo deben ser capaces de reflejar la radiación de las lámparas, esto con el fin de aprovechar de la mayor manera posible dicha radiación.

4.5. Resumen de requerimientos

En la siguiente tabla se presenta el resumen de los requerimientos levantados.

Tabla 4.1: Resumen de requerimientos

Requerimiento	Tipo de requerimiento	Rango (opciones)
Catalizador	Fijo	Dióxido de Titanio
Fuente de radiación	Variable	UV-C o UV-A
Contaminantes objetivo	Variable	Diversos VOCs
Estructura de soporte	Variable	Placa plana, anular o panal de abeja
Flujo	Variable	40 - 878 [m^3/h]
Distancia fuente - catalizador	Variable	- ^a

^a Este requerimiento fue levantado en términos conceptuales, esto es, como afecta la distancia en la eficiencia del reactor. Los valores numéricos se determinaron de forma posterior.

Capítulo 5

Diseño del Equipo

La etapa de diseño resuelve la forma en que se montarán e integrarán los componentes del reactor de fotocatalisis. En la figura 5.1 se puede observar el diseño general del prototipo a fabricar.

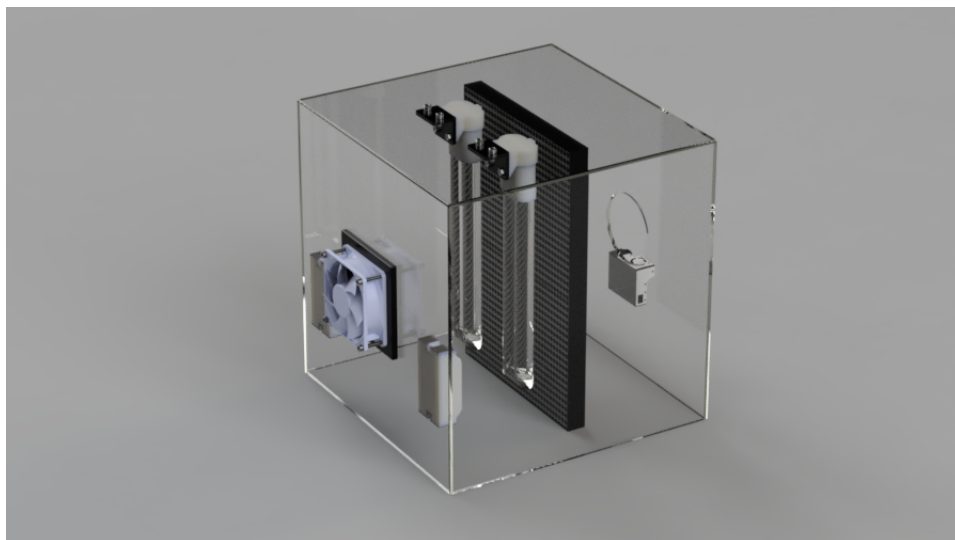


Figura 5.1: Diseño general del prototipo

5.1. Componentes mecánicos

En la presente sección se detallan los componentes mecánicos seleccionados y manufacturados para el prototipo.

El diseño estuvo condicionado principalmente por dos componentes que la empresa decidió reutilizar de otros proyectos: la caja para el montaje y el ventilador.

5.1.1. Caja acrílica para montaje

Este componente corresponde a una caja acrílica en la cual se integraron todos los componentes que conforman el purificador.

Cuenta con orificios de 5 [mm] de diámetro para el montaje de las fuentes de radiación en la parte superior y con orificios del mismo diámetro para el montaje del ventilador. Además, se le realizaron perforaciones de un diámetro de 76 [mm] con el fin de permitir el ingreso y la salida del aire. En su interior, de manera vertical, se encuentra instalado el soporte para el catalizador.

Las principales características de la caja corresponden a:

Tabla 5.1: Características principales caja estanca

Característica	Medida
Alto [mm]	300
Ancho [mm]	300
Largo [mm]	300
Volumen [m^3]	0,027

Considerando los diámetros de entrada y salida de aire, se tiene que las áreas de salida y entrada son:

$$A_{in} = A_{out} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 0,018 [m^2] \quad (5.1)$$

5.1.2. Ventilador

El ventilador seleccionado corresponde a un ventilador axial marca *Delta Electronics*, modelo *PBF0812UHE* [25]. Su única función es la de proveer de un flujo constante al purificador, para permitir el paso del aire por él y posibilitar la desinfección del mismo. Este componente toma especial importancia en la etapa de experimentación, debido a que su control permite variar el flujo y seleccionar un valor óptimo para este.

Sus principales características se presentan en la tabla 5.2

Tabla 5.2: Características principales del ventilador axial *PBF0812UHE*. Adaptación a partir de datos obtenidos en [25].

Característica	Medida
Tensión nominal [VDC]	12
Voltaje de operación [VDC]	7.0 - 13.2
Corriente de entrada [A]	1,55 (1,86 máx)
Máximo flujo de aire [m^3/h]	3,03
Dimensiones [mm x mm x mm]	80 x 80 x 38 (largo x alto x ancho)



Picture shown is for illustration purpose only. Actual product may vary.

Figura 5.2: Ventilador axial *PFB0812UHE*

5.1.3. Filtro fotocatalítico

Por lo general, este tipo de soportes son diseñados a medida según las especificaciones necesitadas. Para este proyecto en particular se buscó un soporte que se adaptara de la mejor manera posible a la caja acrílica de montaje.

A modo de reducir los costos de fabricación del prototipo, se optó por un fabricante de filtros que accedió a enviar muestras de sus filtros fotocatalíticos a un valor muy reducido.

El filtro escogido posee las características presentadas a continuación:

Tabla 5.3: Características principales del filtro fotocatalítico.

Característica	Descripción
Tipo de Soporte	Placa plana
Material	Aluminio
Estructura	Panal de abeja
Dimensiones [mm x mm x mm]	300 x 200 x 20 (largo x alto x espesor)



Figura 5.3: Filtro fotocatalítico

Con el fin de estudiar y determinar la estructura y la composición química del catalizador y su soporte, se obtuvieron imágenes de microscopía electrónica de barrido y se realizó un análisis químico de las mismas. A continuación se muestran las dos imágenes más representativas, junto con la composición de las zonas estudiadas, que permitieron confirmar que el material de soporte era efectivamente aluminio y que el catalizador correspondía a dióxido de titanio.

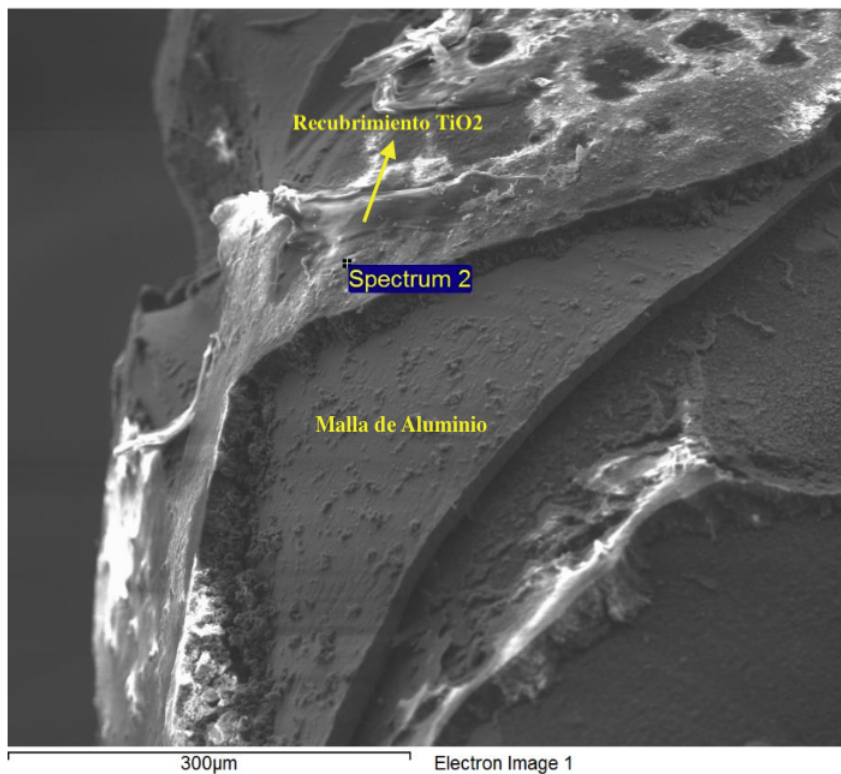


Figura 5.4: Imagen SEM para el análisis químico del recubrimiento del soporte

Tabla 5.4: Resultados cuantitativos de peso y concentración atómica para la zona recubierta con TiO_2

Elemento	wt %	at %
Al	18,49	16,88
Ti	33,02	16,98
Fe	7,76	3,42
O	40,73	62,71

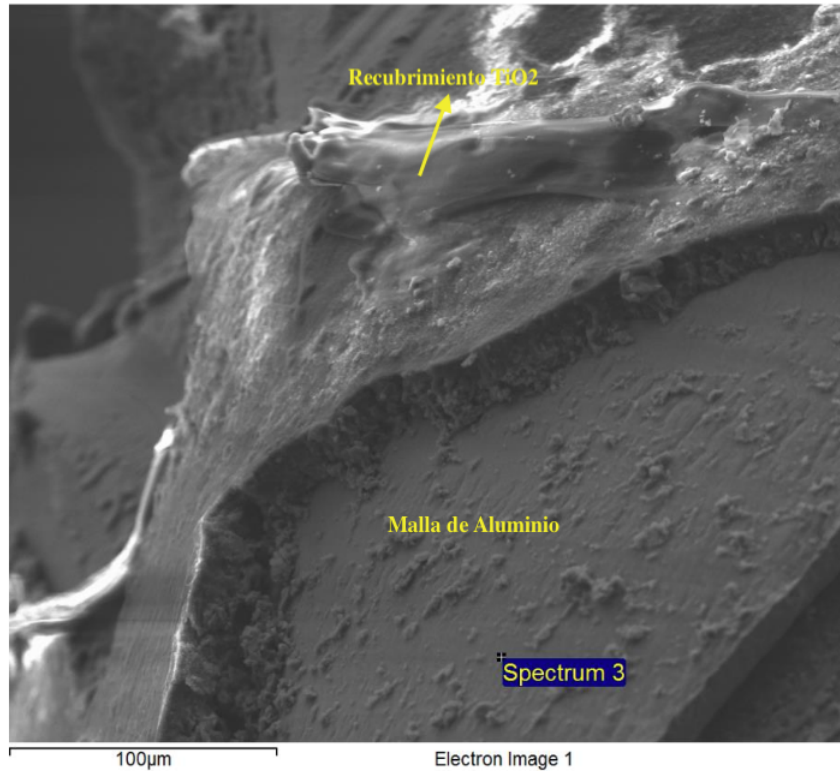


Figura 5.5: Imagen SEM para el análisis químico de la malla del soporte

Tabla 5.5: Resultados cuantitativos de peso y concentración atómica para la malla de soporte

Elemento	wt %	at %
C	10,36	16,68
Al	20,01	14,50
Fe	18,84	6,59
O	50,79	62,05

5.1.4. Lámparas UV

Se escogió una lámpara UV marca *OSRAM*, modelo *HNS L 18W* cuya onda dominante posee una longitud de onda de 254 [nm], correspondiente al espectro UV-C. Con el fin de variar la radiación sobre el filtro, se adquirieron dos unidades de este componente.

Tabla 5.6: Características principales de la lámpara UVC.

Característica	Descripción
Radiación UVC inicial	$> 0.5 [W/m^2] @ 1 [m]$
Vida útil	9000 [hrs]
Radiación UVC @ 9000 [hrs]	$> 0.42 [W/m^2] @ 1 [m]$
Onda dominante	90 % @ 254 [nm]



Figura 5.6: Especificaciones espectrales de la lámpara UVC OSRAM HNS L 18W. Adaptación a partir de datos obtenidos en [26].

5.1.5. Montajes

Para realizar el montaje de los anteriores componentes, se diseñaron montajes simples, los cuales fueron posteriormente impresos mediante impresión 3D.

Para el caso de las lámparas UV, estas poseen una base para su conexión, la que facilita su conexión a los pines de la misma y también facilita el montaje mecánico. Teniendo en mente que para la lámpara escogida se debe utilizar una base del tipo 2G11, se adquirieron dos unidades de esta y se diseñó el montaje a la caja acrílica basándose en ella.

A continuación se muestra el ensamble de ambos componentes.



Figura 5.7: Ensamble de la base 2G11 y el montaje para la caja acrílica.

5.2. Componentes electrónicos

5.2.1. Ballast electrónico

Para que las lámparas UV operen cercanas a su óptimo de conversión de energía, deben ser controladas mediante ballast electrónicos. Siguiendo las indicaciones de la marca fabricante

del modelo de lámpara UV, se seleccionó el ballast electrónico *QT-ECO 1X18S* [29], de la marca *OSRAM*.

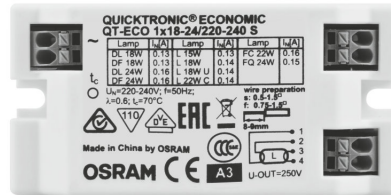


Figura 5.8: Ballast electrónico QT-ECO 1X18S. Fuente: [29].

La conexión de los ballast con las lámparas fue realizada según el siguiente diagrama:

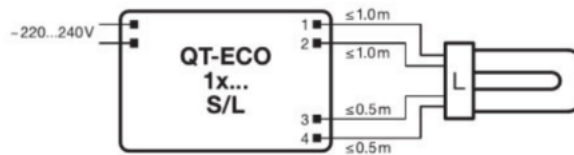


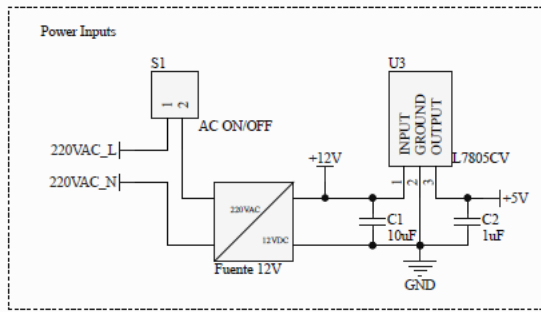
Figura 5.9: Conexión entre el ballast y la lámpara UV.

