



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA.

“Integración de un banco de ozonización para
investigaciones en tratamiento de agua.”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniero civil

PRESENTA:

Arturo Ayala González

ASESOR DE TESIS:

Dr. En I.Q. Cheikh Fall

Toluca de Lerdo, Estado de México.

Septiembre 2024

ÍNDICE

<i>Índice de Tablas</i>	<i>vi</i>
<i>Índice de Figuras</i>	<i>viii</i>
<i>Abreviaturas y símbolos</i>	<i>x</i>
<i>Resumen</i>	<i>xiv</i>
<i>Introducción</i>	<i>1</i>
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1 Definición del problema	3
1.2 Justificación	4
1.3 Objetivos	7
Objetivo general	7
Objetivos específicos	7
1.4 Hipótesis	7
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	9
2.1 El ozono	9
2.1.1 Generalidades sobre el ozono y su generación	9
2.1.2 Propiedades químicas y físicas del ozono	11
2.1.3 Aplicaciones del ozono	13
2.1.3.1 <i>Aplicaciones en la medicina</i>	14
2.1.3.2 <i>Aplicaciones en la industria alimentaria</i>	15
2.1.3.3 <i>Aplicaciones como desinfectante de agua</i>	17
2.1.3.4 <i>Aplicaciones en el tratamiento de agua y de lodos</i>	19
2.1.4 Riesgos del ozono para la salud humana	20
2.2 El proceso de ozonización	23
2.2.1 Generalidades de la ozonización	23
2.2.2 El proceso de ozonización a nivel de laboratorio	24

2.2.3	<i>Antecedentes en la aplicación de la ozonización</i>	32
2.3	La propiedad intelectual en México	34
2.3.1	<i>Organismo encargado y tipos de propiedad intelectual</i>	34
2.3.2	<i>Proceso típico para el reclamo de propiedad industrial</i>	36
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA GENERAL		40
3.1	Fundamentación	40
3.2	Descripción de antecedentes	40
3.3	Integración y descripción del banco de ozonización	41
3.4	Pruebas de funcionamiento del banco de ozonización	41
3.5	Documentación y solicitud de registro de la propiedad industrial.	42
CAPÍTULO IV. RESULTADOS SOBRE LA INTEGRACIÓN DEL BANCO DE OZONIZACIÓN		44
4.1	Integración del banco y su funcionamiento	44
4.2	Materiales y equipos utilizados	52
4.3	Costo del banco de ozonización	69
4.4	Manual de uso	72
4.5	Resultados de las pruebas de funcionamiento	77
4.5.1	<i>Prueba de tiempo de respuesta de los medidores</i>	77
4.5.2	<i>Prueba de funcionamiento de la solución de KI</i>	82
4.5.3	<i>Prueba de la variación de la concentración de ozono en diferentes escenarios</i>	84
4.5.3.1	<i>Corrida con el nivel de potencia del generador al 25%</i>	85
4.5.3.2	<i>Corrida con el nivel de potencia del generador al 50%</i>	87
4.5.3.3	<i>Corrida con el nivel de potencia del generador al 75%</i>	89
4.5.3.4	<i>Corrida con el nivel de potencia del generador al 100%</i>	91
4.5.3.5	<i>Tendencias generales de los resultados de las pruebas</i>	92

CAPÍTULO V. RESULTADOS SOBRE EL PROCESO DE RECLAMO DE PROPIEDAD INDUSTRIAL	96
5.1 Solicitud del estado de la técnica	96
5.2 Análisis de los resultados del estado de la técnica.	96
5.3 Memoria técnica de la invención	98
5.4 Oficio de solicitud del trámite de registro de propiedad industrial	99
Conclusiones	100
Recomendaciones y trabajos futuros	102
Referencias	103
Anexo 1. Tablas sobre concentraciones de ozono en porcentaje de masa en las pruebas realizadas	108
Anexo 2. Carta de solicitud de estado de la técnica y su anexo	119
Anexo 3. Resultados de la búsqueda del estado de la técnica por el IMPI	122
Anexo 4. Memoria técnica presentada ante el IMPI	126
Anexo 5. Oficio de solicitud del trámite de registro de propiedad industrial.	151
Anexo 6. Ficha técnica del banco de ozonización.	154
Anexo 7. Oficio de resultado del examen de forma.	156

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Potencial de oxidación de algunos compuestos químicos.</i>	12
Tabla 2 <i>Características físico – químicas del ozono.</i>	13
Tabla 3 <i>Enfermedades susceptibles para tratarse con ozonoterapia.</i>	15
Tabla 4 <i>Capacidad desinfectante de compuestos químicos.</i>	18
Tabla 5 <i>Efectos de exposición al ozono a diferentes concentraciones.</i>	22
Tabla 6 <i>Elementos que integran tres bancos de ozonización distintos.</i>	28
Tabla 7 <i>Clasificación de materiales para estar en contacto con el ozono.</i>	30
Tabla 8 <i>Especificaciones técnicas del equipo generador de ozono.</i>	54
Tabla 9 <i>Especificaciones técnicas del medidor de ozono a la entrada del sistema.</i>	56
Tabla 10 <i>Especificaciones técnicas del medidor de ozono a la salida del sistema.</i>	62
Tabla 11 <i>Especificaciones técnicas del destructor eléctrico de ozono.</i>	64
Tabla 12. <i>Desglose de costos de los elementos que conforman el banco de ozonización integrado.</i>	70
Tabla 13. <i>Costos por insumos del banco de ozonización considerando un uso de 30 min.</i>	72
Tabla 14 <i>Concentraciones de ozono en el medidor a la salida después de encender el generador.</i>	79
Tabla 15 <i>Concentraciones de ozono en el medidor a la salida después de apagar el generador.</i>	80
Tabla 16 <i>Tabla de resultados de la prueba con el generador trabajando al 25% de su potencial.</i>	86
Tabla 17 <i>Tabla de resultados de la prueba con el generador trabajando al 50% de su potencial.</i>	88
Tabla 18 <i>Tabla de resultados de la prueba con el generador trabajando al 75% de su potencial.</i>	90
Tabla 19 <i>Tabla de resultados de la prueba con el generador trabajando al 100% de su potencial.</i>	92
Tabla 20 <i>Tabla de resultados generales para la prueba de concentraciones.</i>	93

Tabla 21. <i>Flujo másico de ozono para diferentes flujos de oxígeno acarreador. .</i>	95
Tabla 22 <i>Comparación de los registros señalados como “relevantes en combinación” por el IMPI con el banco de ozonización integrado.....</i>	97
Tabla 23 <i>Concentraciones de ozono en porcentaje de masa en la prueba de tiempo de respuesta de los medidores.</i>	108
Tabla 24 <i>Concentraciones de ozono en porcentaje de masa en la prueba de tiempo de respuesta de los medidores a cada 5 segundos.</i>	109
Tabla 25 <i>Concentraciones de ozono en porcentaje de masa en la prueba de funcionamiento de la solución de KI.</i>	113
Tabla 26 <i>Concentraciones de ozono en porcentaje de masa en la prueba con el generador a 25% de nivel de potencia.</i>	114
Tabla 27 <i>Concentraciones de ozono en porcentaje de masa en la prueba con el generador a 50% de nivel de potencia.</i>	115
Tabla 28 <i>Concentraciones de ozono en porcentaje de masa en la prueba con el generador a 75% de nivel de potencia.</i>	116
Tabla 29 <i>Concentraciones de ozono en porcentaje de masa en la prueba con el generador a 100% de nivel de potencia.</i>	117

Índice de Figuras

Figura 1 Esquema del proceso de descarga por efecto corona para generación de ozono.	10
Figura 2 Esquema de la estructura de la molécula de ozono y sus tipos de enlaces.	13
Figura 3 Distribución de la concentración de ozono en la atmósfera.	21
Figura 4 Esquema de banco utilizado para el sistema de ozonización por Monge y Poma (2012).	25
Figura 5 Esquema de banco utilizado para ensayos de ozonización por Veliz et al. (2016).	26
Figura 6 Esquema de banco de ozonización utilizado por Hoda (2007).	27
Figura 7 Diagrama del banco de ozonización integrado.	45
Figura 8 Trampa de agua (abajo) y destructor de ozono (arriba) en el modelo 465M.	46
Figura 9 Salidas analógicas en el medidor de ozono a la entrada y su conexión con los cables dúplex polarizados.	49
Figura 10 Diagrama de instalación del sistema de recopilación de datos.	50
Figura 11 Diagrama de la instalación eléctrica en el banco de ozonización.	51
Figura 12 Banco de ozonización montado en el estante de alambre.	52
Figura 13 Tubo flexible de poliuretano marca Parker modelo #95U-6-062-0500.	53
Figura 14 Tanque de oxígeno, flujómetro y manguera.	53
Figura 15 Racor neumático a presión marca Parker.	54
Figura 16 Equipo generador de ozono.	55
Figura 17 Tubo flexible de poliuretano.	56
Figura 18 Equipo medidor de ozono a la entrada del sistema.	57
Figura 19 Válvula de retención unidireccional de 1/4".	57
Figura 20 Conjunto de dos válvulas de acero inoxidable de 1/4" y sus accesorios.	58
Figura 21 Destructor de ozono con número de pieza: 048990300.	58
Figura 22 Tubería PVC Charlotte Pipe de 1/2" en la parte posterior del banco de ozonización.	59

Figura 23	Trampa de agua WT-100 Ozone Compatible de Ozone Solutions.	60
Figura 24	Manguera Surtek transparente de 1/2"	60
Figura 25	Reactor (izquierda) y tapón de hule e insertos de vidrio (derecha).	61
Figura 26	Trampa de agua o de KI y sus accesorios.....	61
Figura 27	Difusores de piedra para el reactor (izquierda) y para la trampa de KI (derecha).....	62
Figura 28	Medidor de ozono modelo 465M.	63
Figura 29	Destructor de ozono modelo ODS-1H-SCFM.....	64
Figura 30	Conexión tee de bronce con espigas de 1/4".	65
Figura 31	Extensión eléctrica Volteck.	65
Figura 32	Multicontactos principal (abajo) y auxiliares (arriba).....	66
Figura 33	Cable dúplex polarizado Steren.....	66
Figura 34	Conector de corriente jack (izquierda) y plug (derecha).	67
Figura 35	Dos terminales de latón hembra (izquierda) y dos macho (derecha). ..	67
Figura 36	Equipos Microlink 752 (izquierda) y Microlink 590 (derecha).	68
Figura 37	Equipo de cómputo para el manejo de los datos.....	68
Figura 38	Cinta de teflón en las uniones de roscas NTP.	69
Figura 39	Frasco de KI de la marca Sigma – Aldrich (izquierda) y detalles de la etiqueta (derecha).	69
Figura 40	Gráfica de la concentración de ozono en porcentaje de masa en la prueba de tiempo de respuesta de los medidores.....	78
Figura 41	Gráfica de la concentración de ozono en porcentaje de masa en la prueba de funcionamiento de la solución de KI.....	83
Figura 42	Gráfica de la concentración de ozono en porcentaje de masa en la prueba con el generador a 25% de nivel de potencia.....	85
Figura 43	Gráfica de la concentración de ozono en porcentaje de masa en la prueba con el generador a 50% de nivel de potencia.....	87
Figura 44	Gráfica de la concentración de ozono en porcentaje de masa en la prueba con el generador a 75% de nivel de potencia.....	89
Figura 45	Gráfica de la concentración de ozono en porcentaje de masa en la prueba con el generador a 100% de nivel de potencia.....	91

Abreviaturas y símbolos

- A: Símbolo de amperio, unidad básica del Sistema Internacional de Unidades que mide la intensidad de la corriente eléctrica. Se define como el flujo de $6.241\ 509\ 074 \times 10^{18}$ cargas elementales por segundo.
- ASTM: Siglas en inglés de “American Society for Testing and Materials”, encargada de elaborar estándares para materiales y productos.
- atm: Abreviatura de atmósfera, unidad de medida de presión definida como aquella que ejerce la atmósfera terrestre a nivel del mar. En el Sistema Internacional de Unidades se usa el pascal y la equivalencia es 1 atm igual a 101,325 Pa.
- CFCs: Abreviatura para referirse a los clorofluorocarbonos, son compuestos o sustancias derivadas de los hidrocarburos saturados. Como no se destruyen en la tropósfera, logran subir hasta la estratósfera donde se acumulan y destruyen la capa de ozono.
- ^{60}Co : Fórmula química del isótopo radiactivo del cobalto que cuenta con 27 protones, 33 neutrones y una vida media de 5.27 años.
- DQO: Siglas para la Demanda Química de Oxígeno, esta representa la cantidad de oxígeno, en masa, necesaria para oxidar la materia orgánica presente en un determinado volumen de agua por medios químicos [mg-O₂/L].
- Fe: Fórmula química del elemento metálico hierro, cuyo número atómico es 26.
- FEP: Tubería de etileno propileno fluorado.
- HCFCs: Abreviatura para identificar a los hidroclorofluorocarbonos, compuestos formados por átomos de cloro, flúor, hidrógeno y carbono que, igual que los CFCs, logran subir hasta la estratósfera y debilitan la capa de ozono.
- Hz: Símbolo de hercio, unidad de frecuencia del Sistema Internacional de Unidades. Se define como número de ciclos por segundo.

- I.D.: Abreviatura utilizada por algunos comerciantes para referirse al diámetro interior en las tuberías [mm].
- IMPI: Siglas para referirse al Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, que es un organismo público descentralizado con personalidad jurídica y patrimonio propio con la autoridad legal para administrar el sistema de Propiedad Industrial en México.
- KI: Fórmula química del compuesto cristalino y salino llamado yoduro de potasio.
- LED: Siglas en inglés de “Light Emitting Diode”, tecnología que le permite a un cuerpo semiconductor (diodo) emitir luz como radiación electromagnética al recibir una corriente eléctrica de baja intensidad.
- Mn: Fórmula química del elemento metálico manganeso, cuyo número atómico es 25.
- NOM: Siglas para referirse a las Normas Oficiales Mexicanas, son regulaciones técnicas publicadas en el Diario Oficial de la Federación (DOF) y que son de observancia obligatoria.
- NPT: Siglas en inglés de “National Pipe Thread”, tipo de conexión con rosca cónica utilizada como estándar en Estados Unidos de América.
- NSF: Siglas en inglés de “National Sanitation Foundation”, misma que otorga certificaciones de calidad después de realizar pruebas a diversos productos que se comercializan en el mercado.
- O3: Fórmula química del compuesto gaseoso ozono.
- O2: Fórmula química del oxígeno diatómico, como naturalmente se encuentra en la atmósfera.
- O.D.: Abreviatura utilizada por algunos comerciantes para referirse al diámetro exterior en las tuberías [mm].

- PASE:** Siglas para referirse al Portal de Acceso a Servicios Electrónicos del IMPI, sitio de internet donde se realizan las solicitudes de patentes y modelos de utilidad en línea, además de otros trámites.
- PDF:** Abreviatura para “Portable Document Format” o formato de documento portátil, por su traducción al español. Es el formato más utilizado para intercambiar documentos.
- pH:** Abreviatura de potencial de hidrógeno, es una medida para determinar el grado de alcalinidad o de acidez de una sustancia o solución en una escala del 0 al 14. El pH está relacionado con la concentración de iones positivos de hidrógeno y se calcula como: $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$.
- ppm:** Abreviatura de partes por millón, unidad de medida de concentración que indica cuántas unidades de masa de soluto están disueltas en un millón de unidades de masa que conforman la solución. Se calcula dividiendo la masa del soluto entre la masa de la solución. Si en lugar de unidades de masa se utilizan unidades de volumen se cambia la abreviación a ppmv.
- psi:** Unidad de medida de presión del sistema imperial británico, definida como una libra sobre pulgada cuadrada (1 lb/in²), equivale a 6894.76 Pa o a 0.0703 kg/cm².
- PTFE:** Abreviatura para referirse al politetrafluoroetileno, se trata de un polímero inerte con baja reactividad, bajo coeficiente de rozamiento y de gran impermeabilidad. Es comúnmente conocido como teflón.
- PVC:** Siglas para referirse al material policloruro de vinilo. Es muy utilizado en la construcción y en la fabricación de tuberías debido a su propiedad de aislante eléctrico y térmico.
- SIEA:** Siglas para referirse a la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados, perteneciente a la Universidad Autónoma del Estado de México.

- SIGA:** Siglas para referirse al Sistema de Información de la Gaceta de la Propiedad Industrial; es el portal oficial del IMPI en el que se publican las gacetas de las patentes, registros o cualquier información de interés sobre la propiedad industrial con el objeto de darle la difusión legal que mandata la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial.
- THMs:** Siglas para referirse a los Trihalometanos, compuestos químicos volátiles que aparecen en el agua después de su desinfección con cloro, pueden ser dañinos para la salud humana.
- UNT:** Siglas para referirse a la Unidad Nefelométrica de Turbidez, unidad utilizada para medir la turbidez de un líquido. También es común encontrar las siglas en inglés, NTU.
- USB:** Siglas en inglés de “Universal Serial Bus”, tecnología que define un estándar en el desarrollo de la interfaz física para conectar computadoras con dispositivos periféricos y permitir la transferencia de datos entre ellos.
- UV:** Abreviación de Ultravioleta, radiación electromagnética con longitud de onda menor a la visible por el ojo humano pero mayor a la de los rayos X, usualmente entre 100 a 400 nm.
- V:** Símbolo de voltio, unidad del Sistema Internacional de Unidades para medir el potencial eléctrico.
- W:** Símbolo de vatio, unidad del Sistema Internacional de Unidades para medir la potencia o la transferencia de energía. Se define como un julio por segundo (1 J/s).

Resumen

El ozono fue detectado como una especie química por primera vez en el año 1840 por el químico Schönbein, quien también le dio su nombre. Este gas es una variedad alotrópica del oxígeno, formado por la unión de tres átomos del elemento (O_3). El ozono se caracteriza por su olor fuerte que es perceptible en concentraciones muy bajas, además de ser un importante compuesto de la atmósfera terrestre. Actualmente, debido a ser un oxidante muy fuerte, su campo de aplicación es diverso, desde el tratamiento de aguas residuales, lodos biológicos y desinfección; hasta aplicaciones en el área de la salud, agricultura, conservación de alimentos, industria textil, etc. En este trabajo escrito se hace énfasis en la aplicación del ozono en el tratamiento de aguas residuales y lodos biológicos.

Usualmente, los investigadores dedicados a la ozonización deben construir su propio banco de experimentación, provocando que cada investigador utilice un banco diferente, algunos más completos que otros. Esto hace evidente la falta de disponibilidad de un banco de ozonización estandarizado que sea útil para llevar a cabo este tipo de experimentos, lo que conlleva a que los investigadores no cuenten con el equipo necesario para que concentren sus esfuerzos en la realización de sus experimentos más que en la fabricación de un montaje propio. Para resolverlo, el objetivo de este trabajo fue integrar y documentar un banco de ozonización listo para su uso que permita llevar a cabo el proceso y las mediciones correspondientes de manera fácil y segura durante la realización de ensayos en el desarrollo de investigaciones en materia de tratamiento de aguas. Paralelamente, este trabajo reúne y presenta la documentación necesaria para solicitar la protección, como modelo de utilidad, sobre el banco de ozonización ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI).

La metodología empleada en este trabajo consistió en cinco etapas. La primera correspondió a la fundamentación teórica del ozono y la ozonización, presentando en este trabajo un resumen de la información analizada y recopilada. La segunda etapa consistió en buscar antecedentes del empleo del ozono en investigaciones de diferente índole y analizar los bancos y montajes creados por los

investigadores para realizar sus experimentos. Durante la tercera etapa se realizó la integración y la descripción del propio banco de ozonización, describiendo sus elementos, ventajas de operación y los materiales utilizados. La cuarta etapa abarcó la realización de pruebas de funcionamiento del banco de ozonización y el análisis y presentación de los resultados. Finalmente, la quinta etapa consistió en la redacción y preparación de los documentos solicitados por la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados (SIEA) y el IMPI para realizar el trámite del reclamo de propiedad industrial sobre el banco de ozonización integrado.

Sobre la documentación del banco, se incluye una descripción de los materiales y equipos que conforman el montaje; así como sus bondades más importantes. Algunas de estas bondades son la practicidad, la seguridad al usuario, la adaptabilidad de los procesos que se pueden llevar a cabo, la movilidad y la adecuada posición y disposición de los equipos y materiales que lo conforman. También se incluye un manual de uso que indica detalladamente los pasos a seguir para su correcto funcionamiento.

En la parte práctica, se desarrollaron pruebas para conocer y caracterizar al banco. Con ellas, fue posible documentar los tiempos de respuesta reales (los cuales son hasta 4 veces lo indicado en las especificaciones del equipo) de los medidores ante cambios en la concentración de ozono, la alta eficiencia de la solución de KI para destruir el ozono residual que sale del reactor; y la relación general entre el flujo de oxígeno que alimenta al generador y la concentración de ozono en el sistema. Concluyendo que entre mayor es el flujo de oxígeno entrante será menor la concentración de ozono en el gas acarreador. Finalmente, se incluye una descripción del sistema de propiedad industrial en México y su funcionamiento, así como los documentos redactados para solicitar y sustentar el trámite para proteger el banco de ozonización bajo la figura jurídica de modelo de utilidad.

Introducción

El ozono es un compuesto químico gaseoso formado por tres átomos de oxígeno (O_3), es decir, es una variedad alotrópica de este. Gracias a sus particulares propiedades químicas es un potencial agente oxidativo lo que ha facilitado su aplicación en diversos procesos de desinfección, como antiséptico en la conservación de alimentos, tratamiento de aguas residuales, tratamiento de lodos producto de sedimentadores, aplicaciones en la rama textil, entre otros.

La primera aplicación experimental del ozono para fines de tratamiento de agua se debe al francés De Meriteus en 1886 (Doménech, 2004). Calmette y Roux, también de nacionalidad francesa, fueron los primeros en usarlo para desinfección de grandes cantidades de agua en 1899 (Doménech, 2004). Rodríguez (2003) agrega un breve resumen sobre el uso del ozono a lo largo de la historia en el cual señala que la primera aplicación industrial en una planta de potabilización fue en Holanda en 1893 y en 1906 se puso en marcha la planta de tratamiento en Niza, Francia; que, desde entonces, aplica la ozonización. Finalmente, menciona que, a partir de 1960, el ozono es utilizado para la oxidación de metales como el Fe (II) y Mn (II); en la oxidación de micro contaminantes orgánicos tóxicos y para la eliminación de colores y sabores en las aguas.

A pesar de que el ozono ha sido utilizado para una gran variedad de propósitos, cada vez que se pretende utilizar la técnica de ozonización a escala de laboratorio se debe de integrar un banco de ensayo que permita a los investigadores realizar sus pruebas y obtener conclusiones tan precisas como sean posibles. Estos bancos, a menudo desarrollados por los propios investigadores o laboratoristas, frecuentemente no están equipados para garantizar aspectos básicos como la seguridad del usuario, llevar a cabo medición de dosis de ozono a la entrada y salida del sistema, contar con destructores de ozono residual y practicidad.