5.2.2. Caja de conexiones

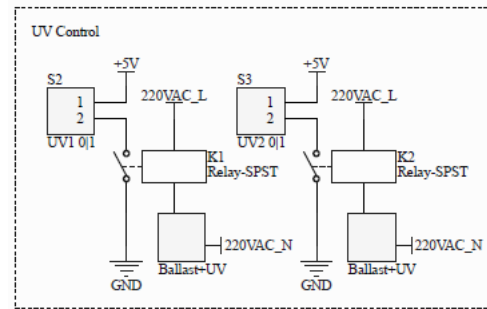
Para albergar los componentes eléctricos que van por fuera de la caja de montaje acrílica, se decidió utilizar una caja plástica secundaria.

Dentro de ella se integraron, una placa PCB para controlar el sensor de TVOC, sobre la cual va montado un microcontrolador ESP-32, una fuente de poder (12V, 5A, 60W), un switch on/off para el encendido y apagado de las lámparas y una regleta de conexiones para conectar entre sí estos componentes.

Los esquemas de conexión mas relevantes se presentan a continuación:



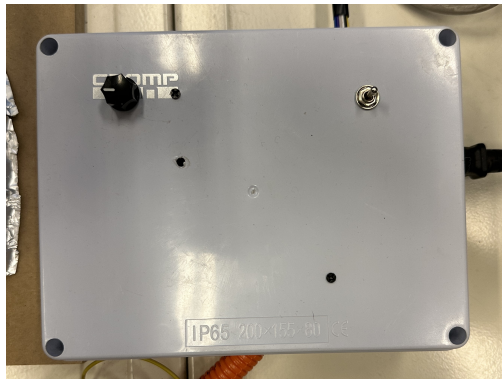
(a) Entradas de poder.



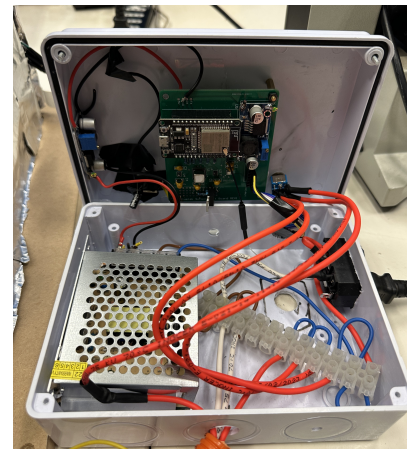
(b) Control UV.

Figura 5.10: Esquemáticos de conexión. Fuente: Bluetek Global.

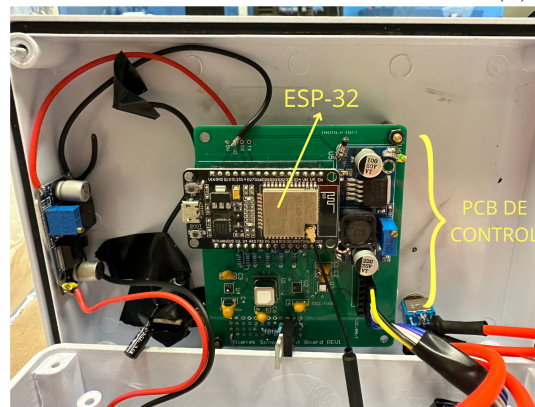
El esquemático general del prototipo se encuentra en el anexo D.



(a) Exterior



(b) Interior

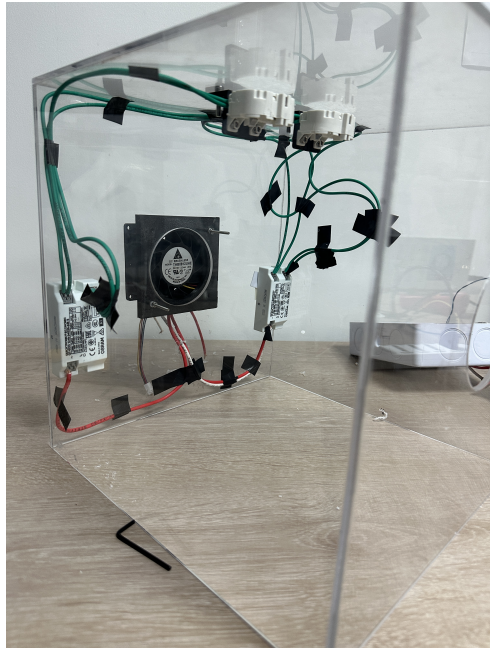


(c) Placa de control y microcontrolador ESP-32

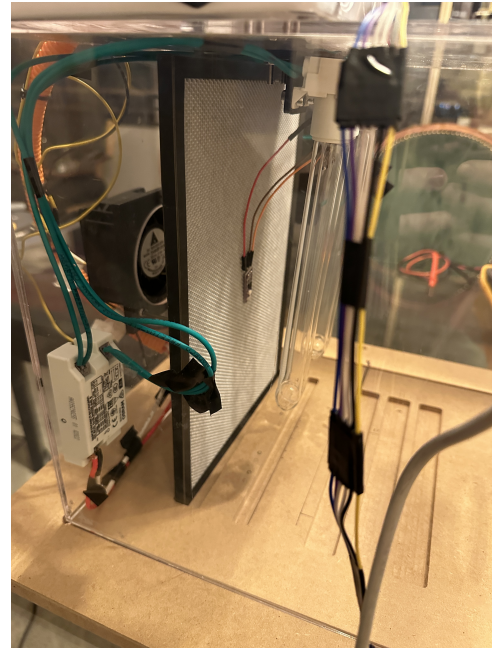
Figura 5.11: Caja de conexiones

5.3. Prototipo

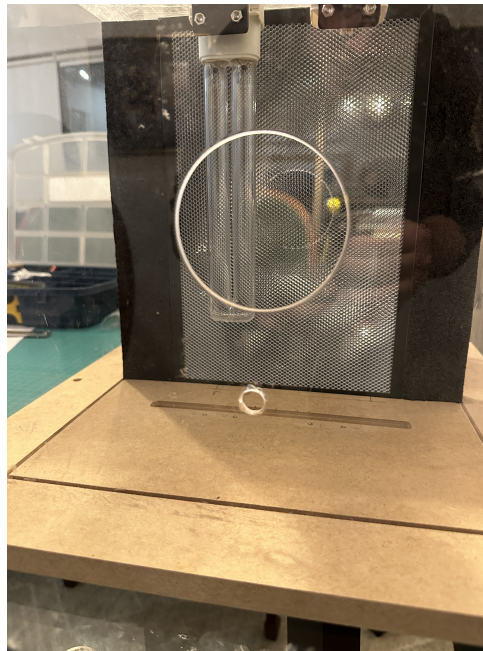
El prototipo fabricado se muestra en las figura 5.12



(a) Conexiones para UV.



(b) Vista lateral.



(c) Vista frontal.

Figura 5.12: Prototipo fabricado.

Como se puede observar, dentro de la caja acrílica se encuentran los ballast, las bases 2G11 para la conexión de las lámparas y las lámparas mismas. Además, se encuentra sobre una base de MDF, el soporte para el catalizador. Dicha base posee cuatro espacios que permiten variar la distancia del catalizador a la fuente de radiación.

Para cubrir los requerimientos adicionales de diseño (seguridad y reflexión de radiación) se instaló una capa de papel aluminio por fuera de la caja acrílica de montaje.

5.4. Costos

El resumen de los costos en los que se incurrió para desarrollar el prototipo corresponde a:

Ítem	Costo [CLP]
Caja acrílica	0
Lámparas UV	26.880
Ballasts Electrónicos	24.480
Bases para Tubo UV	2.400
Filtros TiO ₂	8.711
Fuente de Poder	5.690
Caja para conexiones	19.463
MDF Dimensionado	1.790
Ventilador	0
Pernería	6.119
Total	95.533 [CLP] 109,67 [USD]

Capítulo 6

Experimentación

Con esta etapa se buscan principalmente dos cosas: (1) estudiar la eficiencia del prototipo a la hora de remover contaminantes del aire y (2) analizar como los distintos factores de diseño (distancias, flujo y radiación) impactan dicha eficiencia.

A partir de esta etapa, se podrá concluir si es posible o no fabricar un reactor de fotocatalisis que sea a la vez eficiente y de bajo costo. Sumado a lo anterior, es importante destacar que la presente validación no solo tiene una finalidad productiva, sino que presenta un valor inherente, debido a que entregará información valiosa para la empresa en cuanto a la comprensión de la tecnología.

La experimentación considera tres etapas principales: diseño del experimento, experimentación y análisis de resultados. La primera de estas consiste en, como su nombre lo sugiere, el diseño de la experimentación misma, teniendo en mente las consideraciones teóricas, los métodos a utilizar, el diseño mecánico y electrónico. En segundo lugar, se tiene la etapa de experimentación, en la cual se realizan todos los experimentos necesarios y se obtienen todos los datos que se utilizaron posteriormente en la etapa final de análisis de datos.

6.1. Diseño del Experimento

6.1.1. Método de Taguchi

El método de Taguchi corresponde a una forma de diseño experimental, que permite realizar experimentación, reduciendo la cantidad de corridas que se deben realizar, sin perder la robustez de la experimentación misma. Está basado en el uso de arreglos ortogonales, que permiten variar los distintos factores a estudiar en sus respectivos niveles, para posteriormente analizar los resultados obtenidos y escoger la mejor configuración del producto diseñado.

Las etapas del método se presentan a continuación:

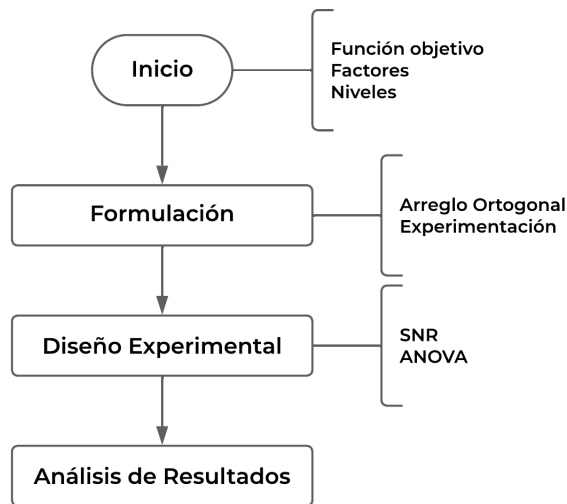


Figura 6.1: Pasos del método Taguchi.

Para este trabajo, se seleccionó como función objetivo la tasa de entrega de aire limpio (CADR) y los siguientes factores con sus niveles correspondientes:

Factor	Niveles
Distancia UV - filtro	1, 4, 7 [cm]
Flujo de aire	Alto, medio, bajo
Cantidad de UV encendidas	0, 1, 2
Cantidad de filtros	0, 1, 2

Dado que se tienen 4 factores, con 3 niveles cada uno, el arreglo ortogonal que mejor se adapta corresponde a un arreglo L_9 , que consta de nueve experimentos a realizar para poder estudiar el efecto de los factores y niveles escogidos con respecto a la función objetivo seleccionada. A continuación se presenta el arreglo utilizado para realizar la experimentación.

Tabla 6.1: Arreglo ortogonal L_9 para la experimentación.

Experimento	Flujo	Distancia UV - Filtro [cm]	Nro. Filtros	Nro. de UV
1	1	1	0	0
2	1	4	1	1
3	1	7	2	2
4	2	1	1	2
5	2	4	2	0
6	2	7	0	1
7	3	1	2	1
8	3	4	0	2
9	3	7	1	0

6.1.2. Configuración experimental

La configuración de la experimentación debe permitir la medición y variación de todos los factores considerados en el arreglo escogido de Taguchi. En las siguientes imágenes se presenta el diseño conceptual y la configuración experimental utilizada en el trabajo.

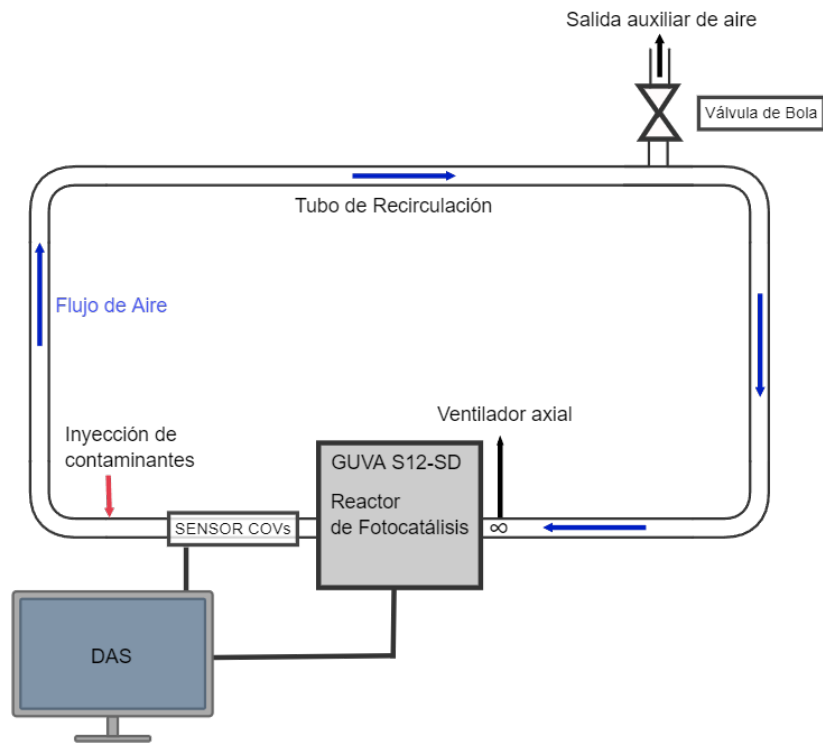


Figura 6.2: Esquemático de la configuración experimental

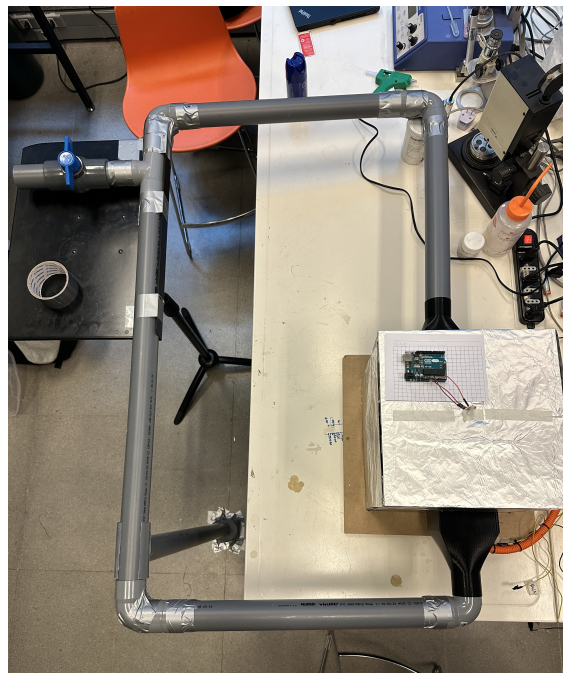


Figura 6.3: Configuración experimental

Como se observa en la figura 6.2, el setup experimental consiste en un tubo o circuito de recirculación, que permite mantener un ambiente controlado para la validación. A través de él circula el aire y permite hacerlo pasar por el reactor de fotocatalisis.