Por ello, el presente trabajo se realizó con el objetivo de documentar y probar un banco de ozonización estandarizado y completamente equipado que sea eficiente, seguro y práctico; desarrollado para permitir llevar a cabo las funciones típicas y la obtención de datos en experimentos de ozonización. Para cumplir con

este objetivo, en esta tesis se describe el desarrollo tecnológico, su integración, los elementos que lo conforman y sus especificaciones; se presenta el manual de operación del banco y las pruebas de funcionamiento realizadas. Así mismo, otro objetivo de importancia fue preparar la solicitud para el reclamo de la propiedad industrial del desarrollo tecnológico ante el organismo correspondiente. El resultado que se buscó alcanzar es que los investigadores dispongan de un banco de ozonización y se enfoquen en la realización de sus experimentos, más que en la elaboración de un banco propio.

El trabajo escrito está conformado por cinco capítulos: el capítulo uno integra los aspectos básicos del protocolo de investigación, como el planteamiento del problema y los objetivos de la tesis. El capítulo dos reúne las generalidades teóricas del ozono y la ozonización, su uso, sus propiedades y los efectos que podría tener en la salud humana. En el capítulo tres se concentra la descripción de la metodología aplicada en este trabajo para conseguir los resultados en cuanto a la documentación y a la realización de pruebas de funcionamiento en el banco. En el cuarto capítulo se muestran los resultados obtenidos al integrar el banco y en las pruebas ejecutadas. Finalmente, en el capítulo cinco se presentan los resultados conseguidos correspondientes con la elaboración de la solicitud del trámite de registro de propiedad industrial del banco de ozonización ante el IMPI.

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Definición del problema

En el futuro, la población mundial se enfrentará al reto, cada vez más difícil, de abastecer la demanda de agua potable (Esparza, 2014). Actualmente, el tratamiento de aguas residuales es cada vez mejor visto como un medio para reducir el impacto ambiental y lograr su reúso (Camarena y Rios, 2013). La desinfección del agua para uso potable y el tratamiento de las aguas residuales son etapas necesarias para la sustentabilidad, el cuidado del medio ambiente y la salud pública (Camarena y Rios, 2013).

Los estudios que se han publicado donde los investigadores realizan experimentos con ozono utilizando un banco de ozonización de elaboración propia han sido diversos. Por ejemplo, en 2012, Monge y Poma realizaron ensayos para evaluar la reducción del surfactante aniónico dodecibencensulfonato sódico en medio acuoso. Para sus experimentos, utilizaron un banco que incluye un recipiente abierto de 500 mL de capacidad como reactor y un generador de ozono CDP 8000 (5 g O₃/h) con filtros de partículas, secadores de aire, manómetros, un inyector Venturi, accesorios y conexiones. Sin embargo, el banco no contempla destructores ni equipos de medición de ozono.

Veliz et al. (2016) realizaron experimentos en un tren de tratamiento que incluye coagulación – floculación, sedimentación, filtro de arena y ozonización al final del tren. Su objetivo era evaluar el proceso de coagulación – floculación, filtración y ozonización en el tratamiento de agua residual municipal para su reutilización en el sector agrícola. Para sus experimentos usaron un banco de ensayo con un reactor o columna de burbujeo cilíndrica de 5 L de capacidad. El banco cuenta con medidores y destructores de ozono, pero omite algunos elementos de seguridad importantes como trampas de agua, o válvulas antirretorno. Además, no cuenta con un sistema de adquisición automática de datos por computadora.

Más recientemente, Aguirre (2022) hizo pruebas con ozono para definir un proceso que le de resistencia a la tracción – elongación y a la abrasión a un tejido plano de 100% algodón. Como reactor, construyó su propia cámara hermética a base de vidrio con un volumen de 63 L. Usó un cañón generador de ozono de marca Ozonec PS-127 con una producción de ozono de 60 g/h. La autora siempre tuvo presente las medidas de seguridad para el manejo del ozono. Sin embargo, no menciona haber utilizado destructores de ozono en su montaje.

Como parte del tratamiento de aguas residuales y de potabilización, las autoridades, con ayuda de laboratorios e instituciones de investigación, y los encargados de garantizar el abastecimiento de servicios públicos deben realizar experimentos y análisis sobre cuan idóneo es implementar un proceso de tratamiento específico o un tipo de desinfectante en particular (Doménech, 2004). Cada ejemplo anteriormente citado utilizó un banco de ozonización diferente, algunos más completos que otros, lo cual evidencia la falta de disponibilidad de un banco de ozonización estandarizado que sea útil para llevar a cabo este tipo de experimentos.

1.2 Justificación

Jaimes-Urbina y Vera-Solano (2020) explican que la ozonización es definida como un tratamiento de oxidación avanzada con numerosas aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales y en el proceso de potabilización del agua. Exponen que este proceso es eficiente para eliminar del agua los compuestos tóxicos aumentando la eficiencia de los procesos biológicos en el tratamiento de aguas residuales. Señalan que el ozono es capaz de degradar y retirar del agua, incluso, algunos contaminantes de origen farmacéutico como paracetamol, ibuprofeno, amoxicilina, entre otros.

Acerca de su uso en el proceso de potabilización, la desinfección del agua para consumo humano se lleva a cabo principalmente mediante el empleo de ozono o cloro, cada uno con sus ventajas y desventajas (Doménech, 2004). El uso del

ozono se ha ido popularizando a partir de las décadas pasadas sobre todo en plantas de tratamiento y de potabilización de tamaño mediano a grande (Doménech, 2004). Doménech (2004) opina que el ozono es el mejor desinfectante por ser efectivo en la desintegración de un rango más amplio de contaminantes. En la potabilización del agua, el ozono puede servir también para oxidar la materia orgánica natural presente en las fuentes de abastecimiento (Rodríguez, 2003).

El proceso de ozonización es también utilizado en el tratamiento de lodos que son expulsados de los sedimentadores ya que permite que gérmenes resistentes como *Pseudomona aeruginosa* sean inactivados con significativa facilidad (Ikehata et al., 2007, como se citó en Amador-Díaz et al., 2015). Amador-Díaz et al. (2015) mencionan que la ozonización reduce los parámetros indicadores de contaminantes entre un 31 y 99.99%. Añade que el volumen del lodo puede reducirse hasta un 90% utilizando un proceso de reducción de lodo a base de ozono.

En las diversas aplicaciones de la ozonización, es de capital importancia realizar experimentos para averiguar si un proceso es adecuado y eficiente; o para optimizarlo. Es decir, se debe estar seguro de que el proceso de ozonización y las dosis de ozono que se van a emplear en un proyecto de diseño o en una planta de tratamiento producen los mejores resultados. La importancia de la experimentación con ozono no se limita solamente al tratamiento de aguas ya que la ozonización ha sido involucrada en diferentes ramas del saber y para diversos fines, como el ejemplo aplicado a la industria textil (Aguirre, 2022).

Los investigadores suelen utilizar diferentes bancos de ozonización que, generalmente, son montajes elaborados por ellos mismos. De los casos descritos en la definición del problema; el banco utilizado por Veliz et al. (2016) es ligeramente más sofisticado y completo ya que considera un dispositivo suficientemente equipado con destructores de ozono, medidor de pH, válvulas de toma de muestra y un flujómetro (Figura 5). Además, incluye un tanque para el proceso de coagulación – floculación y sedimentación (proceso ajeno a la ozonización), considerándose, más bien, como una planta de tratamiento completa y no solo como

un banco de ozonización. Sin embargo, este banco no mide el gas ozono seco saliente del proceso ni cuenta con un sistema de adquisición automática de datos.

El banco utilizado en 2012 por Monge y Poma es, al contrario, simple y omite varios elementos (Figura 4). Además, el reactor que utiliza está en contacto con el exterior del sistema lo que podría originar una situación de riesgo. Adicionalmente, Aguirre en el 2022 fabricó su propia cámara de ozonización a las medidas que la necesitó para llevar a cabo sus experimentos teniendo en cuenta las medidas de seguridad de trabajar con el ozono. Sin embargo, juzgando por las medidas de prevención que propone contra la exposición al ozono, omite la instalación de destructores de ozono.

Como se interpreta, no existe una uniformidad en el uso de bancos para experimentos con ozonización y cada investigador utiliza uno diferente, personalmente adaptado que no siempre cumple con todos los requisitos de un banco de laboratorio. Así, cada laboratorista tiene que armar su banco, más o menos completo, ya que no existe un banco íntegro disponible que se ofrezca como tal.

Esta es la razón por la que se integró un banco de ozonización para la realización de experimentos en investigaciones de tratamiento de aguas, que cumpla con las funciones esenciales del proceso, contemple un reactor propio con instalaciones y conexiones adecuadas, incluya un pretratamiento para la humedad del ozono a la salida, garantice la seguridad del operador, permita hacer mediciones de dosis a la entrada y salida del sistema, sea móvil y facilite la obtención de datos mediante un equipo de cómputo. Fue necesario documentar el banco integrado (sus elementos, materiales y especificaciones), probarlo y reunir los documentos de sustento para solicitar el reconocimiento de la propiedad industrial; lo que fue objeto de este trabajo escrito.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Integrar un banco de ozonización que permita llevar a cabo el proceso y las mediciones correspondientes de manera fácil y segura durante la realización de ensayos en el desarrollo de investigaciones en materia de tratamiento de agua. Lo anterior para ofrecer al investigador un banco listo para su uso, comprobado y documentado.

Objetivos específicos

- Analizar, recopilar y presentar información relevante acerca del ozono, de sus propiedades, de la ozonización; y de las ventajas y desventajas de su uso.
- Describir detalladamente el banco de ozonización que será integrado, explicando las partes que lo conforman mediante diagramas e imágenes, sus funciones y su manera de utilizarse.
- Realizar pruebas de funcionamiento del banco de ozonización integrado que permitan verificar que el proceso de ozonización se lleva a cabo adecuadamente, manipulando las variables de entrada y de salida previstas para estos experimentos.
- Preparar los formatos y documentos de argumentación para llevar a cabo la solicitud del reclamo de propiedad industrial por el banco de ozonización integrado, ante el organismo gubernamental competente.

1.4 Hipótesis

Es posible la integración de un banco de ozonización que satisfaga la necesidad de disponibilidad de un equipo estandarizado, funcional, flexible y listo para su adquisición como sistema completo por laboratorios de investigación y docencia en tratamiento de agua, y/o en industria. Integrado por un pretratamiento para la humedad del ozono a la salida, que garantice la seguridad del operador, que permita variar y hacer mediciones de dosis a la entrada y salida del sistema, que

sea un banco móvil y que propicie la adquisición automática de datos mediante un equipo de cómputo, conforme a las funciones esenciales y prácticas típicas en experimentos de ozonización de agua y de algunos alimentos.

En la fase de pruebas y conforme a las funciones esenciales y prácticas típicas en experimentos de ozonización, las variables que serán manipuladas en el equipo en cada determinado experimento batch son las siguientes: el nivel de intensidad del ozonizador (desde 25% al 100% de su nivel máximo), el flujo de oxígeno entrante (desde 0.5 L/min a 5 L/min), el tiempo de ozonización (desde un mínimo de 0.5 min con la operación de la versión de trampas de reactivo KI a la salida del banco, versus un mínimo de 5 min cuando se utiliza la opción de medir la concentración de ozono saliente con un segundo medidor; el tiempo máximo no es limitado). También se puede variar el volumen de la muestra de agua o lodo a tratar (de 200 mL a 1.5 L), o con instalar un reactor más grande (de hasta 5 L idealmente).

Manipular estas variables de entrada va a producir cambios en dos variables de respuesta que son: el flujo másico de ozono (dosis específica entrante, en g O₃/l agua), y las eficiencias de remoción de diversos contaminantes considerados según el tipo de investigación del usuario. Además de ofrecer estas facilidades y flexibilidad en la modificación de parámetros de operación del banco, este último se diseña para garantizar su adecuado funcionamiento (por ejemplo, prevención de problemas de humedad, desviaciones de flujos o paros en urgencias, forcejeo de bombas, contraflujos de agua por presiones negativas, etc.). También, el banco se concibe para ofrecer seguridad al usuario y prevención de contaminación de aire.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 El ozono

2.1.1 Generalidades sobre el ozono y su generación

Martin va Marum, en 1785, fue el primero que detectó que al producir una chispa eléctrica en el aire se producía un gas de color particular; sin embargo, a él no se le atribuye el descubrimiento del ozono porque no se enfocó en determinar las características de ese gas (Scwhartz y Martínez-Sánchez, 2012). De acuerdo con Rodríguez (2003), el ozono fue detectado como una especie química por primera vez en el año 1840 por el químico Schönbein, quien le diera el nombre que hoy tiene este peculiar gas. Añade que ocho años después, Hunt observó que el ozono es una variedad alotrópica del oxígeno, determinando que este se forma con la unión de tres átomos del elemento (O_3). El ozono es un gas que posee un olor tan fuerte que es perceptible en concentraciones muy bajas, además de ser un importante compuesto de la atmósfera terrestre (Fahey, 2002).

Aproximadamente el 90% del ozono se encuentra entre los 16 km y los 50 km de altura en la capa de la atmósfera llamada estratósfera. Es ahí donde se encuentra la capa de ozono de la tierra a una concentración de 12 moléculas de ozono por cada millón de moléculas en el aire. Cerca del 10% del ozono restante se encuentra en la tropósfera, capa de la tierra entre la superficie terrestre y la estratósfera, con un rango de concentración desde 20 a 100 moléculas de ozono por cada mil millones de moléculas de gas en el aire (Fahey, 2002).

Sometido a condiciones de temperatura y presión ambientales, el ozono es inestable y dicha inestabilidad aumenta si lo hace también la temperatura (Augusto y Garcia, 2007). Debido a esto, la vida media del ozono en la atmósfera oscila entre 30 y 160 minutos por lo que el ozono debe de ser generado *in situ* cada vez que se pretenda utilizar (Rodríguez, 2003). Sin embargo, el ozono es especialmente más inestable en disolución acuosa donde la separación de sus tres átomos de oxígeno es rápida y espontánea (Monge y Poma, 2012).

Para la generación de ozono se pueden utilizar diferentes métodos, uno de ellos es la electrólisis del ácido sulfúrico (H_2SO_4) o del ácido perclórico ($HClO_4$), sin embargo; es un proceso poco eficiente (Rodríguez, 2003). Otro de los métodos, y el más comúnmente utilizado, es el que expone Augusto y Garcia (2007) conocido como descarga por efecto corona o descarga eléctrica de alto voltaje. Los autores explican que el proceso consiste en hacer circular aire u oxígeno puro entre dos electrodos con una gran diferencia de potencial (DDP), de esta manera los electrones obtienen la energía cinética requerida para que ocurra la disociación del oxígeno y se produzcan radicales libres que a su vez reaccionan con otras moléculas de oxígeno formando el ozono. Se agrega un dieléctrico entre los electrodos para evitar la formación de arcos eléctricos que pudieran incrementar la temperatura del sistema y afectar el proceso (Rodríguez, 2003). En la Figura 1 se presenta un esquema que ilustra este proceso.

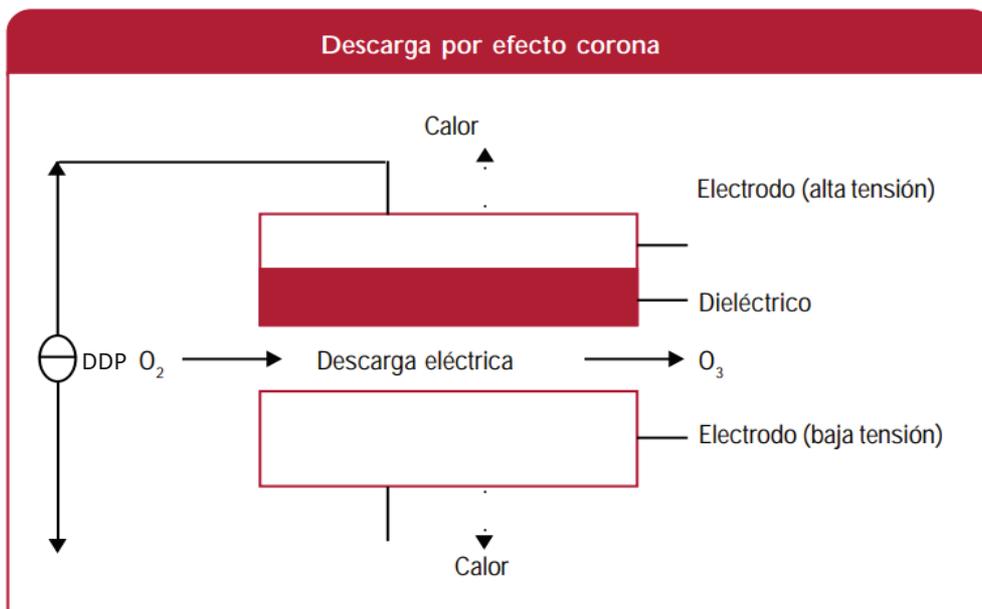


Figura 1

Esquema del proceso de descarga por efecto corona para generación de ozono.

Nota: Adaptado de *Descarga por efecto corona*, (p.33) [Esquema], por Augusto y Garcia, 2007, Revista Infopesca Internacional (<https://n9.cl/z7lji>)

Otro de los métodos para la generación de ozono es mediante la radiación UV. Fahey (2002) describe que en la estratósfera ocurre la disociación del oxígeno (O_2) debido a la radiación UV para que, posteriormente, cada átomo reaccione con una molécula no disociada para formar el ozono. Añade que también es posible la generación de ozono en la tropósfera cuando reaccionan determinados gases (como óxidos de hidrocarburos) en presencia de luz solar. Así mismo, el ozono es fácilmente destruido por la radiación UV, regresando a oxígeno diatómico y oxígeno elemental en un proceso cíclico natural que absorbe los rayos UV protegiendo a la Tierra de esta dañina radiación (Augusto y Garcia, 2007). Este método no es usado industrialmente debido a la baja eficiencia del proceso (Rodríguez, 2003).

El último método para la generación de ozono es por generación radioquímica, consiste en utilizar la radiación gamma o beta de algunos isótopos radiactivos (^{60}Co , por ejemplo); sin embargo, es un proceso complejo que no se utiliza normalmente (Rodríguez, 2003).

2.1.2 Propiedades químicas y físicas del ozono

Autores como Camarena y Rios (2013), Rodríguez (2003), Augusto y Garcia (2007) y Gallego et al. (2007) comulgan y resaltan al ozono como un gas altamente oxidante. Destacan a esta como la principal de sus características ya que le permite ser utilizado para procesos de desinfección, esterilización, degradación de contaminantes, inactivación de bacterias y virus, entre otros. En la Tabla 1 se muestran los potenciales de oxidación de diferentes sustancias, medidos en milivoltios, donde el ozono se posiciona como el tercer agente oxidativo más fuerte.

El ozono es muy reactivo químicamente y el tiempo para que sus reacciones se lleven a cabo generalmente es muy pequeño (tres mil veces menor al tiempo de reacción de otros desinfectantes como el cloro) (Augusto y Garcia, 2007). Evidentemente, el tiempo de reacción depende de la concentración de ozono en la reacción (Doménech, 2004). Además, posee la propiedad de ser un gran absorbente, removiendo rápidamente olores y sabores del agua. Como se ha

mencionado anteriormente, el ozono es inestable y su tiempo de vida en disolución acuosa es corto en condiciones normales (Augusto y Garcia, 2007).

Tabla 1

Potencial de oxidación de algunos compuestos químicos.

Agente oxidante	Potencial de oxidación [mV]	
	Augusto y Garcia (2007)	Rodríguez (2003)
Autor	Augusto y Garcia (2007)	Rodríguez (2003)
Flúor	3.06	2.85
Radical hidroxilo	2.8	-
Ozono	2.07	2.07
Peróxido de hidrógeno	1.77	1.76
Ácido hipocloroso	1.49	-
Cloro	1.38	1.36

Químicamente, la estructura de los enlaces del ozono se ha determinado por experimentos que indican que se forman ángulos de enlace de 116.8° aproximadamente y los átomos se encuentran separados por una distancia de 127.8 pm (Monge y Poma, 2012). La molécula de ozono se forma de un átomo central donde se unen los otros dos átomos. Uno de ellos se une mediante un doble enlace covalente y el otro mediante un enlace covalente dativo (Gallego et al., 2007). En la Figura 2 se muestra la estructura de la molécula del ozono, la cual se encuentra en resonancia entre las opciones 1 y 2.

El autor Shirk (2000) expone que, dentro de las propiedades físicas, el ozono es de color azul y posee un olor eléctrico y picante, siendo similar al del cloro a altas concentraciones; su solubilidad en agua es reducida. Camarena y Rios (2013) exponen que su coeficiente de Bunsen (o coeficiente de solubilidad) es de 0.64 a 0° C. A pesar de ser pequeña, Trujillo (2010) apunta que la solubilidad del ozono en agua es 14 veces mayor que la del oxígeno (cuyo coeficiente de solubilidad es de 0.045, aproximadamente). En la Tabla 2 se enlistan otras propiedades físico – químicas de interés acerca del ozono.

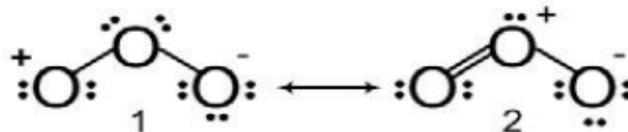


Figura 2

Esquema de la estructura de la molécula de ozono y sus tipos de enlaces.

Nota: Se presentan dos posibles configuraciones [1] y [2]. Adaptado de *Molécula de ozono*, (p.3) [Esquema], por Trujillo, 2010, Tesis de Maestría (<https://n9.cl/9l9fj>)

Tabla 2

Características físico – químicas del ozono.

Propiedad	Valor
Peso Molecular	48 g/mol
Densidad a 0 °C y 1 atm	2.154 g/l
Punto de ebullición a 1 atm	-111.9 °C
Punto de fusión	-192.5 °C
Umbral olfativo	0.02 ppm

Fuente: Rodríguez (2003).

2.1.3 Aplicaciones del ozono

Han sido diversos los campos de aplicación donde el ozono se ha utilizado para una gran variedad de propósitos desde que se descubrió. Este inestable gas se ha aprovechado en la industria textil, en la medicina, en la industria alimentaria, y desde luego, en los procesos de tratamiento de agua y lodo producto de sedimentadores. En el presente apartado se expondrán algunos de ellos con mayor detalle y como la sociedad se ha visto beneficiada con su aplicación.

2.1.3.1 Aplicaciones en la medicina

En el campo de la medicina, el ozono se ha utilizado para fines como la desinfección de las heridas, el mejoramiento del proceso de cicatrización, el control de hemorragias y como desodorizante en los consultorios (Gallego et al., 2007). Particularmente en el campo de la odontología, el uso de este gas puede ser una adecuada alternativa para el tratamiento de la caries radicular primaria si se usa el ozono mezclado con algunos agentes remineralizantes (Holmes, 2003, como se citó en Gallego et al., 2007). También se han aprovechado las propiedades del ozono para utilizarlo en procesos de blanqueamiento dental, siendo eficiente su uso para ello a una concentración de 0.05 ppm (Calderón, 2004, como se citó en Gallego et al., 2007). El novedoso uso del ozono ha favorecido e incrementado la calidad de los tratamientos en áreas médicas y odontológicas. Sin embargo, es de vital importancia que este gas sea manejado adecuadamente y en las dosis correctas ya que, de lo contrario, puede provocar alteraciones en el cuerpo humano debido a su posible toxicidad (Gallego et al., 2007).