El circuito cuenta con diversos subsistemas que hacen posible la experimentación. En primer lugar posee una salida auxiliar de aire, que, mediante una válvula de bola, permite vaciar el sistema hacia el exterior, entre experimento y experimento. En segundo lugar, cuenta con dos sensores, uno para medir la concentración de contaminantes en el tiempo, la temperatura y la humedad relativa y otro para medir la radiación incidente en el filtro.

Finalmente, incluye un subsistema de inyección de contaminantes para introducir en el circuito los contaminantes deseados.

6.1.2.1. Circuito de recirculación

Para este elemento se utilizaron tubos de PVC de diámetro exterior 50 [mm] y un espesor de 3,6 [mm]. El largo total del circuito de recirculación correspondió a 3115 [mm], distribuidos de la siguiente manera:

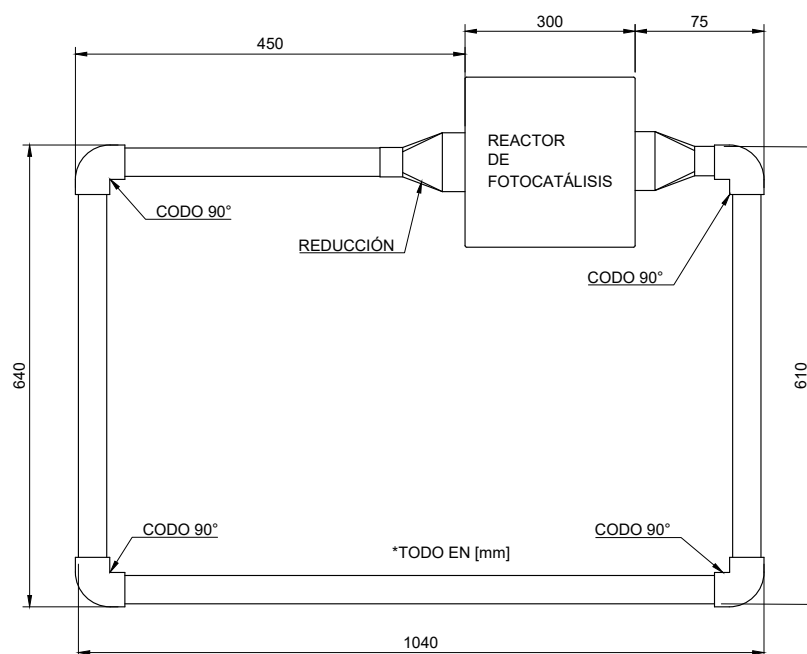


Figura 6.4: Medidas circuito de recirculación.

Para acoplar el circuito al prototipo, se diseñaron e imprimieron en 3D dos reducciones de sección cuadrada a circular, que permitieron el acople por sobre el ventilador de estos elementos.

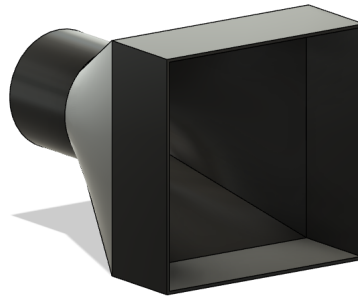


Figura 6.5: Reducción para acople.

Considerando el largo total del circuito y la sección transversal de los tubos, el volumen del mismo correspondió a:

$$V_{cr} = \pi \cdot L \cdot (R_{ext}^2 - R_{int}^2) \quad (6.1)$$

$$V_{cr} = 0,0034 \text{ [m}^3\text{]} \quad (6.2)$$

6.1.2.2. Ventilador axial

El ventilador axial mencionado aquí, corresponde al mismo ventilador utilizado para el sistema de fotocatalisis. De manera dual, fue utilizado para el prototipo y para etapa de experimentación.

Su importancia en esta etapa, radica en que fue utilizado en conjunto con una fuente de poder regulable con el fin de proveer al sistema de tres distintos flujos. El procedimiento seguido para realizar lo anterior correspondió a:

1. Establecer voltajes mínimo y máximo de funcionamiento del ventilador, variando el voltaje de la fuente entre 0 y 12 [V].
2. Establecer un voltaje intermedio, usando un voltaje entre V_{max} y V_{min} .
3. Medir, utilizando un anemómetro, las velocidades del ventilador a los correspondientes voltajes con el fin de fijar los tres distintos niveles de flujo requeridos.

Al realizar los pasos anteriormente descritos, y considerando el diámetro de los tubos seleccionados, se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 6.2: Niveles de flujo para la experimentación.

Voltaje [V]	Velocidad [m/s]	Nivel de flujo	Flujo [m^3/h]
4,7	2,5	Bajo	70,69
6,5	4,5	Medio	127,23
9	7	Alto	197,92

A partir de estos tres valores de voltaje, se varió el flujo en sus tres niveles, necesarios para realizar la experimentación de forma correcta.

6.1.2.3. Inyección de contaminantes

El subsistema de inyección de contaminantes debe ser capaz de entregar un flujo constante de contaminantes al sistema, con el fin de estudiar la eficiencia del reactor frente a ellos.

De manera ideal, este mecanismo provee al sistema de un contaminante en específico o una combinación de ellos, en estado gaseoso. Lograr lo anterior con un presupuesto reducido y sin el equipamiento de laboratorio especializado resultada un desafío.

La primera aproximación escogida para lograr esto correspondió a aprovecharse del hecho que los contaminantes a inyectar corresponden a compuestos que son volátiles a temperatura ambiente, por lo que para lograr el estado gaseoso simplemente basta con dejarlos expuestos al ambiente. Este método, si bien permite evaporar el contaminante objetivo, la tasa de evaporación es muy lenta, por lo que, de usarse, el tiempo de experimentación se vería altamente alargado.

La segunda aproximación, y final, correspondió a usar un atomizador ultrasónico, capaz de atomizar un líquido a través de vibraciones de altas frecuencias. Si bien, en estricto rigor, estos elementos no evaporan el líquido, si son capaces de generar una niebla del mismo, que, como se verá mas adelante, permitió alcanzar los niveles deseados de contaminantes para llevar a cabo la experimentación.

El atomizador utilizado correspondió a uno genérico, con las siguientes características:

Tabla 6.3: Características atomizador.

Característica	Valor
Potencia	2 [W]
Voltaje	5 [V]
Flujo de pulverización	30-40 [ml/h]
Diámetro orificios	5 [μm]



Figura 6.6: Atomizador utilizado. Fuente: [30].

El atomizar utilizado no requiere de ningún tipo de programación y basta con conectarlo

a una fuente que entregue 5 [V] mediante micro-USB para su funcionamiento.

Para su montaje en el circuito de aire, se diseñó e imprimió en 3D una base de montaje, que permitió instalar el atomizador en conjunto con una varilla de humidificación, que permite poner en contacto este último con el líquido a atomizar, minimizando la posibilidad de que la electrónica se vea dañada.

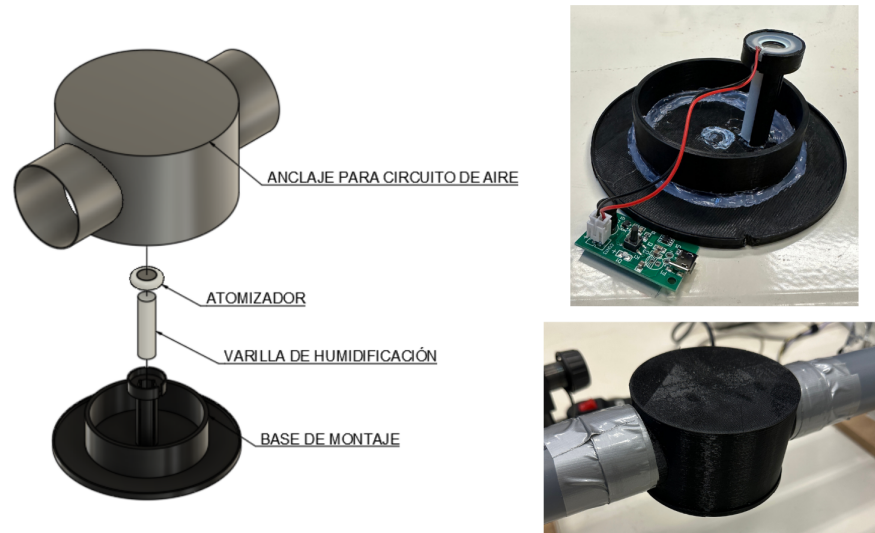


Figura 6.7: Configuración para el subsistema de inyección (izquierda), sistema de inyección (arriba) y montaje en el circuito de aire (abajo).

6.1.2.4. Sistema de adquisición de datos (DAS)

El sistema de adquisición de datos se compuso de dos dispositivos principales:

1. Sensor SEN54x:

Corresponde a un nodo de medición medioambiental que permite medir temperatura, humedad relativa, niveles de material particulado e índice de compuestos orgánicos volátiles. Para el caso particular de este trabajo, se utilizó para medir todas esas variables, excepto los niveles de material particulado, ya que la fotocatalisis no tiene ninguna incidencia en los mismos.



Figura 6.8: Sensor medioambiental SEN54x.

Las principales características del sensor se presentan a continuación:

Tabla 6.4: Características principales sensor SEN54x.

Humedad	
Precisión típica	4,5 [%]
Rango de medición	0 - 90 [%]
Tiempo de respuesta	20 [s]
Temperatura	
Precisión típica	0,45 [°C]
Rango de medición	-10 - 50 [°C]
Tiempo de respuesta	<60 [s]
VOC	
Salida procesada	0 - 500 [VOC Index]
Rango medición	0 - 1000 [ppm - etanol equivalente]
Tiempo de respuesta	<10 [s]
Genéricos	
Voltaje de entrada	4,5 [V]
Comunicación	i2C
Dimensiones	52,8 x 43 x 22,3 [mm ³]

Como se observa en la tabla 6.4, la salida del sensor corresponde a un índice que varía entre 0 y 500. Para el caso de la experimentación realizada, el contaminante objetivo escogido correspondió a etanol, debido a que este sensor se encuentra calibrado para dicho compuesto.

En la ficha técnica del producto [31] se presenta la curva de calibración del dispositivo, lo que permite extraer una correlación para transformar el índice medido por el sensor a concentración molar (ppb), que corresponde a una unidad de medida mas común para estos casos.

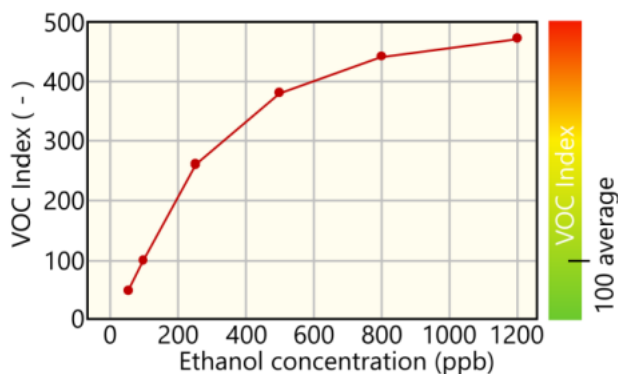


Figura 6.9: Correlación entre el índice de TVOC y la concentración de etanol. Fuente: [31].

De la figura 6.9, se obtiene la fórmula de transformación siguiente:

$$TVOC_{etanol} [ppb] = (\ln(501 - VOC_{index}) - 6,24) \cdot (-381.97) \quad (6.3)$$

La comunicación con el sensor se realizó mediante el bus i2C integrado que posee y fue conectado a la placa PCB de control, ubicada en la caja de conexiones. La placa de control, mediante el microcontrolador *ESP32*, permitió la comunicación mediante Wi-Fi con el sensor.

La lectura de los datos se realizó en la plataforma *Azure* de *Microsoft*, la que corresponde a una plataforma IoT en la nube. La elección de esta plataforma se basó en que la empresa posee acceso ilimitado a la misma, lo que facilita el almacenamiento de datos y además permite visualizaciones en tiempo real de los datos que el sensor se encuentra midiendo.

El esquemático y la programación de dicha placa fue realizada por un ingeniero de la empresa. El esquemático general se presenta en la sección de Anexos.

2. Sensor GUVA-S12SD:

Para medir la radiación incidente en el filtro fotocatalítico se seleccionó un sensor ultravioleta de bajo costo, modelo *GUVA-S12SD*. Por lo general, se recomienda este sensor para usos en detección para ondas del espectro UVA y UVB, pero al consultar sus características (tabla 6.5), notamos que permite medir radiaciones desde el extremo final del espectro UVC hasta casi el final del espectro UVA.

Tabla 6.5: Características sensor GUVA-S12SD. Fuente: [32]

Característica	Mín.	Típico	Máx.
Corriente de oscuridad	-	-	1 [nA]
Fotocorriente	-	113 [nA]	-
Coefficiente de temperatura	-	0,08 [%/°C]	-
Responsividad	-	0,14 [A/W]	-
Rango de detección espectral	240 [nm]	-	370 [nm]

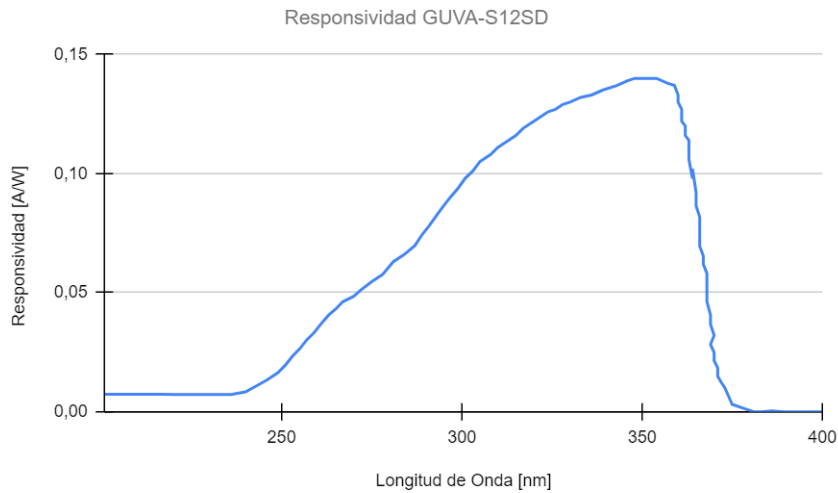


Figura 6.10: Responsividad sensor GUVA-S12SD. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de [32].