La ozonoterapia es otra interesante aplicación dentro de la medicina, la cual consiste en la aplicación de una mezcla de oxígeno médico y ozono, misma que puede administrarse al cuerpo humano por tres tipos diferentes de vías: tópica, infiltrativa y sistémica (Hidalgo-Tallón y Torres, 2013). Scwhartz y Martínez-Sánchez (2012) señalan que, a pesar de no ser tan utilizada, la ozonoterapia se ha llevado a cabo desde finales del siglo XIX y con el tiempo ha ganado reconocimiento internacional, tanto que países como Cuba y Rusia ya la incluyen dentro de su marco normativo. La eficiencia de la ozonoterapia en procesos médicos se debe, en gran medida, a la capacidad germinicida del ozono (Hidalgo-Tallón y Torres, 2013).

La ozonoterapia, de acuerdo con Scwhartz y Martínez-Sánchez (2012), puede etiquetarse como una técnica simple de aplicar, efectiva y con, prácticamente, nulos efectos colaterales, pero no ha llegado a su popularización debido a dos principales causas. La primera es la desinformación que hace creer a las personas que el ozono es tóxico independientemente de la concentración en la que se encuentre. La segunda es la oposición de las empresas farmacéuticas que

se verían afectadas económicamente si la ozonoterapia se volviera popular. En la Tabla 3 se muestran algunas de las enfermedades que se pueden tratar eficientemente con ozonoterapia, según Scwhartz y Martínez-Sánchez (2012).

Tabla 3

Enfermedades susceptibles para tratarse con ozonoterapia.

Especialidad	Enfermedades
Dermatología	Herpes zoster, acné, micosis, psoriasis, dermatitis atópica
Medicina interna	Hepatitis, diabetes, hipertensión arterial, asma, bronquitis crónica, gastritis.
Nefrología	Patologías isquémico - metabólicas.
Neurología	Migraña, depresión, trastornos neuro - vasculares.
Reumatología ortopedia	Hernia discal, reumatismo articular, artrosis, artropatías, artritis reumatoide.
Angiología	Insuficiencia venosa, gangrena, vasculopatía periférica.
Ginecología	Infecciones bacterianas, vaginitis, inflamación pélvica crónica.
Inmunología	Inmuno - modulador, trastornos autoinmunes, tratamientos con radiaciones.

Fuente: Scwhartz y Martínez-Sánchez (2012).

2.1.3.2 *Aplicaciones en la industria alimentaria*

Desde la segunda década del siglo XX se han llevado a cabo intentos para aprovechar las propiedades oxidantes y desinfectantes del ozono para el mejoramiento de la calidad de los alimentos y para retardar la descomposición de estos (Augusto y Garcia, 2007). Dentro de la acuicultura, por ejemplo, el ozono ha sido utilizado para el tratamiento y la esterilización del agua de los viveros (Rodríguez, 2003) (Augusto y Garcia, 2007). Los avances tecnológicos en materia de generación de ozono han impulsado que su uso en la industria alimentaria cada vez sea más práctico, barato y rentable (Augusto y Garcia, 2007).

Seminario et al. (2014) informan que, en la industria alimentaria, el ozono es utilizado para cumplir con dos principales objetivos. El primero consiste en eliminar los microorganismos (bacterias y hongos) presentes en los alimentos que aceleran su descomposición y evitar su formación durante la manipulación, conservación y distribución de estos. Los autores aseguran que se ha comprobado que el ozono es capaz de actuar como agente antiséptico, siendo capaz de eliminar los microorganismos que existen en la superficie de los alimentos.

Así mismo, Seminario et al. (2014) agregan que la segunda tarea del uso de este gas en la industria alimentaria consiste en mantener libre de malos olores los espacios ocupados por alimentos almacenados. Los autores señalan que las cámaras almacenadoras pueden desarrollar particulares olores que, de no ser tratados, pueden ser transmitidos a los alimentos nuevos que lleguen a la cámara, resultando pernicioso para la calidad de los alimentos. Anteriormente se realizaba la desodorización de estas cámaras mediante la quema de azufre con ayuda de un trioximetileno; no obstante, se trataba de un método más tardado, que exigía medidas preventivas especiales por los gases tóxicos que se desprendían y solo se podía realizar si la cámara se encontraba totalmente vacía (Seminario et al., 2014).

Con el fin de ejemplificar lo anterior, Augusto y Garcia, (2007) exponen sobre el uso del ozono en la industria pesquera, señalando que este se usa para lograr una asepsia total en la carne, interrumpir la actividad enzimática de las bacterias presentes, mejorar visualmente el aspecto de la carne y para la desodorización de los almacenes. Añade que para estos fines se utiliza comúnmente una concentración de ozono en el aire de 2.5 a 3.0 ppm, a una temperatura de entre 1 y 3°C y a una humedad relativa de 90%. Por su parte, Seminario et al. (2014) indican que estas mismas formas de aprovechar el ozono en la industria pesquera son también útiles y aplicables para la conservación de la carne de ganado vacuno.

El uso del ozono en la industria alimentaria no se limita solo al tratamiento de las carnes, sino que también puede ser utilizado para la conservación de frutas y verduras (Augusto y Garcia, 2007). De acuerdo con Seminario et al., (2014) las frutas son de los alimentos más perecederos porque están formadas por una gran

cantidad de agua que facilita el crecimiento microbiano (en promedio, contienen 90% de agua) y en presencia de eteno, que es un compuesto orgánico que acelera la maduración de frutas y verduras, se descomponen aún más rápido. La exposición de frutas y verduras al ozono ayuda a preservarlas libres de microorganismos y, en el caso de las frutas, retrasa su maduración en un 20 a 30% permitiendo aumentar su tiempo de almacenaje debido a que el ozono destruye el eteno, transformándolo en dióxido de carbono y agua (Seminario et al., 2014).

La Food and Drug Administration (por sus siglas, FDA), aprobó en 2001 el contacto directo del ozono con los alimentos como agente antimicrobiano; sin embargo, se deben realizar más estudios al respecto para conocer las concentraciones más adecuadas para cada tipo de alimento ya que elevadas concentraciones podrían dañarlos, especialmente a los de alto contenido lipídico (Augusto y Garcia, 2007). Otra contraindicación la exponen Seminario et al. (2014), indicando que la acción del ozono no es tan eficiente cuando es necesario destruir los microorganismos presentes dentro de la carne, es decir, aquellos que no están en su superficie. No obstante, el uso del ozono en la industria alimentaria tiene un prometedor futuro para beneficio de las personas y actualmente está legalmente aprobado en países como Estados Unidos, Japón, Canadá y Australia (Augusto y Garcia, 2007).

2.1.3.3 Aplicaciones como desinfectante de agua

De acuerdo con Doménech (2004), hasta finales del siglo XX, el desinfectante más ampliamente utilizado había sido el cloro en sus diversas configuraciones, especialmente como hipoclorito sódico y cloro gas. Recientemente, la popularidad del cloro como único desinfectante ha disminuido debido a los hallazgos encontrados respecto a los efectos colaterales que genera su uso y cómo pueden afectar a la salud humana (Doménech, 2004). El más preocupante de estos efectos colaterales es que el cloro en presencia de materia orgánica reacciona con esta, formando trihalometanos (THMs), compuestos que son cancerígenos (Camarena y Rios, 2013). Afortunadamente, el riesgo por la

formación de THMs se puede evitar si no se usa cloro en las etapas tempranas del proceso de tratamiento de agua, cuando aún hay presencia de materia orgánica, y solo se usa al final como cloro residual; esto porque el ozono no elimina la posibilidad del recrecimiento bacteriano en el agua y por ende no puede sustituir al cloro residual (Doménech, 2004).

Lógicamente, la eficiencia de un determinado desinfectante dependerá siempre de la concentración que se esté utilizando y el tiempo de contacto entre este y los microorganismos (Monge y Poma, 2012). No obstante, la capacidad desinfectante del ozono es superior hasta en veinte veces a la de los compuestos derivados del cloro y también los tiempos de contacto requeridos son menores (Doménech, 2004). En la Tabla 4 se muestra una comparación de los diferentes tipos de desinfectantes más usados con información proporcionada por Doménech (2004). Notablemente, el ozono es el desinfectante más poderoso en cualquiera de las categorías de patógenos, aunque es visible la decadencia de su capacidad desinfectante con los quistes en comparación con virus y bacterias. Aunque Doménech (2004) no lo incluye en esta comparación, Camarena y Rios (2013) afirman que también el ozono es muy eficiente en la eliminación de protozoos.

Tabla 4

Capacidad desinfectante de compuestos químicos.

Compuesto	General	Bacterias	Virus	Quistes
Ozono	4	4	3	2
Cloro/hipoclorito	3	4	2	1
Dióxido de cloro	3	4	2	1
Permanganato	2	3	2	0

Nota: 4: muy bueno, 3: bueno, 2: regular, 1: escaso, 0: nulo. *Fuente:* Doménech (2004).

Una de las principales ventajas del empleo del ozono como desinfectante es que su dependencia a las condiciones ambientales es muy baja, lo que le permite actuar de manera eficiente dentro de grandes rangos de pH y temperatura (Monge

y Poma, 2012). Según Doménech (2004), el cloro es más eficiente en un rango de pH entre 6.5 y 7.0 mientras que el ozono lo es entre 5.5 y 9.5 y entre temperaturas desde los 5°C a los 35°C. La desinfección con luz ultravioleta es también efectiva, pero no elimina todos los microorganismos presentes en el agua ya que su efecto es superficial (Pietrobon, s/f). Aunque el ozono apunta a ser un gran desinfectante, es importante tener en cuenta que no existe el desinfectante perfecto, aunque frecuentemente la mejor alternativa será combinar dos sustancias desinfectantes para potenciar los beneficios y minimizar los efectos colaterales de cada uno (Doménech, 2004).

2.1.3.4 Aplicaciones en el tratamiento de agua y de lodos

Aunque el más popular de los usos del ozono ha sido la desinfección, es importante destacar el prometedor futuro del ozono, gracias a su notable poder oxidante, en los procesos que conforman los trenes de tratamiento de aguas residuales tanto municipales como industriales (Rodríguez, 2003). En el tratamiento de las aguas industriales, específicamente en la industria farmacéutica, el ozono ha sido útil para retirar del agua medicamentos como diclofenaco, ibuprofeno, amoxicilina, paracetamol, etc.; mejorando la biodegradabilidad del efluente y posibilitando el uso de tratamientos biológicos en lugar de físico – químicos (Jaimes-Urbina y Vera-Solano, 2020). Este gas es excelente para oxidar contaminantes inorgánicos, como compuesto con hierro (Fe) y manganeso (Mn), y también puede oxidar la materia orgánica natural facilitando su remoción y evitando la formación de THMs (Rodríguez, 2003).

De acuerdo con Veliz et al. (2016), aplicando una dosis de ozono de mínimo 40 mg/L, calculada esta como el producto de la concentración de ozono en el gas de entrada [mg/L] por el flujo de gas de entrada [L/h] por el tiempo de contacto [h] y dividido entre el volumen del reactor [L], en combinación con procesos de coagulación – floculación y filtración, se puede conseguir la remoción de contaminantes en un porcentaje suficiente para cumplir con la normatividad vigente para reúso de agua para riego. Los autores agregan que si se aplica una dosis de 80 mg/L de ozono se consigue eliminar la turbidez [UNT] en 98%, los sólidos

suspendidos totales [mg/L] en 96%, la demanda química de oxígeno (DQO) [mg-O₂/L] en 85% y los coliformes fecales en 99.98%.