De la figura 6.10 se puede notar que la máxima responsividad del sensor se encuentra en valores cercanos a 350 [nm]. Con respecto a la longitud de onda que es pertinente para este trabajo (254 [nm]), el sensor no presenta valores de respuesta óptimos, por lo mismo, es que se decidió utilizar este sensor como una medida de control, para verificar la diferencia en radiación que existe entre encender 0, 1 o 2 lámparas.



Figura 6.11: Sensor GUVA-S12SD

La lectura del sensor se realizó a través de uno de los pines analógicos de un microcontrolador Arduino UNO (figura 6.12), el cual se programó mediante el código presentado en el Anexo D.

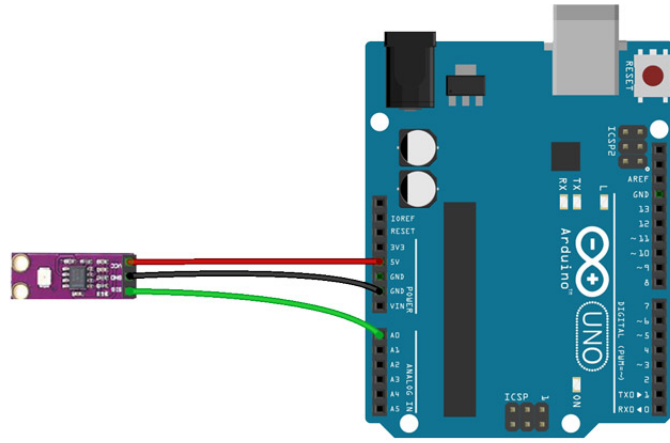


Figura 6.12: Conexión GUVVA-S12SD a Arduino UNO.

A grandes rasgos, la lectura analógica que el sensor entrega como salida, es transformada a voltaje según:

$$V_{out} [V] = \frac{L_a}{1024} \cdot 5.0 \quad (6.4)$$

Donde:

- V_{out} : voltaje de salida [V]
- L_a : lectura analógica.

Luego, según indicaciones del fabricante, el voltaje de salida se relaciona con la fotocorriente según:

$$F_c [\mu A] = \frac{V_{out}}{4,3} \quad (6.5)$$

Donde:

- F_c : fotocorriente [μA]

Finalmente, se recurre a la figura 6.13 para extraer la relación entre la fotocorriente y la irradiación medida por el sensor, resultando:

$$I [mW/cm^2] = \frac{F_c \cdot 1000}{113} \quad (6.6)$$

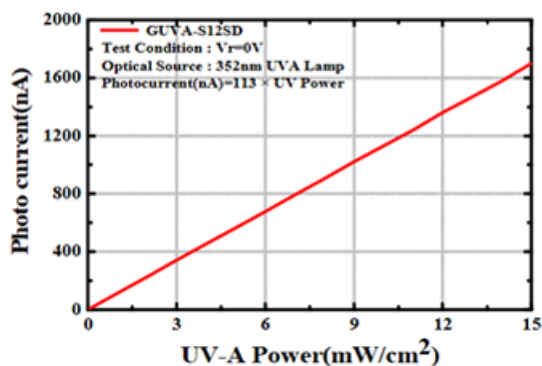


Figura 6.13: Curva de fotocorriente vs. irradiación para el sensor GUV-A-S12SD. Fuente: [33].

Es importante destacar que el valor 113 en la ecuación 6.6, no representa una ecuación válida de transformación entre corriente e irradiación y es exclusiva para el sensor que se utilizó.

6.2. Experimentación

Una vez construido el setup experimental, se pasó a la etapa de experimentación. En ella se adquirieron todos los datos necesarios para realizar los cálculos pertinentes y poder concluir el trabajo.

Para evaluar cada configuración estudiada, resulta útil tener en mente la tabla 6.6, que permite establecer límites y comprender el índice de compuestos entregado por el sensor de TVOC.

Para realizar los experimentos, se decidió considerar como umbral inferior un valor de índice de compuestos orgánicos de 200, debido a que las concentraciones se consideran como bajas a partir de este número. Como será visto en el análisis de resultados, hubo casos donde la caída en la concentración fue repentina y brusca, y en otros no se alcanzaron valores altos de concentración de contaminantes. Cada caso especial es analizado y explicado en detalle en la sección pertinente.

El procedimiento experimental seguido para cada uno de los experimentos correspondió a:

1. Encender el ventilador en el flujo correspondiente.
2. Encender el sistema de inyección de contaminantes.
3. Esperar hasta que la concentración de contaminantes alcance un nivel constante¹
4. Encender el reactor de fotocatalisis según la configuración correspondiente.

¹ De no lograrse un nivel constante alto, se tomaron consideraciones para cada caso

- Esperar hasta que la concentración de contaminantes alcance valores consistentemente bajo 200 en el índice de compuestos orgánicos volátiles totales.

Tabla 6.6: Niveles de contaminante según índice de TVOC. Fuente: elaboración propia con datos de Bluetek Global.

Índice	Presencia de TVOC
>400	Muy Alta Identificar fuente, evitar exposición y ventilar
300- 400	Alta Identificar fuente, evitar exposición prolongada y ventilar
200 - 300	Media Identificar fuente y evitar exposición prolongada, se recomienda ventilar
100 - 200	Baja
<100	Muy Baja

Decaimiento natural

Adicional a las pruebas a realizar dictadas por el método de Taguchi, se realizó una prueba de decaimiento natural del etanol en el circuito, con la finalidad de poder determinar la tasa de decaimiento natural del contaminante y poder usar esta en la ecuación 3.1.

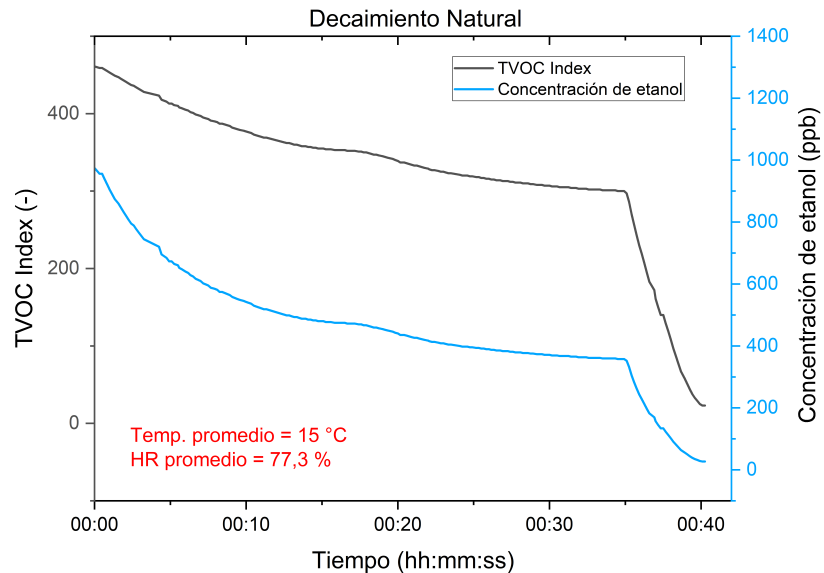


Figura 6.14: Concentración en el tiempo para el caso de decantación natural.

Mediante la curva presentada en la figura 6.14 y la ecuación 3.1, la tasa de decaimiento natural resultó:

$$k_n = 1,743 [h^{-1}] \quad (6.7)$$

Experimentos de Taguchi

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los 9 experimentos realizados:

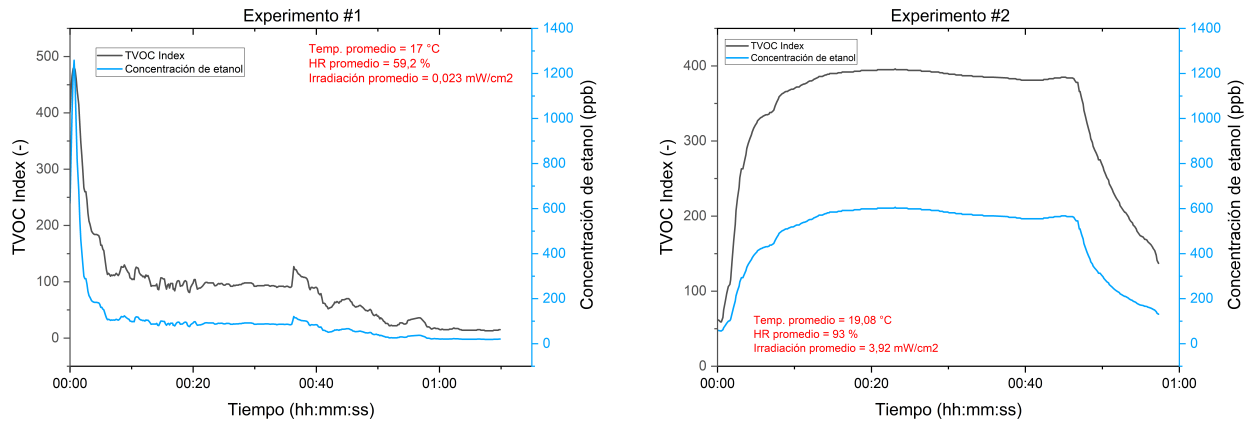


Figura 6.15: Concentración en el tiempo para los experimentos 1 y 2.

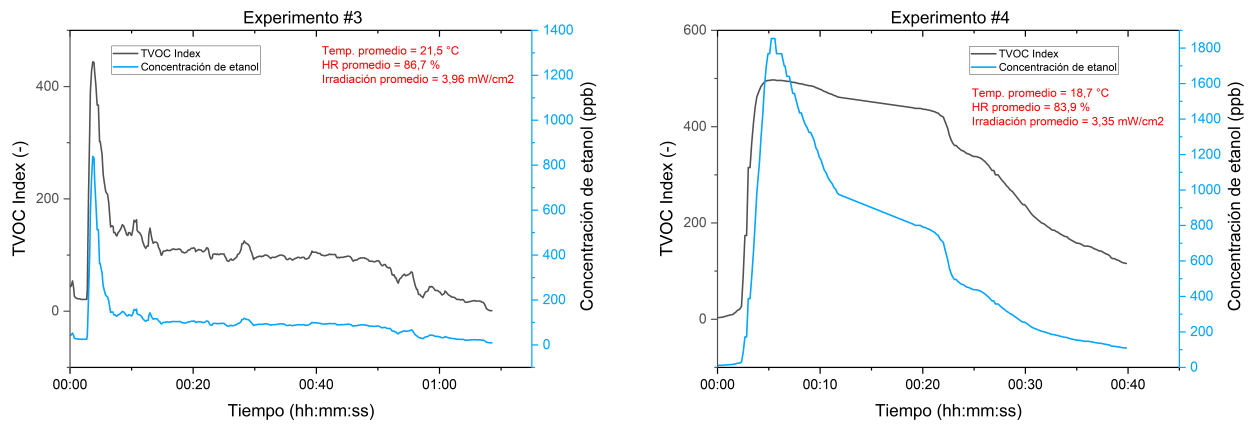


Figura 6.16: Concentración en el tiempo para los experimentos 3 y 4.

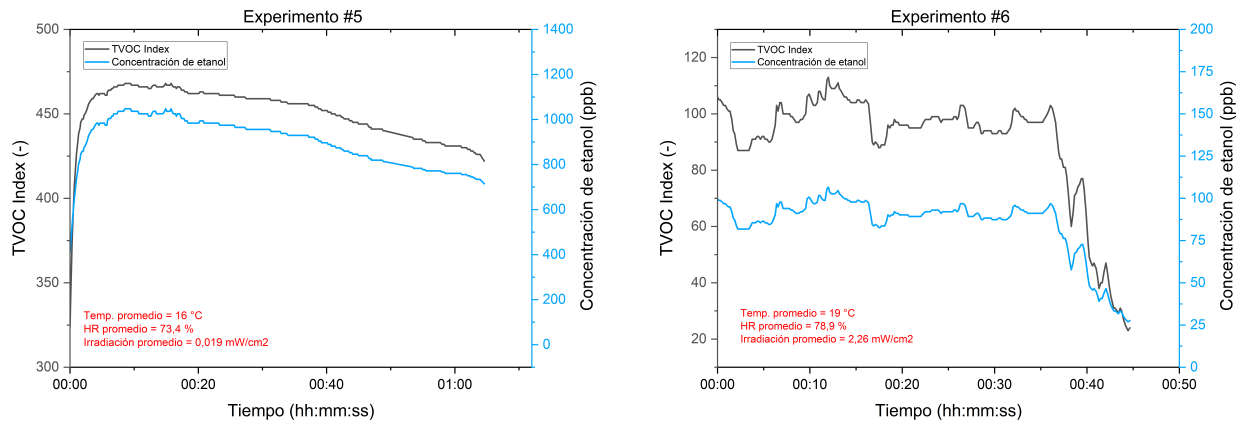


Figura 6.17: Concentración en el tiempo para los experimentos 5 y 6.

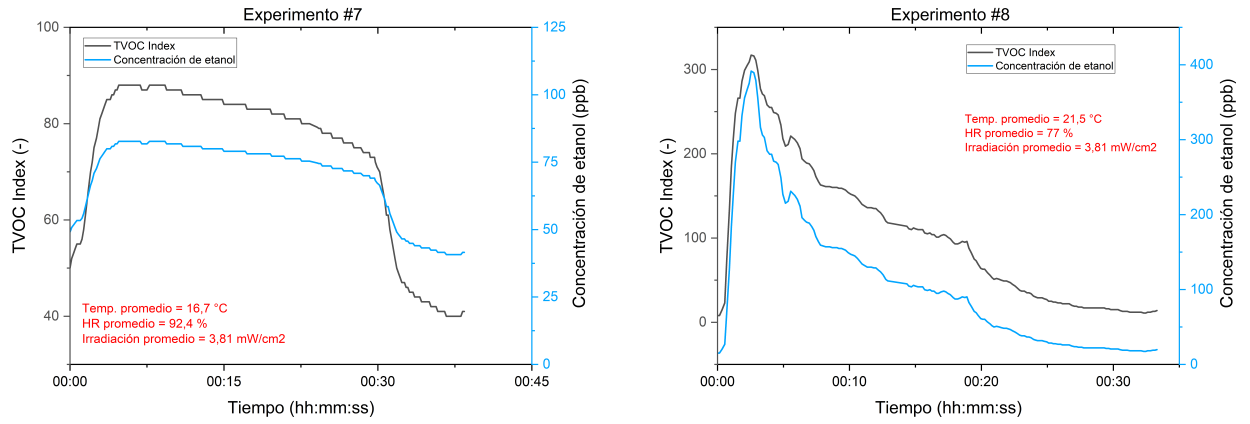


Figura 6.18: Concentración en el tiempo para los experimentos 7 y 8.

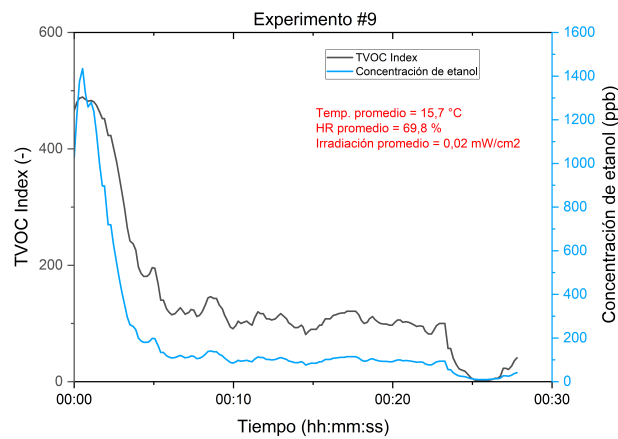


Figura 6.19: Concentración en el tiempo para el experimento 9.

A partir de las concentraciones en el tiempo para cada experimento, se calcularon las constantes de decaimiento de cada uno, en conjunto con la tasa de entrega de aire limpio de cada configuración:

Tabla 6.7: Resultados Experimentales.

Experimento	Constante de decaimiento [1/h]	CADR [m^3/h]
Natural	1,7425	0,0000000
1	1,8608	0,0035954
2	1,7524	0,0003016
3	2,6410	0,0273118
4	4,9079	0,0962166
5	0,2965	-0,0439538
6	1,7358	-0,0002033
7	1,3291	-0,0125644
8	6,4108	0,1418984
9	7,7933	0,1839200

Adicional al cálculo de los CADR, se calcularon las eficiencias de cada configuración. Dichos resultados no se presentan en esta sección debido a que no son representativos y pueden llevar a conclusiones erróneas. Se encuentran en el anexo A, en la tabla A.2.

6.3. Análisis de Resultados

6.3.1. General

Concentración en el tiempo

Para el caso del experimento de decaimiento natural (figura 6.14), se aprecia una caída abrupta en la concentración (aproximadamente a los 35 minutos). Lo anterior se debió a que una vez pasados 30 minutos, la concentración de etanol comenzó a ser muy baja (< 100 [TVOC index]), por lo que se cortó el suministro de contaminante, acorde al criterio establecido al momento de diseñar los experimentos.

A simple vista se puede notar que en gran parte de los experimentos (1,3, 6-9) no se logró una concentración estable alta de contaminantes. Para estos experimentos podemos separar los comportamientos en dos sub-grupos: (1) experimentos donde la concentración alcanzó niveles altos y descendió repentina y rápidamente, para luego alcanzar concentraciones estables bajas (1,3,8,9), y (2) experimentos donde la concentración no alcanzó niveles altos, pero sí concentraciones estables bajas (6,7).

El comportamiento del primero de estos grupos, en una primera aproximación no tiene relación alguna, ni en cuanto a flujo, ni en cuanto a ninguno de los otros tres factores en estudio. Para el caso de los experimentos 1 y 3, comparten la utilización del menor de los flujos y lo mismo ocurre para los experimentos 8 y 9, que utilizan el mayor de los flujos. Para el segundo grupo, nuevamente, a simple vista no existe relación alguna entre estos comportamientos similares.

Para realizar un análisis general, sumamos otro grupo a los anteriores, correspondiente a casos en que el comportamiento fue mas cercano a lo esperado (2,4,5). En cuanto al primer

grupo, la caída abrupta de concentración se puede explicar principalmente por dos razones: para los casos 8 y 9, al utilizar un flujo alto (comparado a los otros dos niveles), este es capaz de rápidamente combatir la concentración inicial alta de etanol, provocando que el sensor detecte rápidamente el contaminante, para luego mostrar una baja abrupta causada por el intenso flujo de aire.

Con respecto al segundo de los grupos (experimentos 6 y 7), se aprecia en las figuras 6.17 y 6.18, que no se alcanzan concentraciones altas en ningunos de los dos casos, llegando a valores aproximados de 100 y 80 [ppb] de etanol, respectivamente.

Por último, analizando los casos de comportamiento mas regulares (2, 4 y 5), en primer lugar, en la figura 6.17, se nota como la concentración alcanzada fue alta (aproximadamente 1100 [ppb]) y se mantuvo en valores altos durante toda la duración del experimento. Lo anterior concuerda con que en aquel caso, no se estaba produciendo, ni buscando producir, fotocátalisis. Luego, para el caso 4 (figura 6.16), a pesar de que existe una caída abrupta de la concentración en los primeros minutos de experimentación, se logró mantener en valores cercanos a un índice de 200. Finalmente, para el caso del experimento 2, se extrae de la figura 6.15, que se lograron concentraciones constantes, superiores a un índice de 300, por alrededor de 40 minutos. Luego de pasado este tiempo, se aprecia una caída significativa en la concentración.

Entre los últimos dos casos analizados (2 y 4), estos comparten el nivel del número de filtros (1 filtro). Comparativamente, el caso 4 fue realizado a un mayor flujo, a una menor distancia entre la fuente y el filtro y con una mayor cantidad de lámparas encendidas. Teniendo lo anterior en mente y las figuras 6.15 y 6.16, el único parámetro que no concuerda con la revisión bibliográfica, corresponde a que, a pesar de utilizar un mayor flujo, la degradación fue más rápida para el caso 4.

CADR

A partir de la tabla 6.7, se extrae que la mejor configuración, en cuanto a CADR, corresponde a la configuración 9, seguida por la configuración 8 y luego por la 4, que presenta un CADR de aproximadamente la mitad que la configuración 9. De estas tres configuraciones, solo una (4) corresponde a experimentos donde la combinación de factores representa el proceso fotocatalítico.

Notamos que existen tres casos (5-7) donde esta métrica resulta negativa, es decir, presentan un decaimiento mas lento que el decaimiento natural y por lo tanto, al recurrir a la ecuación 3.1, la diferencia entre la tasa natural y experimental es negativa. De los tres casos, dos (5,6), no corresponden a experimentos donde esté ocurriendo fotocátalisis. Al compararlos, sus tasas de entrega de aire limpio siguen el siguiente orden:

$$CADR_6 > CADR_7 > CADR_5 \quad (6.8)$$

Con respecto a estos tres experimentos, previo a los resultados, se esperaba que los casos 5 y 6, tuviesen tasas de entrega de aire limpio menores al caso 7. Lo anterior se cumplió parcialmente, ya que el peor rendimiento entre los tres (y global) lo tuvo la configuración 5.

Continuando con el análisis, como ya fue mencionado, el caso 4 corresponde a la mayor

tasa de entrega de aire limpio para los casos donde sí se está produciendo fotocatalisis, seguido por el caso 3. Estas dos configuraciones comparten la característica de que en ambas se utilizaron dos fuentes de radiación. El caso 3 presenta un CADR 71,61 % menor que el caso 4, aún cuando en el último de estos se utilizó solo un filtro fotocatalítico.

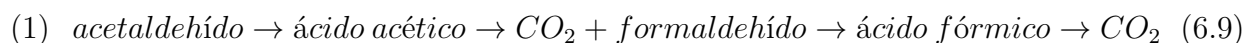
De manera general, existieron varios casos donde el CADR de configuraciones no fotocatalíticas fue mejor que para las catalíticas. Por ejemplo, comparando los casos 1 y 2, la diferencia en sus tasas es de un orden de magnitud, a pesar de que en el caso 2 esperaríamos resultados mejores, ya que el efecto fotocatalítico debería reducir los contaminantes de forma más eficiente.

El comportamiento antes mencionado puede tener diversas razones, pero se atribuyó de manera predominante a la falta de rigurosidad y equipos especializados para la validación experimental.

Los análisis que se presentan a continuación, se centran únicamente en los casos fotocatalíticos, esto es, los experimentos 2-4 y 7, debido a que se busca dar explicación a su comportamiento desde la perspectiva de la oxidación fotocatalítica. El resto de casos se vuelven a integrar en el análisis de Taguchi y en las conclusiones del trabajo.

Formación de sub - productos

La formación de sub-productos es un fenómeno que se debe tener en cuenta a la hora de estudiar sistemas de fotocatalisis. La degradación de etanol forma acetaldehído, que a su vez puede sufrir desorción u oxidación, a través de al menos dos caminos [35]:



La explicación en profundidad de estos caminos y reacciones escapa los alcances de este trabajo, pero si es importante tener en cuenta que estas dos reacciones pueden darse de manera parcial o total, dependiendo la efectividad de la reacción catalítica. De esta forma, cuando no se logra la total oxidación del contaminante, se generan sub-productos, que resultan ser compuestos orgánicos volátiles, y se tiene un resultado opuesto al deseado.

Para los casos fotocatalíticos, donde el CADR es menor al de los casos no fotocatalíticos, se puede atribuir dicho comportamiento a lo anterior, provocando que la tasa de formación de sub-productos supere a la tasa de degradación de contaminantes, luego, la entrega de aire limpio se ve disminuida.

Dadas las condiciones impuestas para la validación y el presupuesto que se tenía para realizarla, esta idea no se pudo confirmar, pero entrega una posible explicación a los fenómenos ocurridos.

Humedad relativa

El agua es una molécula importante en los procesos fotocatalíticos, y generalmente está presente, ya sea como solvente, reactante o producto. Influye en estos procesos de dos maneras [34]: por una parte es fundamental para la regeneración de los grupos hidroxilo en la superficie del catalizador y por lo tanto la formación de los mismos se ve favorecida en su presencia; por otro lado compite por los sitios de absorción en la superficie, limitando la absorción de VOCs.

El rol favorecedor o limitador del agua, depende de las concentraciones relativas de agua y VOCs, de sus absorciones a la superficie y del mecanismo por el cual el COV sea fotoquímicamente activado (oxidación directa con huecos o a través de $\cdot\text{OH}$) [36]. En la figura 6.20, se observa como el aumento de humedad relativa resulta beneficioso si la oxidación del contaminante se realiza mediante radicales hidroxilo y por otro lado, resulta perjudicial si la oxidación ocurre de forma directa, mediante huecos.

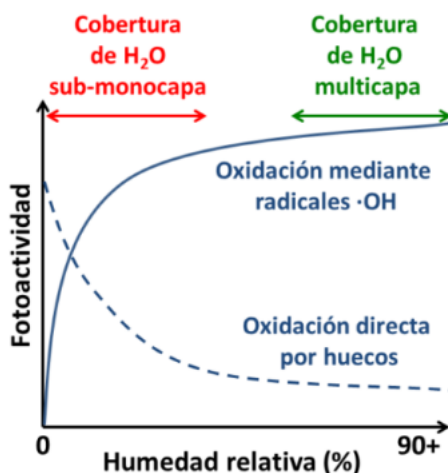


Figura 6.20: Comportamiento ideal de la fotoactividad frente a la humedad relativa. Fuente: [34]

Al consultar el trabajo realizado por Henderson en [36], se puede añadir que la funcionalidad que tiene el agua en el proceso catalítico se relaciona también con el contaminante que se esté tratando. Bajo esta misma línea, el autor establece que para el caso del etanol, se ha reportado que el agua tiende a actuar como bloqueadora de sitios de absorción, por lo que se podría esperar que ante un aumento en la humedad, el rendimiento del sistema disminuyera.

Al graficar las tasas de entrega de aire limpio con respecto a la humedad relativa promedio de los casos fotocatalíticos, excluyendo el caso que obtuvo un CADR negativo, se obtiene la figura 6.21, mediante la cual se observa que al aumentar la humedad relativa, disminuye el rendimiento del reactor, acorde a lo concluido en [36].

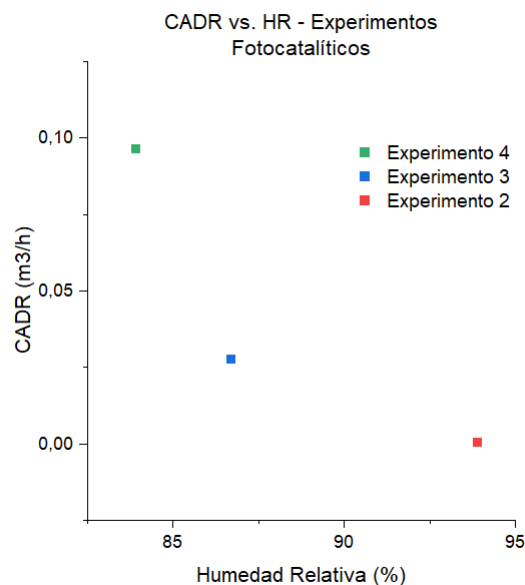


Figura 6.21: CADR frente a humedad relativa para casos fotocatalíticos.

6.3.2. Taguchi

Los pasos seguidos para realizar este análisis fueron los siguientes:

1. Identificar los factores que tienen mayor influencia en la respuesta del sistema.
2. Identificar el mejor nivel para cada factor.

Para identificar los factores que tienen mayor influencia en la respuesta del sistema, se consideró que lo que se busca es maximizar la respuesta del sistema, en este caso, la tasa de entrega de aire limpio.

A partir de las tasas de entrega de aire limpio, se calculó la relación de señal-ruido para cada experimento (ecuación A.2) y luego el promedio de dicha relación para cada nivel y factor. De esta forma se obtuvo la tabla de respuestas para las relaciones de señal-ruido, la que permitió ordenar los factores según su influencia en la respuesta.