En relación con el tratamiento de lodos líquidos que salen de los sedimentadores, Amador-Díaz et al. (2015) concluyen que, gracias a sus características, el ozono es capaz de oxidar grandes cantidades de contaminantes presentes en estos lodos logrando su adecuada estabilización y desinfección. Los autores señalan que al incluir la técnica de ozonización en el tratamiento de lodos se logran eficiencias de hasta 99.9% en la remoción de coliformes fecales y de 64 a 70% en la remoción de la DQO. Finalmente, los autores exponen que los grandes volúmenes de lodos que salen de los sedimentadores representan un inconveniente para su operación e indican que el tratamiento con ozono logra reducir hasta en 90% este volumen haciendo su manejo y disposición más sencilla y práctica.

2.1.4 Riesgos del ozono para la salud humana

Como se ha mencionado antes, el ozono naturalmente existe en dos distintas capas de la atmósfera, la mayoría de él (90%) se encuentra en la estratósfera formando la capa de ozono que protege a la Tierra de la radiación ultravioleta (rayos UV) y el 10% restante se encuentra en la tropósfera, donde se considera un contaminante (Fahey, 2002). Algunos autores, como Gallego et al. (2007), se suelen referir como “ozono bueno” a aquel que se encuentra en la estratósfera y como “ozono malo” al que se encuentra en la tropósfera ya que está en contacto directo con los seres vivos y posibilita la formación de gases de efecto invernadero. Como se muestra en la Figura 3, la cantidad de ozono troposférico ha aumentado recientemente debido a la contaminación y es importante conocer cuáles podrían ser las consecuencias de este cambio en la concentración del ozono para la salud humana.

De Castro (2012) documenta que, similar a otros oxidantes, el ozono puede irritar e inflamar las vías respiratorias. Agrega que solo basta una concentración de 0.12 ppm para que el cuerpo humano reaccione con tos, lasitud y dolores pectorales al inhalar. El autor añade que al subir la concentración a 0.4 ppm se espera como

respuesta una inflamación aguda de fosas nasales, garganta y bronquios. Algunas personas están expuestas al ozono debido a que este está presente dentro de su ambiente laboral, en esos casos es recomendable que la concentración de ozono en el lugar de trabajo no sobrepase las 0.050 ppm, que se eviten intermitentes exposiciones a concentraciones altas y se mantenga el lugar ventilado (De Castro, 2012).

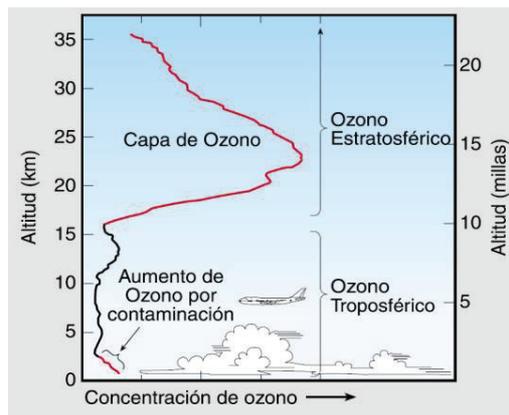


Figura 3

Distribución de la concentración de ozono en la atmósfera.

Nota: Adaptado de *Ozono Atmosférico*, (p.3) [Esquema], por Fahey, 2002, Evaluación Científica del Agotamiento de Ozono:2002 (<https://n9.cl/6te7h4>)

Fahey (2002) explica que diversos procesos industriales emiten a la atmósfera algunas sustancias que contienen cloro, como los clorofluorocarbonos (CFCs) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFCs). El autor continúa explicando que cuando estas sustancias llegan a la estratósfera sus moléculas se disocian, quedando átomos de cloro libres que reaccionan con el ozono, lo destruyen y debilitan la capa que protege al planeta de la radiación solar. La exposición a la radiación UV puede provocar padecimientos como cáncer en la piel, cataratas y debilitamiento del sistema inmunológico; por ello fue importante la celebración del Protocolo de Montreal en 1987 donde las naciones participantes se comprometieron a reducir la concentración de cloro en la estratósfera y evitar así la degradación de la capa de ozono (Fahey, 2002).

En la Tabla 5 se muestran algunos de los efectos del ozono y a partir de qué concentraciones se pueden presentar de acuerdo con Shirk (2000). Por otro lado, Camarena y Rios (2013) informan que inhalar ozono puede provocar efectos como sequedad en la garganta, irritación de mucosas, tos, sofocación y taquicardia; exposiciones por más de 30 minutos a una concentración de 50 ppm incluso pueden provocar la muerte. Los autores describen que la exposición directa del ozono con la piel puede ocasionar irritación y quemaduras; además, a solo 0.01 ppm en el ambiente puede causar irritación en los ojos.

Tabla 5

Efectos de exposición al ozono a diferentes concentraciones.

Concentración [µg/m³]:	Concentración [ppm]	Efectos
30	0.01	El ozono es perceptible al olfato.
70	0.04	Comienza a presentarse una leve irritación ocular.
100	0.06	Puede presentarse dolor de cabeza.
160	0.09	Vuelve a los animales vulnerables a infecciones pulmonares.
160-200	0.09-0.11	Comienza a presentarse disfunción pulmonar.
200	0.11	Inactiva el sistema inmune y aumenta la cantidad de leucocitos.
240-300	0.14-0.17	Presencia de ataques de asma.
240-700	0.14-0.40	Reduce la capacidad física de las personas.
400	0.23	Tos, puede provocar cambios hormonales y enzimáticos.
800	0.46	Presencia de inflamación en los tejidos.
1,000	0.57	Posibilidad de alteración en cromosomas humanos.

Fuente: (Shirk, 2000).

Dentro de la normativa mexicana, el 19 de agosto de 2014 fue publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la Norma Oficial Mexicana: “Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente y criterios para su evaluación, NOM-020-SSA1-2014; la cual indica que la concentración horaria de ozono debe ser menor o igual a 0.095 ppm y el promedio de las concentraciones de 8 horas seguidas (la concentración de la hora de interés y las concentraciones de las 7 horas anteriores a esta) debe ser menor o igual a 0.070 ppm.

2.2 El proceso de ozonización

2.2.1 Generalidades de la ozonización

La ozonización es un proceso químico en el que se aprovechan las propiedades del ozono para diferentes propósitos, los más comunes son la desinfección del agua para su potabilización y la oxidación de materia orgánica en el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales para la remoción de contaminantes (Beutelspacher y Calderón, 2005). En palabras de Jaimes-Urbina y Vera-Solano (2020), la ozonización es un tratamiento de oxidación avanzada cuya implementación es práctica. Agregan que esta tecnología puede utilizarse a favor de la sostenibilidad, ya que promete ofrecer beneficios ambientales, sanitarios y económicos en los procesos cuyo fin sea la eliminación de diversos contaminantes.

Una ventaja de la ozonización es que el ozono es un gas altamente reactivo, lo que le permite reaccionar fácilmente con varias sustancias, causando que esta técnica tenga una amplia aplicabilidad en diversos campos como se explicó en el apartado 1.3 “Aplicaciones del ozono” (Monge y Poma, 2012). Así mismo, la primacía de la ozonización sobre el uso de otros agentes oxidantes se debe a que sus productos finales, como dióxido de carbono (CO₂), agua (H₂O) y ozono residual que rápidamente se transforma en oxígeno, son generalmente no tóxicos (Hoda, 2007). Para la desinfección del agua, ocasionalmente la ozonización es preferida sobre la cloración ya que logra eliminar un espectro mayor de microorganismos y no deja olores ni sabores en ella (Beutelspacher y Calderón, 2005). Por otro lado,

el punto débil es que, debido a su inestabilidad, el ozono debe producirse *in situ* y el equipo que se requiere para su generación, así como su mantenimiento, aún resultan costosos (Rodríguez, 2003) (Doménech, 2004).

Hoda (2007) presenta algunos de los propósitos para los que la ozonización es aplicada en el tratamiento de aguas como sigue:

- Lograr la oxidación de contaminantes inorgánicos como algunos metales pesados (Fe y Mn).
- Oxidar macro y microcontaminantes orgánicos como microorganismos, compuestos fenólicos, etc.; y aumentar la biodegradabilidad del agua.
- Controlar el crecimiento de las algas y desinfectar el agua.
- Mejorar otros procesos dentro de un tren de tratamiento, como la coagulación – floculación.

2.2.2 El proceso de ozonización a nivel de laboratorio

En 2012, Monge y Poma escribieron acerca de los ensayos que realizaron mediante la técnica de ozonización para reducir el surfactante aniónico dodecilsulfonato sódico en medio acuoso. En la Figura 4 se muestra el sistema utilizado por los autores con un reactor de 500 mL de capacidad y un generador de ozono CDP 8000 (5 g O₃/h) que incluye filtros de partículas, secadores de aire, manómetros, un inyector Venturi, accesorios y conexiones. Sin embargo, el banco no contempla destructores de ozono ni equipo de medición. Optaron por medir el consumo de ozono a través de las trampas (d) con un método de titulación química.

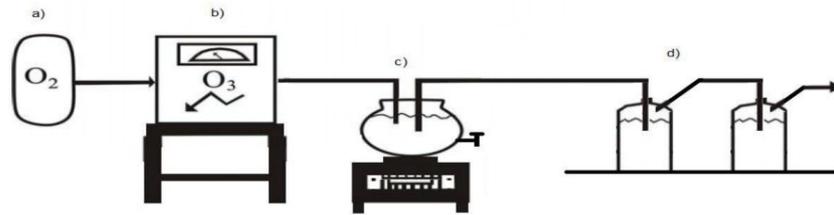


Figura 4

Esquema de banco utilizado para el sistema de ozonización por Monge y Poma (2012).

Nota: a) Fuente de oxígeno, b) Generador de ozono, c) Reactor, d) Trampas. Adaptado de Esquema del sistema de ozonización: a) Fuente de oxígeno, b) Generador de ozono, c) Reactor, d) Trampas, (p. 42) [Esquema], por Monge y Poma, 2012, Repositorio institucional – UNCP (<https://n9.cl/yypyl>)

En 2013, Camarena y Rios reportaron en un trabajo de tesis sus experimentos de laboratorio utilizando la ozonización. Su objetivo fue identificar la cinética de inactivación de la bacteria *Escherichia coli*. En el escrito, no incluyen el diagrama de flujo de la ozonización, pero describen que el equipo generador de ozono, modelo CDP8000 (5 g O₃/h), mismo que fue usado por Monge y Poma en 2012, se conecta a un matraz Erlenmeyer de 250 mL, el cual funciona como el reactor del sistema, e inmediatamente después se enciende para continuar con el ensayo. El equipo generador de ozono usado por los autores incluye filtros de partículas, secadores de aire, manómetros, un inyector Venturi, accesorios y conexiones.

Veliz et al. (2016) expusieron sus resultados de experimentos realizados a escala de laboratorio en un tren de tratamiento que incluye coagulación – floculación, sedimentación, filtro de arena y ozonización al final del tren; hace mediciones de concentraciones en el gas entrante y en el líquido del efluente (ozono disuelto) y cuenta con destructores de ozono y trampas para la seguridad del operador. Su objetivo era evaluar el proceso de coagulación – floculación, filtración y ozonización en el tratamiento de agua residual municipal para su reutilización en el sector agrícola. Para sus experimentos ocuparon un banco de ensayo como el

que se muestra en la Figura 5, con un reactor o columna de burbujeo cilíndrica de 5 L de capacidad.

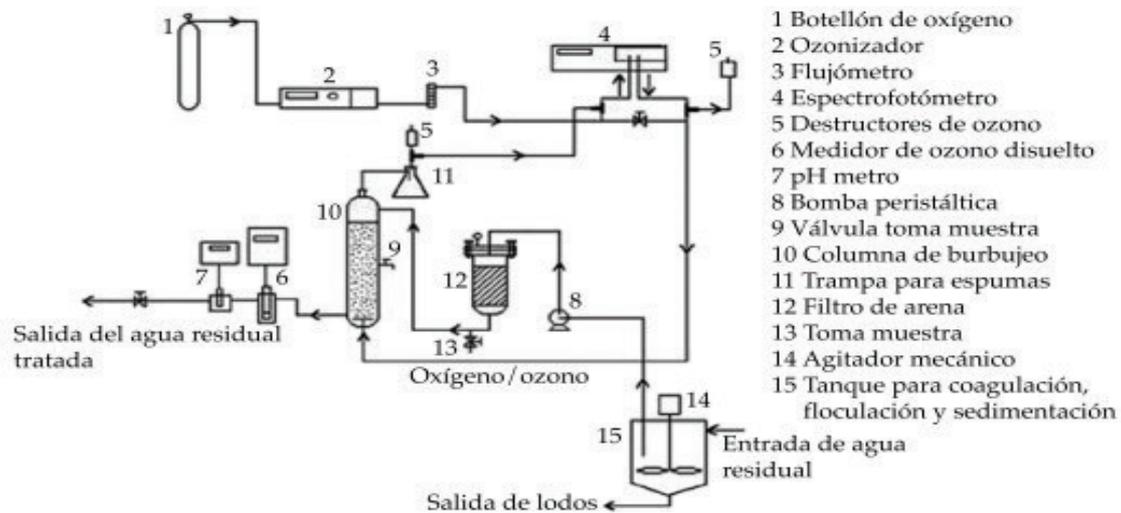


Figura 5

Esquema de banco utilizado para ensayos de ozonización por Veliz et al. (2016).

Nota: Adaptado de Diagrama de flujo utilizado a escala de banco, (p.21) [Esquema], por Veliz et al., 2016, Revista Scielo (<https://n9.cl/ochds5>)

Por su parte, Aguirre (2022) mostró en su trabajo de tesis los resultados durante pruebas con ozono para definir un proceso que le de resistencia a la tracción – elongación y a la abrasión a un tejido plano de 100% algodón. Como reactor, utilizó una cámara hermética a base de vidrio de elaboración propia de dimensiones 70 cm, 30 cm y 30 cm de largo, ancho y alto, respectivamente; con un volumen de 63 L. Usó un cañón generador de ozono de marca Ozonec PS-127 con una producción de ozono de 60,000 mg/h. La autora siempre tuvo presente las medidas de seguridad para el manejo del ozono por lo que recomienda que en caso de derrames y fugas se debe de abandonar la habitación o zona de exposición y utilizar equipo autónomo de respiración.

En la Figura 4 y Figura 5 se ilustran dos tipos diferentes de bancos de ozonización a escala de laboratorio que usaron Monge y Poma (2012) y Veliz et al. (2016), respectivamente. Además, en la Figura 6 se muestra el diagrama del banco

de ozonización que fue utilizado por Hoda (2007) en sus experimentos sobre el tratamiento de aguas residuales procedentes de la industria textil.

Algunos elementos están presentes en los tres bancos de ozonización previamente mencionados, es decir, son partes fundamentales del banco porque sin ellas no podría funcionar adecuadamente. Por el contrario, y dependiendo de la complejidad del banco que cada autor integró, se puede notar que algunos de ellos tienen partes complementarias que otros omiten. En la Tabla 6 se muestra una comparación de las partes que conforman cada uno de los tres bancos de ozonización.

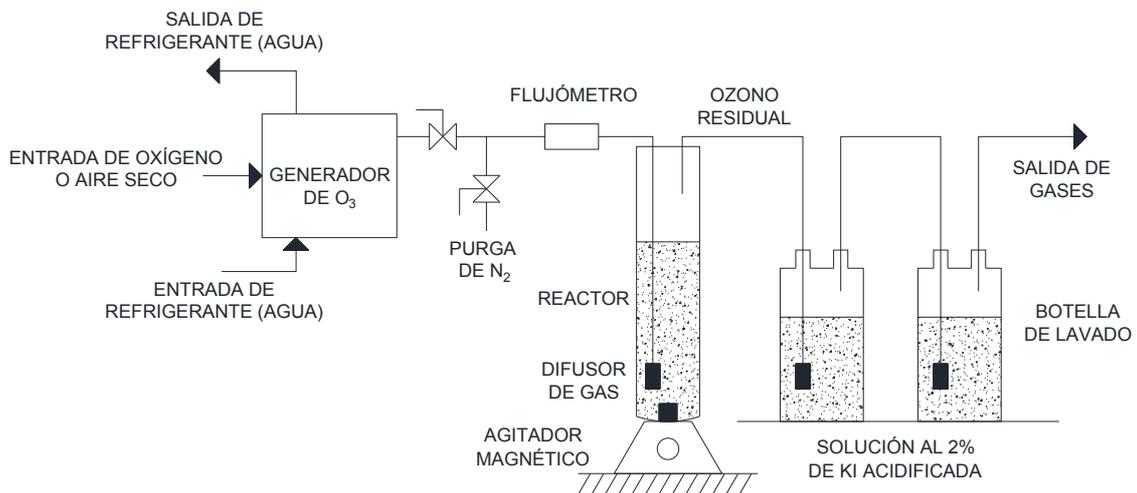


Figura 6

Esquema de banco de ozonización utilizado por Hoda (2007).

Nota: Adaptado de Schematic Representation of the Ozonation set-up, (p.101) [Esquema], por Hoda, 2007, Egyptian journal of aquatic research (<https://n9.cl/r0gbw>)

Tabla 6

Elementos que integran tres bancos de ozonización distintos.

Elemento	Banco integrado por:		
	Monge y Poma (2012)	Veliz et al. (2016)	Hoda (2007)
Fuente de oxígeno	✓	✓	✓
Generador de ozono	✓	✓	✓
Reactor	✓	✓	✓
Trampa de agua o KI	✓	✓	✓
Flujómetro a la entrada (gas)	-	✓	✓
Medidor de ozono a la entrada	-	✓	-
Destruyores de ozono	-	✓	-
Agitador magnético	-	-	✓

Nota: KI: Fórmula química para el yoduro de potasio.

De acuerdo con los autores y el análisis anterior, se puede llegar a la conclusión que un banco para llevar a cabo experimentos de ozonización al menos requiere de una fuente de oxígeno, un equipo generador de ozono, un reactor donde se lleve a cabo el proceso químico y una o varias trampas de agua o de yoduro de potasio (KI) que garanticen la absorción y destrucción del ozono antes de salir del sistema. Una peculiaridad del banco integrado por Hoda (2007) es que incluye un agitador magnético que ayuda a lograr una completa uniformidad en el agua que se encuentra ozonizándose en el reactor. El banco más completo y seguro de operar de los tres es el que utilizaron Veliz et al. (2016), el cual incluye destructores de ozono y un medidor de concentración de este gas a la entrada del sistema. Este banco forma parte de un tren de tratamiento que además de la ozonización, incluye coagulación – floculación y filtración.

Camarena y Rios (2013) explican que para la formación *in situ* del ozono, los generadores comerciales suelen usar el método de descarga por efecto corona, es

decir, utilizan electricidad para disociar las moléculas de O_2 y posteriormente formar O_3 . Agregan que la corona de descarga eléctrica puede estar formada por dos tubos concéntricos o por dos placas planas paralelas. Los autores señalan que existen dos posibilidades para alimentar al generador de ozono: con aire, logrando concentraciones de 1 a 3% de O_3 en la mezcla o con oxígeno puro, logrando una concentración de hasta 6%.

Debido a los peligros que el ozono puede provocar a la salud humana, el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST, 2018) de España, en su versión de la Ficha Internacional de Seguridad Química del ozono, recomienda que la ozonización sea realizada en ambientes con una adecuada ventilación, contar con un punto de extracción de gas localizado (como una chimenea) y/o utilizar protección respiratoria. Además, sugiere que no haya presencia de llamas, chispas y se evite fumar porque, aunque el ozono no es combustible, facilita la combustión de otras sustancias. Así mismo, cuando el generador de ozono se encuentre encendido, Camarena y Rios (2013) aconsejan permanecer lejos del banco de ozonización como sea posible para evitar cualquier posible contacto con el ozono.

Para Beutelspacher y Calderón (2005) es necesario que los bancos de ozonización cuenten con destructores que eliminen el ozono residual que se produce durante este proceso por lo peligroso que es y para el cumplimiento de la NOM-020-SSA1-2014. Rodríguez (2003) sostiene que los métodos de destrucción de ozono más utilizados son la destrucción térmica, que consiste en calentar el gas de salida hasta $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ por periodos cortos de tiempo, y la destrucción termocatalítica, que se fundamenta en el uso de catalizadores de paladio, manganeso u óxidos de níquel que aceleran la reacción de destrucción del ozono. El autor añade que, en los procesos industriales, el método de destrucción más utilizado es mediante la absorción directa con luz ultravioleta, similar al proceso natural de destrucción del ozono estratosférico.

Para garantizar la seguridad del usuario al momento de llevar a cabo sus experimentos, es importante conocer los materiales que pueden ser utilizados para

el control y manejo del ozono ya que debido a su alta reactividad se requieren materiales que resistan a su poder oxidante, como el vidrio (Aguirre, 2022). En la Tabla 7, con información presentada por Beutelspacher y Calderón (2005), se muestra la clasificación de algunos materiales según su idoneidad y conveniencia para estar en contacto con el ozono, resistir el desgaste que este puede provocar y evitar accidentes durante su operación.

Tabla 7

Clasificación de materiales para estar en contacto con el ozono.

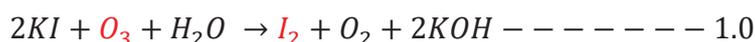
Material	Clasificación
Silicón	Excelente
Acero inoxidable 316	Excelente
Caucho sintético Viton	Excelente
Titanio	Excelente
Teflón	Excelente
Tungsteno	Excelente
Vidrio	Excelente
Cobre	Bueno
Bronce	Bueno
PVC	Bueno
Aluminio	Bueno

Fuente: (Beutelspacher y Calderón, 2005)

Existen diversos métodos para llevar a cabo la medición del ozono que entra y sale de un sistema. En palabras de Beutelspacher y Calderón (2005), el proceso de medición de ozono consiste en conocer cuál es la concentración a la que se encuentra este gas diluido en otro gas (en fase gaseosa) o en un líquido (fase líquida). Los autores mencionan que existen métodos basados en la colorimetría para determinar la concentración del ozono residual en agua previamente ozonizada. Explican que uno de ellos es mediante el uso del compuesto N,N-Dietil-p-fenilendiamina (DPD) que consiste en hacer reaccionar al compuesto con una

muestra de agua ozonizada la cual se tornará de color rosa y su tonalidad será proporcional a la concentración de ozono residual en el agua.

Por otro lado, Camarena y Rios (2013) explican que es posible conocer la concentración del ozono en fase gaseosa o líquida con el método iodométrico, el cual consiste en el uso de una solución de ioduro de potasio (KI). Los autores describen que para conocer la concentración en fase líquida es necesario mezclar el agua a medir con la solución de KI, mientras que para conocerla en la fase gaseosa se requiere hacer burbujear un volumen conocido del gas a medir dentro de la solución de KI. Como se muestra en la reacción (ecuación 1.0), se produce yodo el cual se titula con tiosulfato de sodio (Na₂S₂O₃), cuyo consumo es el indicador de la concentración de ozono (Camarena y Rios, 2013) (Cremasco et al., 2013).