Tabla 6.8: Influencia de factores en la respuesta del sistema

Nivel	Promedio de relación señal-ruido			
	Flujo	Distancia UV	# Filtros	# UV
1	-102,24	-98,30	-94,55	-96,16
2	-98,30	-97,56	-57,47	-136,99
3	-56,74	-61,42	-105,26	-24,12
Delta	45,51	36,88	47,68	112,86
Orden	3	4	2	1

De la tabla 6.8, se concluye que el factor de mayor influencia corresponde a la cantidad

de lámparas, seguido por la cantidad de filtros, el flujo y finalmente la distancia lámpara-filtro

Siguiendo con el análisis, se realizó una gráfica de efectos principales para las relaciones S/N:

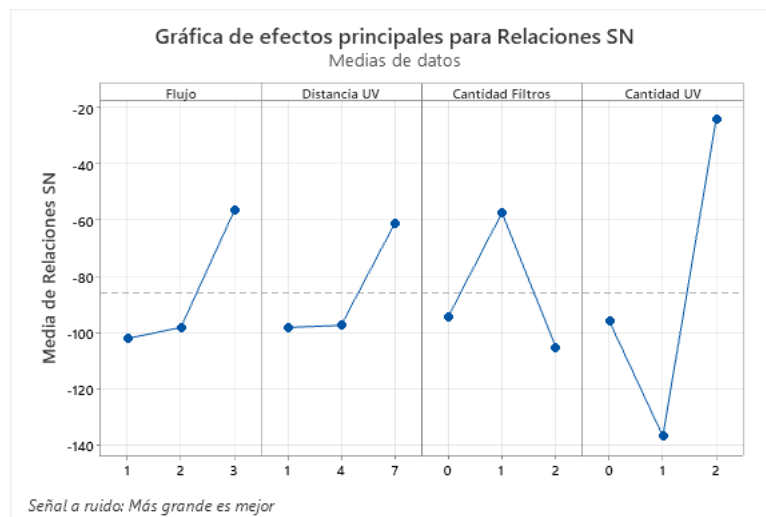


Figura 6.22: Efectos principales para relaciones S/N

Para el caso del flujo, el mejor nivel correspondió al nivel 3, es decir, el mayor de los flujos, lo que concuerda con que las dos mejores configuraciones utilizaron este flujo. Observando la misma curva, la pendiente entre los flujos bajo y medio es pequeña, lo que demuestra que el sistema es indiferente frente a estos dos niveles.

Continuando con la distancia entre las lámparas y el catalizador, se aprecia que la distancia óptima correspondió a 70 [mm] entre ellos. De manera similar al caso del flujo, el sistema no presenta variaciones significativas frente a los niveles de distancia 10 y 40 [mm].

Con respecto a la cantidad de soportes para catalizador, el nivel que maximiza la respuesta correspondió a utilizar un solo filtro, seguido por la utilización de 0 y luego de 2.

En cuanto a la cantidad de fuentes de radiación, es claro que el nivel óptimo correspondió a utilizar dos fuentes, nivel que presenta una amplia diferencia con los otros dos. Le siguen a este nivel no usar fuentes de radiación y finalmente utilizar solo una.

De esta forma, el análisis recién realizado permite establecer que la configuración óptima, que maximizaría el CADR del sistema correspondería a:

Flujo	Distancia UV-catalizador	# Filtros	# UV
Alto	70 [mm]	1	2

Capítulo 7

Conclusiones

En el trabajo realizado, se logró diseñar y evaluar experimentalmente un prototipo de purificador de aire basado en la tecnología de oxidación fotocatalítica. El proyecto significó más de 5 meses de trabajo, desde la planificación hasta la experimentación, que representó la parte más importante del desarrollo, permitiendo evaluar la tecnología en estudio y apreciar su comportamiento con respecto a la degradación del etanol.

A pesar de diversas dificultades que se tuvieron a lo largo del desarrollo y a no contar con todos los equipos y las facilidades para desarrollarlo, los resultados permitieron comprender la fotocatalisis y su análisis entregó valiosa información que permite sentar las bases para futuros estudios y ampliaciones del proyecto.

En específico, se concluye que para las configuraciones estudiadas, la tecnología no representa un aporte real a la purificación del aire, si en el espacio que se quiere tratar existe la posibilidad de realizar ventilación natural o forzada. Para los casos donde lo anterior no es posible, la oxidación fotocatalítica podría representar una alternativa efectiva a la hora de enfrentarse a distintos contaminantes.

A partir de los resultados, se encontró que los dos factores que tienen un mayor impacto en el rendimiento de la tecnología corresponden a la cantidad de fuentes de radiación que se use y la cantidad de soportes para el catalizador. Además de lo anterior, la configuración óptima resultó ser: mayor nivel de flujo, distancia entre la fuente de radiación y el catalizador de 7 [cm], un solo soporte para el catalizador y dos fuentes de radiación (36 [W]). Las diferencias y contradicciones experimentales obtenidas se atribuyeron principalmente a la falta de equipos especializados a la hora de validar el prototipo, a la formación de sub-productos y al comportamiento dual del agua en los procesos fotocatalíticos.

Con respecto a la posibilidad de fabricación de un dispositivo de bajo costo y de la mano de la conclusión anterior, se establece que esto aún no es posible y el lograrlo significa un nuevo desarrollo, en cuanto a modificaciones de diseño y nuevos estudios experimentales, con equipos especializados.

Finalmente, y de forma más general, el trabajo realizado significó la aplicación de un gran número de conocimientos, de las áreas de fluidos, diseño y manufactura y también representó la adquisición de nuevos conocimientos en áreas como electrónica, experimentación y química.

Trabajos Futuros

A la hora de evaluar el prototipo, se enfrentó el desafío de que no existen estándares para realizar esta tarea. Si bien existen lineamientos y recomendaciones, la forma de evaluar sistemas de purificación no se encuentra generalizada ni establecida, y muchas veces, los métodos son específicos para un tipo de purificador o tecnología. El desarrollo de un estándar de evaluación significaría un gran avance para el tema, permitiendo la comparación objetiva de este tipo de dispositivos.

De manera específica, para continuar con el análisis de rendimiento del sistema, resultaría útil evaluarlo frente a otros contaminantes, para comprender y apreciar el comportamiento del sistema frente a ellos. Sumado a esto, resulta indispensable para futuros análisis la medición de sub-productos que el sistema pueda estar generando, así como también la medición del dióxido de carbono que se está emitiendo luego de la oxidación de los contaminantes.

Bajo la misma línea, para futuros estudios, es importante el utilizar equipamiento profesional dedicado para medir la intensidad de la energía radiante, como lo son los radiómetros, con el fin de relacionar de manera correcta este parámetro con los resultados obtenidos.

En cuanto al diseño y según lo aprendido en este trabajo, de existir un replanteamiento del proyecto, se debe poner especial atención a la forma de catalizador que se va a usar. En caso de que se siga utilizando un soporte tipo placa, comparar el rendimiento del sistema variando el espesor del soporte, agrega una arista al estudio que no fue estudiada en el presente. De decidir utilizar una configuración tipo anular, el diseño puede estar basado en productos como los presentados en las referencias [37], [38] y [39].

Bibliografía

- [1] Report to Congress on indoor air quality. Volume 2. Assessment and control of indoor air pollution. Final report. 1989. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. <https://www.osti.gov/biblio/6958939>
- [2] The Inside Story: A Guide to Indoor Air Quality. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. [UnitedStatesEnvironmentalProtectionAgency](https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq).
- [3] Contaminación del aire doméstico y salud. 2022. Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- [4] Gupta, P., Rathore, V. (2021). Study of TiO₂ material: A photocatalyst for contrary pollutants. *Materials Today: Proceedings*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320409162>
- [5] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el trabajo. (n.d.). Radiaciones ópticas . Portal INSST. <https://www.insst.es/materias/riesgos/riesgos-fisicos/radiaciones-opticas>
- [6] Ecodelsa. (2020). Luz Ultravioleta UV-C Desinfección Virus y Bacterias. <https://ecodelsa.com/luz-ultravioleta-uv-c-desinfeccion-virus-y-bacterias/>
- [7] ASHRAE. (2016). Chapter 17: Ultraviolet Lamp Systems. In *Handbook—HVAC Systems and Equipment*. Extraído de: https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/covid-19/i-p_s16_ch17.pdf
- [8] SENSIRION. (2023). Compliance of Sensirion’s VOC Sensors with Building Standards. https://sensirion.com/media/documents/4B4D0E67/6436C169/GAS_AN_SGP4x_BuildingStandards_D1.pdf
- [9] Rojas, S. (2019). Riesgo Fotobiológicos de las fuentes de Luz Artificiales. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. <http://repositorio.ucv.cl/handle/10.4151/90713>
- [10] Ren, H., Koshy, P., Chen, W.-F., Qi, S., Sorrell, C. C. (2017). Photocatalytic materials and technologies for Air Purification. *Journal of Hazardous Materials*, 325, 340–366. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.08.072>
- [11] Mo, J., Zhang, Y., Xu, Q., Lamson, J. J., Zhao, R. (2009). Photocatalytic purification of volatile organic compounds in indoor air: A literature review. *Atmospheric Environment*, 43(14), 2229–2246. [doi:10.1016/j.atmosenv.2009.01.03](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.03)
- [12] Sánchez, B., Sánchez-Muñoz, M., Muñoz-Vicente, M., Cobas, G., Portela, R., Suárez, S., Amils, R. (2012). Photocatalytic elimination of indoor air biological and chemical pollution in realistic conditions. *Chemosphere*, 87(6), 625–630. [doi:10.1016/j.chemosphere.2012.01.050](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.01.050)
- [13] Vohra, A., Goswami, D. Y., Deshpande, D. A., Block, S. S. (2006). Enhanced photocatalytic disinfection of indoor air. *Applied Catalysis B: Environmental*, 64(1-2), 57–65.

[doi:10.1016/j.apcatb.2005.10.025](https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2005.10.025)

- [14] Hay, S., Obee, T., Luo, Z., Jiang, T., Meng, Y., He, J., Murphy, S., et al. (2015). The Viability of Photocatalysis for Air Purification. *Molecules*, 20(1), 1319–1356. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules20011319>
- [15] Enviromental Group Inc. Reme Halo Zero. <https://rgf.com/products/phi-air-purification/remehalozero-whole-home-in-duct-air-purifier/>
- [16] Vitesy. Natede Smart. <https://vitesy.com/natede-smart>
- [17] AirOasis. Ionic Air Purifier. <https://www.airoasis.com/products/ionicair-uv-purifier>
- [18] EnviroKlenz. Air System. <https://enviroklenz.com/air/>
- [19] Taranto, J., Frochot, D., Pichat, P. (2009). Photocatalytic Air Purification: Comparative efficacy and pressure drop of a tio2-coated thin mesh and a honeycomb monolith at high air velocities using a 0.4m3 close-loop reactor. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586609000926>
- [20] Ao, C.H., Lee, S.C. (2005). Indoor air purification by photocatalyst TiO2 immobilized on an activated carbon filter installed in an air cleaner. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009250904005020>
- [21] Ginestet, A., Pugnet, D., Rowley, J., Bull, K., Yeomans, H. (2005). Development of a new photocatalytic oxidation air filter for aircraft cabin. *Indoor air*, 15(5), 326–334. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00369.x>
- [22] Destailats, H., Sleiman, M., Sullivan, D., Jacquiod, C., Sablayrolles, J., Molins, L. (2012). Key parameters influencing the performance of photocatalytic oxidation (PCO) air purification under realistic indoor conditions. *Applied Catalysis B: Environmental*. 128. 159–170. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926337312001178>
- [23] Wang, Shaobin., Ang, H., Tade, Moses. (2007). Volatile Organic Compounds in Indoor Environment and Photocatalytic Oxidation: State of the Art. *Environment international*. 33. 694-705. [10.1016/j.envint.2007.02.011](https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.02.011).
- [24] Naranjo-Palacios, F., Rios-Lira, A., Pantoja-Pacheco, Y., Tapia-Esquivias, M. (2020). Diseños ortogonales de Taguchi fraccionados. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 21(2), e1621. Epub 13 de noviembre de 2020. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21n2.011>
- [25] PFB0812UHE Axial Fan Specs Sheet. Mouser Electronics. <https://www.mouser.com/datasheet/2/632/PFB0812UHE-1591856.pdf>
- [26] Datos técnicos lámpara HNS L 18W 2G11. OSRAM. https://www.osram.es/ecat/PURITEC%20HNS%20UV-C-UV-C%20lamps%20for%20purification-L%C3%A1mparas%20ultravioleta-Industry-Iluminaci%C3%B3n%20especial/es/es/GPS01_1028570/ZMP_86478/
- [27] Ginestet A., Development and evaluation of a new test method for portable air cleaners. (2012). https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/CR/CR15_New%20test%20method%20for%20portable%20air%20cleaners.pdf
- [28] SEN54x. SENSIRION. <https://sensirion.com/products/catalog/SEN54>
- [29] QT-ECO 1X18...24 S. Inventronics. <https://www.inventronics-light.com/ecat/QUICKTRONIC%20ECONOMIC-ECG%20for%20FL%20and%20CFL,%20not%20dimmabl>

e-ECG%20for%20fluorescent%20and%20compact%20fluorescent%20lamps-Electronic%20Control%20Gears%20for%20Lamps-OSRAM%20Products/com/en/GPS01_1028007/ZMP_56450/

- [30] Atomizador 5V. Mercado Libre. https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-988819138-generator-de-niebla-ultrasonico-atomizador-usb-micro-diy-_JM?matt_tool=89697689&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14571116355&matt_ad_group_id=147521169744&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=619416244281&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=114571792&matt_product_id=MLC988819138&matt_product_partition_id=2005837051117&matt_target_id=pla-2005837051117&gclid=Cj0KCQjwrMKmBhCJARIsAHuEAPTdMsQp7i9MzPoDCKUjiwCV-5KUC4Z8GmLbHUKickcBxbIV56room8aApSmEALw_wcB9k.
- [31] Compliance of Sensirion's VOC Sensors with Building Standards. (2023). Sensirion. https://sensirion.com/media/documents/4B4D0E67/6436C169/GAS_AN_SGP4x_BuildingStandards_D1.pdf
- [32] GUVVA-S12SD Technical Data. (2011). Roithner LaserTechnik. <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/1918guva.pdf>
- [33] Brooks, D. Arduino-Based Uv Measurements. (2021). Institute for Earth Science Research and Education. <https://instesre.org/ArduinoBook/UVmeasurements.pdf>
- [34] Sanz Carrillo, D. (2020). Desarrollo de fotocatalizadores activos bajo luz visible para la degradación de COVs (Doctor). Universidad de Zaragoza. <https://zaguan.unizar.es/record/87523/files/TESIS-2020-035.pdf>
- [35] Muggli, D., McCue, J., Falconer, J. (1998). Mechanism of the Photocatalytic Oxidation of Ethanol on TiO₂. Journal of Catalysis, 173, 470-483. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021951797919461#:~:text=Part%20of%20the%20ethanol%20reacts,formic%20acid%20%E2%86%92%20CO2>.
- [36] Henderson, M. (2011). A surface science perspective on TiO₂ photocatalysis. Surface Science Reports, 66, 185-297. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167572911000100>
- [37] Residential Photohydroionization Air Disinfection Purifier. Alibaba. https://www.alibaba.com/product-detail/Residential-Photohydroionization-Air-Disinfection-Purifier-induct_1600330412464.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.40361c58rc2kln
- [38] PHI - UVGI AIR Steriliser. Alibaba. https://www.alibaba.com/product-detail/PHI-UVGI-AIR-Steriliser_1600732594813.html?spm=a2700.details.0.0.794242bdSuqixE
- [39] All Aluminium UV-C + TiO₂ Photocatalysis Air Sterilizer and Purifier. ECVV. <https://www.ecvv.com/product/1029756.html>

Anexo A

Memoria de Cálculo

Constantes de decaimiento

Para el cálculo de las constantes de decaimiento, los valores utilizados correspondieron a:

Tabla A.1: Datos utilizados para calcular las tasas de decaimiento.

Experimento	C_{to} [ppb]	C_{ti} [ppb]	Tiempo [hr]
Natural	974,45	357,79	0,575
1	110,53	24,50	0,810
2	521,31	130,96	0,788
3	102,65	9,69	0,893
4	1853,97	109,53	0,576
5	1014,69	714,49	1,014
6	99,74	27,69	0,738
7	82,72	41,55	0,518
8	391,54	19,76	0,466
9	1434,33	41,55	0,356

Eficiencias

Para el cálculo de las eficiencias se utilizó la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{C_{to} - C_f}{C_{to}} \quad (\text{A.1})$$

Donde:

- η : eficiencia [%]
- C_{to} : Concentración inicial [ppb]
- C_f : Concentración final [ppb]

Los resultados obtenidos para cada configuración fueron los siguientes:

Tabla A.2: Eficiencias de cada configuración.

Experimento	η [%]	Tiempo [h:mm:ss]
1	86,16	1:09:50
2	74,88	0:57:18
3	89,03	1:08:30
4	94,09	0:39:50
5	25,96	1:04:35
6	72,24	0:44:39
7	49,77	0:38:25
8	94,95	0:33:18
9	99,32	0:27:48

Relación señal-ruido

$$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (\text{A.2})$$

Anexo B

Planos

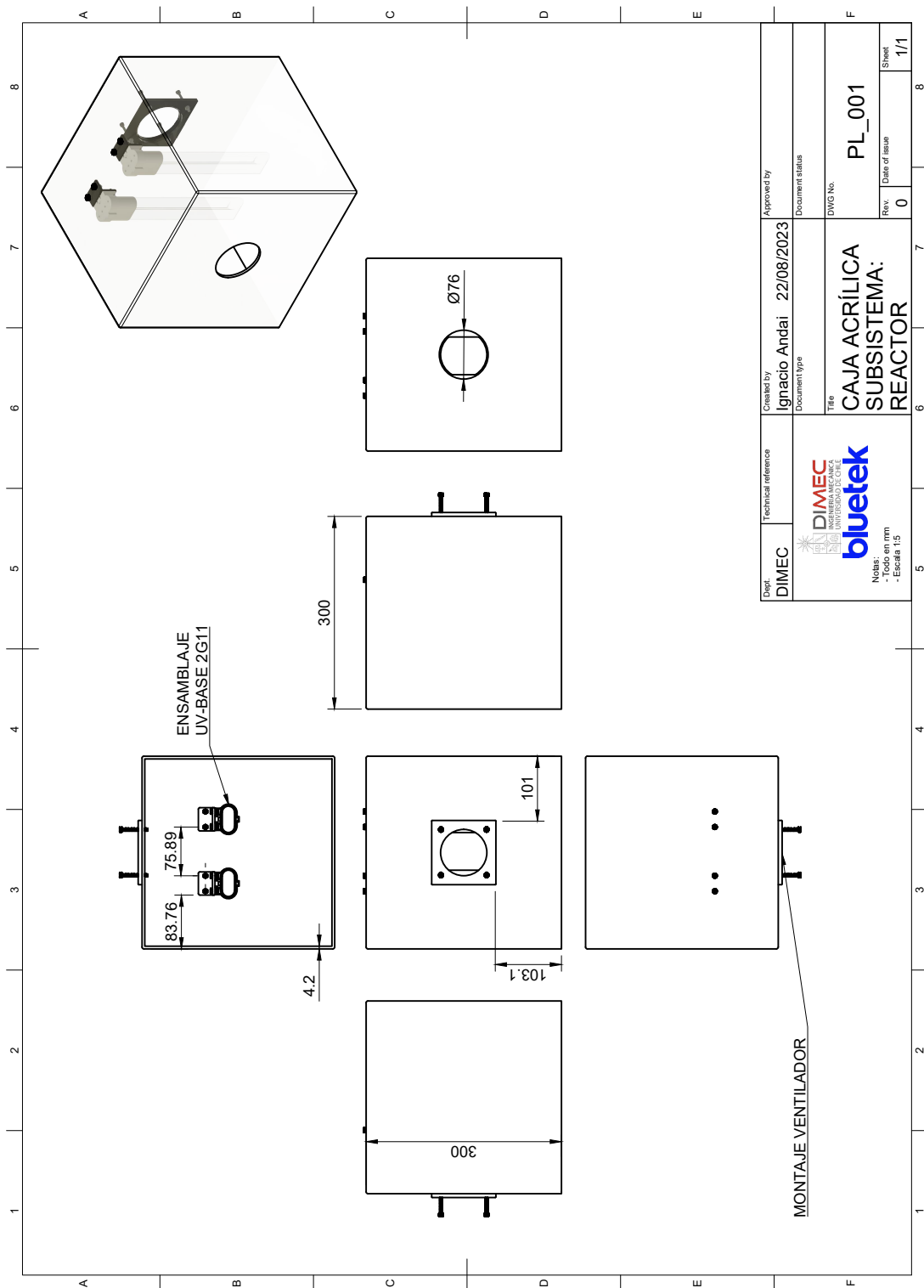


Figura B.1: Plano caja acrílica y disposición accesorios.

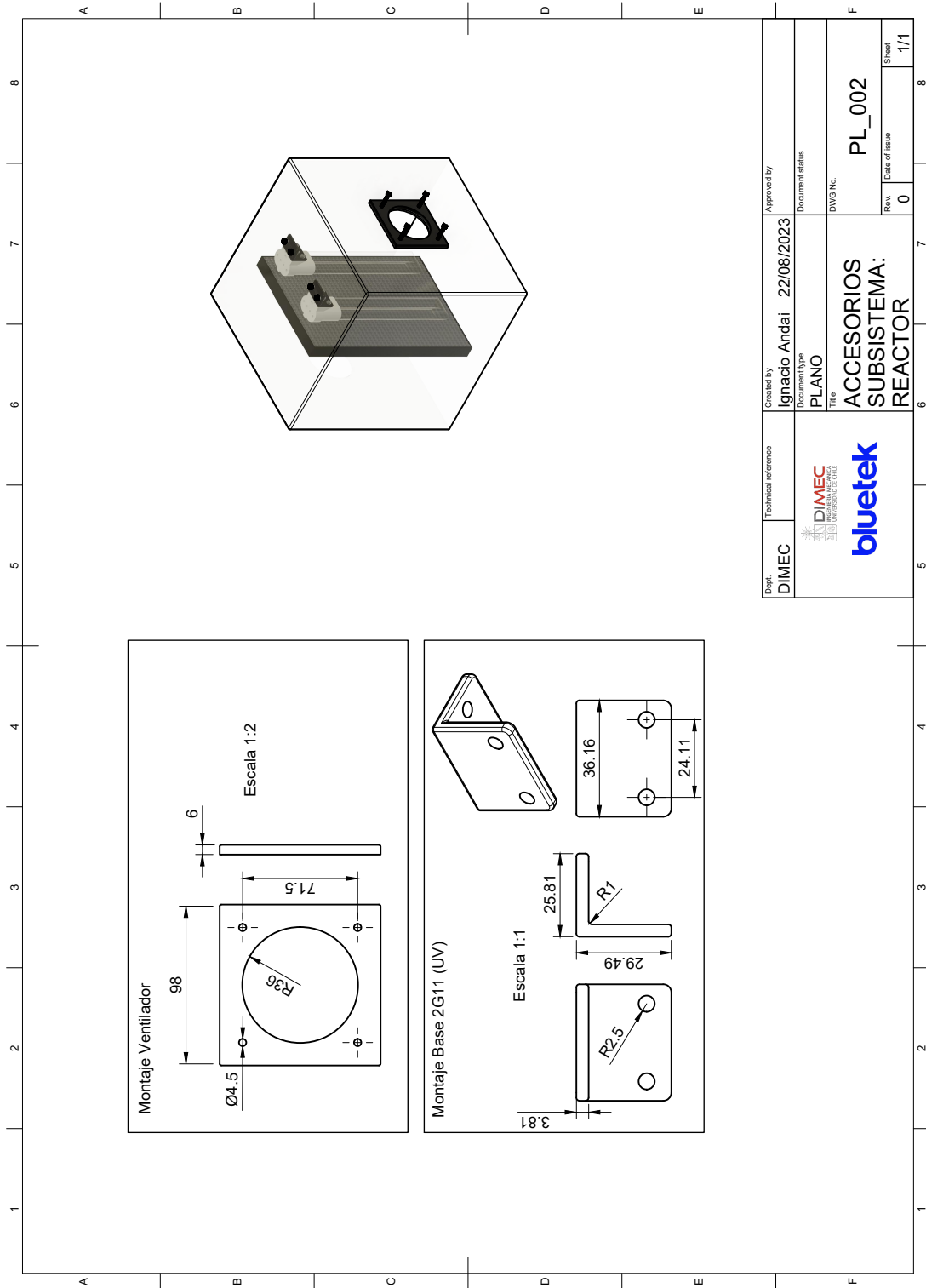
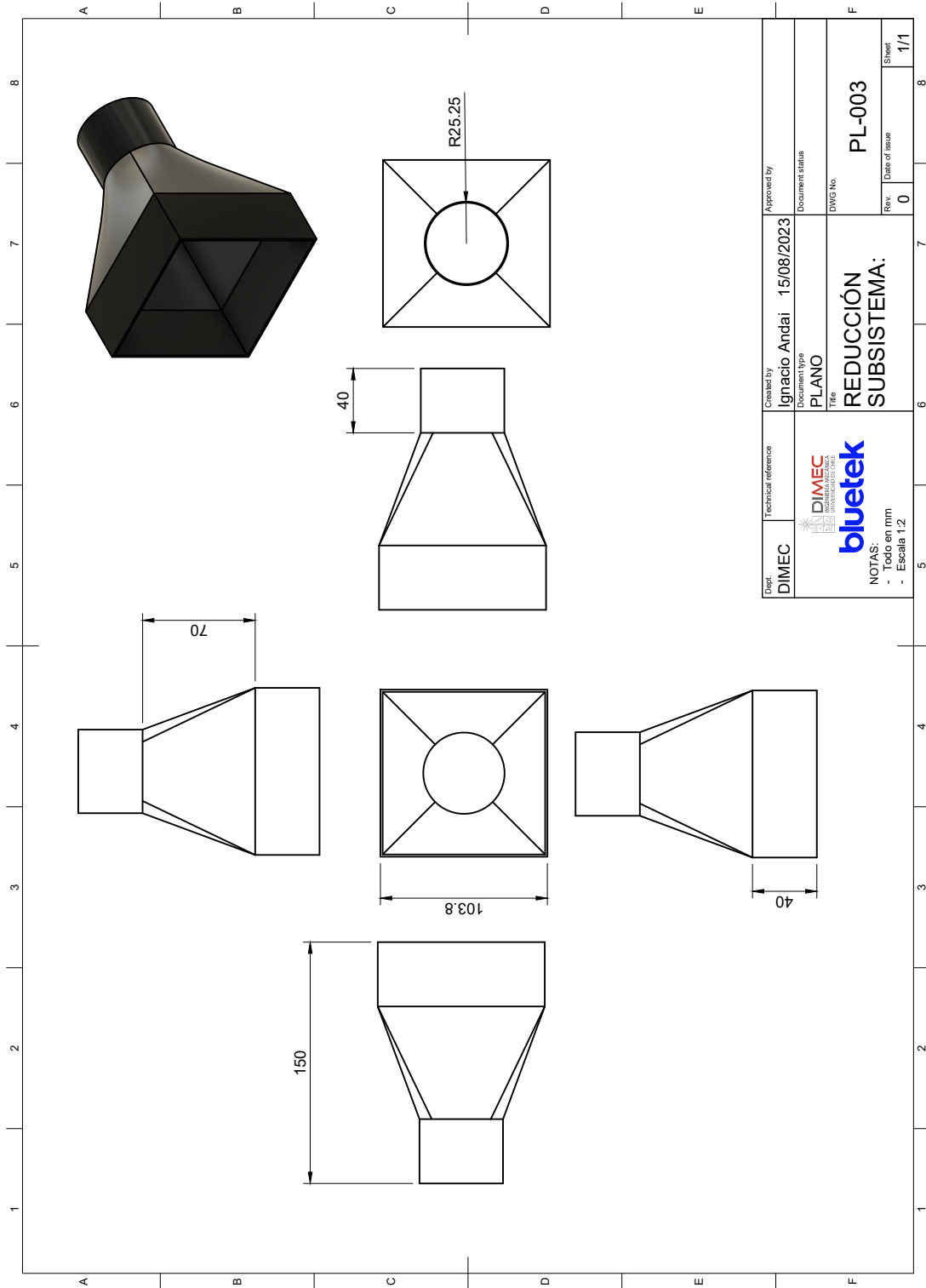


Figura B.2: Plano accesorios caja de montaje.



Dept. DIMEC	Technical reference	Created by Ignacio Andai	Approved by
		15/08/2023	
		Document type PLANO	Document status
		Title REDUCCIÓN SUBSISTEMA:	DWG No. PL-003
		NOTAS: - Todo en mm - Escala 1:2	Rev. 0 Date of issue
			Sheet 1/1

Figura B.3: Plano reducción para acople.

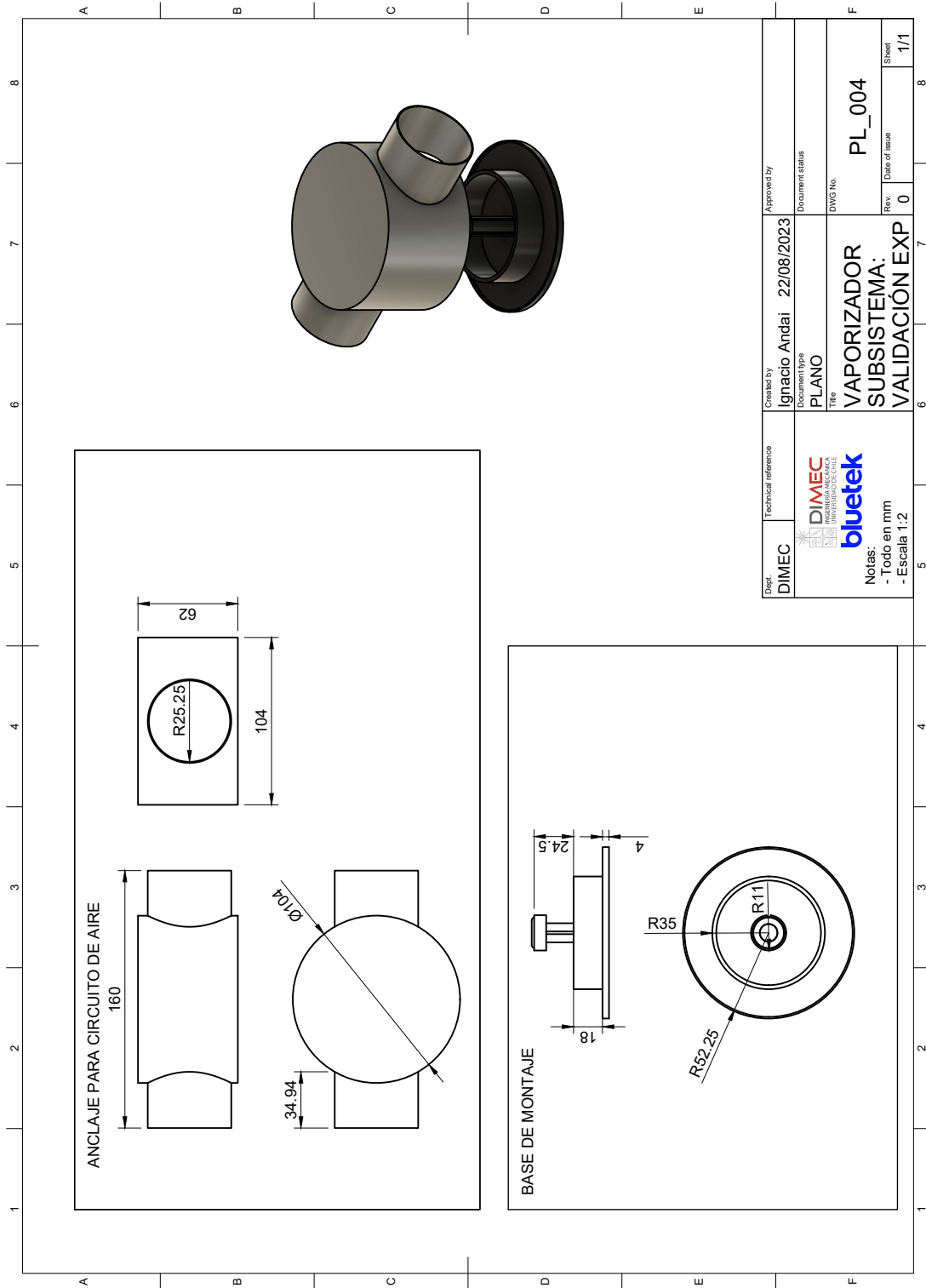


Figura B.4: Plano sistema inyección contaminantes. Detalle anclaje y atomizador.

Anexo C

Código sensor ultravioleta

Código C.1: Código sensor GUVA-S12SD.

```
27 float sensorVoltage;
28 float sensorValue;
29 float fotocurrent;
30 float Irradiance;
31
32 void setup() {
33   Serial.begin(9600);
34   pinMode(A1, OUTPUT);
35 }
36
37 void loop() {
38   sensorValue = analogRead(A1);
39   sensorVoltage = sensorValue / 1024 * 5.0;
40   fotocurrent = sensorVoltage/4.3;
41   Irradiance = fotocurrent/113 * 1000;
42   //Serial.print(" sensor reading = ");
43   Serial.print(sensorValue);
44   Serial.print(",");
45   //Serial.print(" sensor voltage [V] = ");
46   Serial.print(sensorVoltage,4);
47   Serial.print(",");
48   //Serial.print(" Irradiance [muA] = ");
49   Serial.print(fotocurrent,4);
50   Serial.print(",");
51   //Serial.print(" Power [mW/cm2] = ");
52   Serial.println(Irradiance,4);
53   delay(1000);
54 }
```

Anexo D

Esquemático

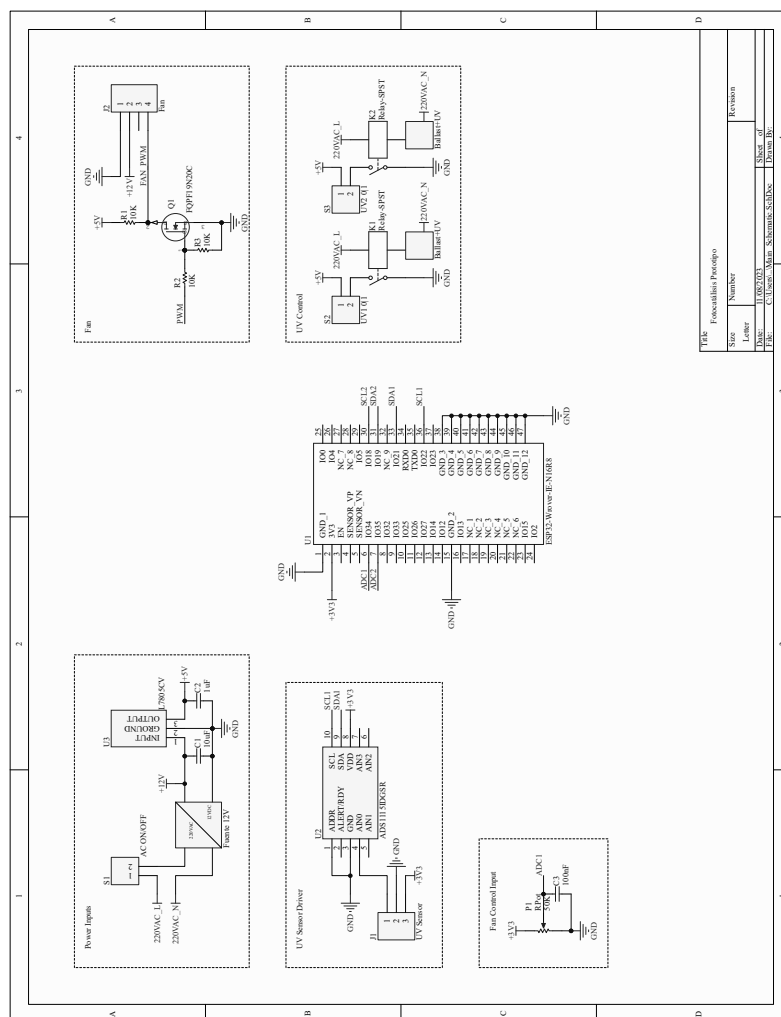


Figura D.1: Esquemático general del sistema.

Anexo E

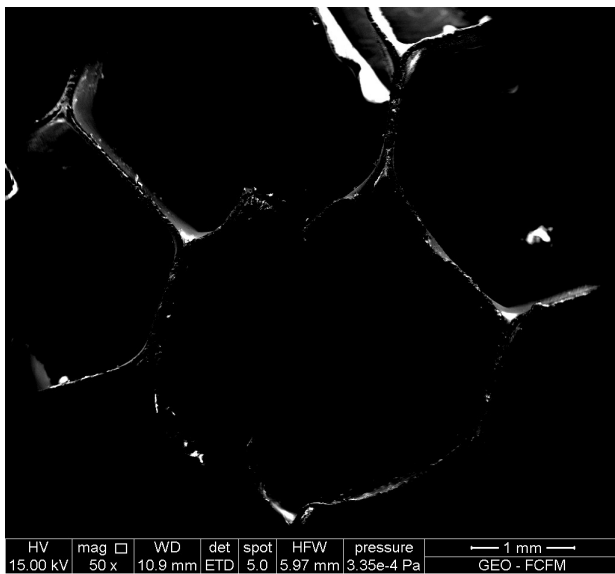
Desglose de costos

Item	Descripción	Valor Unitario [CLP]	Cantidad	Valor Neto [CLP]	Proveedor/Marca
Caja acrílica	Caja acrílica para montaje	\$0	1	\$0	Acrílicos Pro
Lámpara UV	Lámpara germicida Puritec HNS L 18W 2G11 OSRAM	\$13.440	2	\$26.880	Medlight
Ballast	Ballast Electrónico QT-ECO 1x18-24/220-240 S	\$12.240	2	\$24.480	Medlight
Base para Tubo UV	Base 2G11 Paralela	\$1.200	2	\$2.400	Medlight
Filtro TiO2	Soporte de estructura Honeycomb con recubrimiento de TiO2 200x300x20 mm	\$4.356	2	\$8.711	Compo Shenzhen Tech Co,
Fuente de Poder	Fuente de poder 12V, 5A, 60W	\$5.690	1	\$5.690	MercadoLibre
Caja para conexiones	Caja plástica para conexiones eléctricas	\$19.463	1	\$19.463	MercadoLibre
MDF Dimensionado	Base de MDF dimensionado, 30x30 cm x 12 mm espesor	\$1.790	1	\$1.790	Homecenter Sodimac
Ventilador	Ventilador axial 12V	\$0	1	\$0	Delta Electronics
Perno Parker M4x8		\$226	8	\$1.808	Pernos KIM
Perno Parker M4x40		\$1.000	4	\$4.000	Pernos KIM
Tuerca Hexagonal M4		\$26	12	\$311	Pernos KIM
				TOTAL	\$95.533 CLP
					109,67 USD

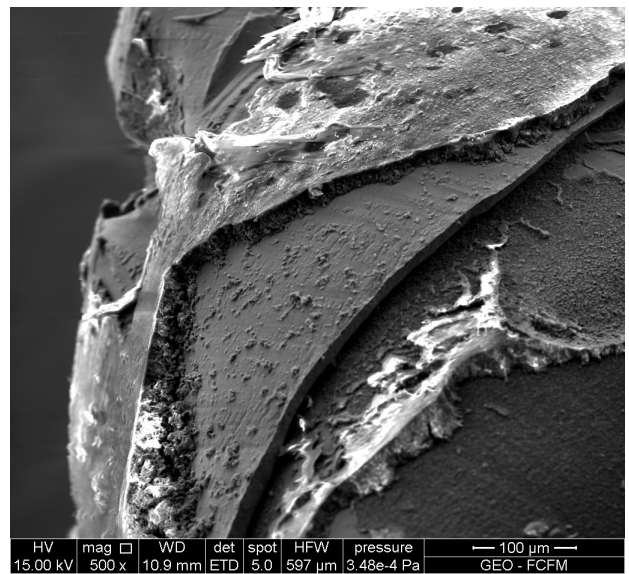
Figura E.1: Desglose de costos

Anexo F

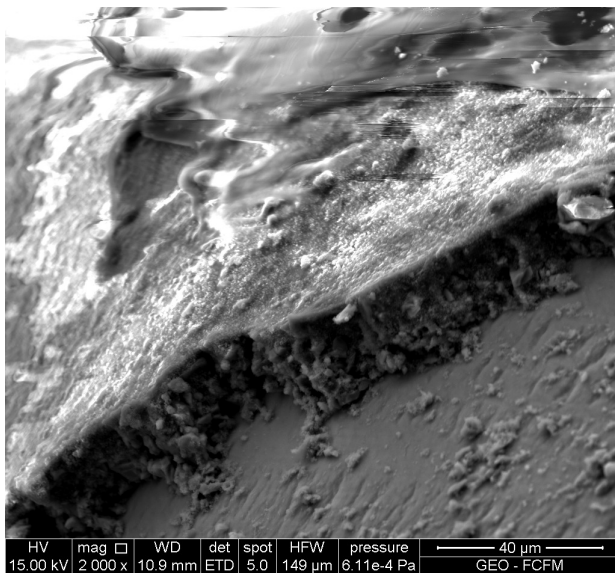
Imágenes SEM



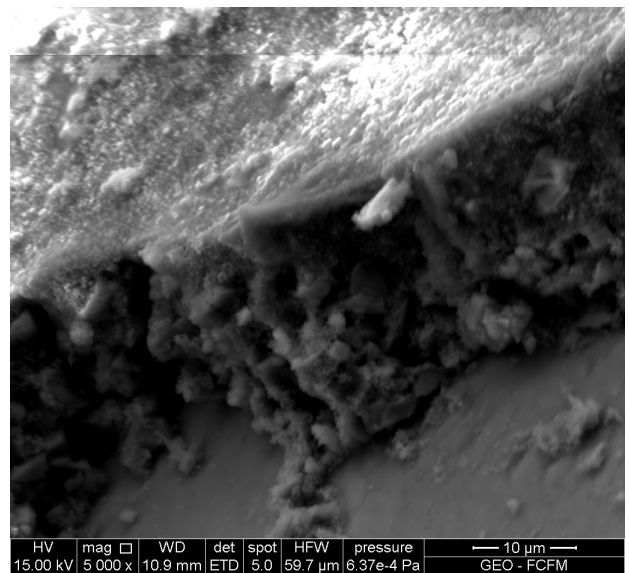
(a) 50x



(b) 500x



(c) 2000x



(d) 5000x

Figura F.1: Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) del soporte del catalizador