Camarena y Rios (2013) indican que, para realizar el cálculo final de la concentración de ozono atrapado en la solución de KI, se debe de tomar una muestra de la solución, usualmente 100 mL, y se le deben de agregar 5 gotas de disolución indicadora de almidón para después agregar cierta cantidad de tiosulfato sódico hasta la decoloración de la muestra. Los autores sugieren utilizar la ecuación 2 para realizar el cálculo donde “A”, en mililitros, es la cantidad necesaria de tiosulfato sódico para decolorar los “n” mL que se tomaron como muestra de los “N” mL de la solución total de KI. El resultado de la ecuación estará dado en miligramos de ozono que, conociendo el volumen de gas que pasó por la solución, fácilmente se calcula la concentración media de ozono al dividir la masa obtenida en la ecuación entre el volumen de gas que circuló por la solución.

$$mg \text{ de } O_3 = A * 0.065 * 24 * \frac{n}{N} \text{ --- 2.0}$$

Cuando se realizan experimentos con ozonización, es importante que el investigador defina las variables que estarán involucradas en sus pruebas. Por ejemplo, Aguirre (2022) en su trabajo sobre la aplicación de ozono en tejidos de algodón utiliza al tiempo de exposición de las muestras al ozono como la principal

variable de control en sus pruebas. Otra variable que utilizó el autor fue el estado de la tela, sea seco o mojado. Reforzando la importancia del tiempo de ozonización de las muestras como variable experimental, Beutelspacher y Calderón (2005) concluyen que el tiempo de ozonización puede variar según el volumen de agua a desinfectar sin alterar la eficiencia del proceso. De este modo, los autores recomiendan tiempos de exposición de 10, 5 y 2.5 minutos para desinfectar 20, 10 y 5 litros de agua, respectivamente.

Monge y Poma (2012) en sus experimentos de ozonización utilizan como variables independientes el caudal de gas de entrada (L/min) y el tiempo de ozonización (min). Como variable dependiente tomaron en cuenta la concentración de dodecilsulfonato sódico en medio acuoso, cuya medición y monitoreo eran los objetivos de sus trabajos. Este patrón se repite en los trabajos de Camarena y Rios (2013), quienes tomaron en cuenta como variables independientes el flujo de gas de entrada (1, 2 y 3 lpm), que a su vez está relacionado con la concentración de ozono, y el tiempo de ozonización (30, 45, 60, 120, 180, 240 y 300 segundos).

2.2.3 Antecedentes en la aplicación de la ozonización

Como se mencionó anteriormente, la primera vez que se utilizó la palabra “ozono” para referirse a este peculiar gas fue en 1840 por Schönbein; sin embargo, fue hasta 1886 que se descubrió su poder desinfectante, lo que despertó el interés de algunos europeos por experimentar y descubrir su eficiencia en este proceso (Rodríguez, 2003) (Langlais et al., 1991). Así fue como se construyó la planta piloto en Martinikenfelde, Alemania; cuyas investigaciones publicadas en 1891 demostraron la alta eficiencia del ozono para eliminar bacterias presentes en el agua (Langlais et al., 1991). Tan solo dos años más tarde, en 1893, se instaló la primera planta de tratamiento con aplicación de ozonización a gran escala en Holanda, Países Bajos (Rodríguez, 2003).

Los estudios de doctorado en materia del ozono del francés Marius Paul Otto lo llevaron a fundar en 1897 la primera empresa especializada en la construcción e instalación de equipos para ozonización (Langlais et al., 1991). Sin embargo, el

primer generador industrial de ozono fue construido por Werner Von Slemans en 1857 (Ozone Solutions, s/f). El ozono llegó por primera vez a Estados Unidos en 1903, cuando se incluyó a la ozonización en una planta de tratamiento de aguas municipales en la ciudad Cataratas del Niágara, Nueva York (Ozone Solutions, s/f).

La planta construida en Niza, Francia; se considera como el lugar de nacimiento de la ozonización porque fue la primera vez que se aplicó este método de desinfección para tratar grandes cantidades de agua y con fines de potabilización (Ozone Solutions, s/f). La planta de Niza ha contemplado la ozonización desde que fue construida en el año 1906 hasta nuestros días (Rodríguez, 2003). Más adelante, el ozono fue utilizado por primera vez en la industria alimentaria en 1909, específicamente al ozonizar los fríos almacenes de carne para prolongar su vida útil (Ozone Solutions, s/f).

En el marco de la Primera Guerra Mundial, el físico alemán Albert Wolff utilizó ozono para tratar enfermedades dermatológicas en 1915 (Ozone Solutions, s/f). A causa de la guerra y de las investigaciones sobre gases tóxicos para utilizarse en la misma, la popularidad de la ozonización en procesos de desinfección bajó y el desarrollo de su tecnología se estancó durante los primeros años del siglo XX, siendo remplazada por la cloración (Langlais et al., 1991). No obstante, uno de los países que continuó con la construcción de plantas de ozonización fue Francia que en 1936 contaba con cerca de cien y en otros países de Europa ya existían cerca de cuarenta (Langlais et al., 1991) (Rodríguez, 2003).

En 1939 se descubrió que el ozono es capaz de prevenir el crecimiento de levadura y de moho en los almacenes de frutas y así retardar su descomposición (Ozone Solutions, s/f). Después de 1945, cuando la Segunda Guerra Mundial había terminado, la construcción de plantas de ozonización y su popularidad volvieron a tomar relevancia (Langlais et al., 1991). Para mediados del siglo XX el ozono se empezó a utilizar en tratamientos de cáncer y a partir de 1970 se implementó por primera vez la ozonización en plantas de purificación para agua embotellada (Ozone Solutions, s/f). Actualmente, aunque el uso del cloro en la desinfección de agua es el método más usado alrededor del mundo, la ozonización ha sido protagonista en

algunos países como Francia, Canadá y Alemania (Beutelspacher y Calderón, 2005).

2.3 La propiedad intelectual en México

2.3.1 Organismo encargado y tipos de propiedad intelectual

Según la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI, 2020), la propiedad intelectual (PI) se refiere a todas las creaciones del intelecto, abarcando desde marcas, signos comerciales, obras de arte, literatura, invenciones, programas informáticos y demás signos comerciales. En México, la Secretaría de Economía (2019) divide a la propiedad intelectual en dos grupos: los derechos de autor y la propiedad industrial. En el primero se encuentran las obras que son producto de la mente del creador como obras literarias o musicales y en el segundo se encuentran las invenciones y registros como las patentes, modelos de utilidad, marcas, nombres comerciales, etc.

Con respecto a la propiedad industrial, es la Secretaría de Economía a través del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), quien legalmente administra el sistema de la propiedad industrial (Secretaría de Economía, 2019). El IMPI es un organismo público descentralizado (es decir, que cuenta con autoridad propia) cuyo objetivo es proteger la propiedad industrial y promover su respeto en beneficio del desarrollo de México (Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial [IMPI], 2023).

El IMPI (s/f), en su Guía sobre Invenciones: Patentes y Modelos de Utilidad, expone que las invenciones deben contar con algunos requisitos dependiendo si se trata de una patente o de un modelo de utilidad. Los requisitos son: novedad, actividad inventiva y aplicación industrial. El primero se refiere a todo lo que no está incluido en el estado de la técnica, siendo este el conjunto de conocimientos técnicos que han sido publicados y difundidos en el país o en el extranjero. El segundo se refiere al proceso creativo cuyos resultados no sean evidentes para un especialista en la materia y el tercero alude a que tenga capacidad de ser producido o aprovechado en alguna actividad económica.

De acuerdo con la Secretaría de Economía (2019) y con el IMPI (s/f), los tipos de propiedad industrial que son protegidos por el instituto reciben el nombre de figuras jurídicas y se dividen en tres:

- Patentes: Cuando el producto o proceso es nuevo a nivel internacional. Debe de cumplir con tres requisitos: novedad, actividad inventiva y aplicación industrial. Tiene una vigencia de 20 años y la duración estimada del trámite es de 3 a 5 años.
- Modelo de utilidad: Cuando se modifican productos existentes para que mejore su desempeño o su funcionalidad. Debe de cumplir con dos requisitos: novedad y aplicación industrial. Su vigencia es de 15 años y la duración estimada del trámite es de un año y medio; el costo de este trámite es menor que el de una patente.
- Diseños industriales: Que protege las creaciones como los modelos industriales, dibujos industriales, marcas, avisos comerciales, nombres comerciales y la denominación de origen.
- Así mismo, el IMPI (s/f) señala que no son patentables invenciones cuya explotación comercial vaya en contra del orden público y los procedimientos biológicos como la clonación de seres humanos, modificaciones genéticas al ser humano, razas animales, etc.

Adicionalmente, la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial (2020), señala que se entregará un derecho exclusivo y temporal de explotación a quien realice y tramite una de las figuras jurídicas anteriormente descritas. También señala que este derecho se otorga a través de una patente cuando se trata de una invención y a través de un registro cuando se trate de un modelo de utilidad, de un diseño industrial o de un esquema de trazado de circuito integrado. Los derechos de la propiedad industrial se caracterizan por tres principales aspectos: la exclusividad de que solo el titular puede aprovechar comercialmente su invento, la territorialidad de que los derechos otorgados por el IMPI son de validez nacional y la temporalidad, que se refiere a la duración del derecho otorgado (Secretaría de Economía, 2019).

2.3.2 Proceso típico para el reclamo de propiedad industrial

A pesar de no ser un trámite obligatorio, cualquier persona física o moral, previamente dada de alta en el Sistema de Administración Tributaria (SAT), puede realizar el trámite del registro de su proyecto ante el IMPI y protegerlo para su exclusivo aprovechamiento (Secretaría de Economía, 2023). Como primer paso es recomendado solicitar un estado de la técnica en la materia de la invención para evitar coincidencias entre la propia invención y las anteriormente protegidas y publicadas (Secretaría de Economía, 2023). El resultado del estado de la técnica es un conjunto de documentos emitidos por el IMPI que contiene un resumen de las publicaciones e invenciones existentes de diferentes sitios de protección industrial alrededor del mundo que están relacionadas con la nueva invención y su propósito es que el inventor conozca lo que ya existe para reivindicar lo que es nuevo.

Así mismo, en el Reporte del Estado de la Técnica se muestran los productos que más se asemejan a la nueva invención y señala si existen similitudes que pudieran perturbar el proceso de protección. Para este fin, el IMPI clasifica las invenciones encontradas en cuatro categorías.

- Particularmente relevante por sí solo (color rojo): Las invenciones encontradas pueden afectar considerablemente al requisito de novedad.
- Particularmente relevante, en combinación (color amarillo): Las invenciones encontradas pueden afectar al requisito de actividad inventiva.
- Particularmente relevante por sí solo y en combinación (color rojo y amarillo): Las invenciones encontradas pueden afectar tanto al requisito de actividad inventiva como al de novedad.
- Antecedente tecnológico (color verde): Las invenciones encontradas no afectan ni al requisito de actividad inventiva ni al de novedad.

El proceso de solicitud de propiedad industrial se puede realizar de manera presencial en las oficinas gubernamentales correspondientes o en línea, a través del Portal de Acceso a Servicios Electrónicos (PASE), donde es necesario abrir una

cuenta para comenzar con la solicitud (Marcas y Patentes, 2020). Una vez contando con usuario y contraseña en el PASE, se debe iniciar sesión en el portal y dar clic en la opción de Patente en Línea para comenzar con el llenado de la información. (Catálogo Nacional de Regulaciones, 2023). Debido a las características del banco de ozonización y con la orientación de la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados (SIEA) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), la figura jurídica que se reclamará en este trabajo será la de modelo de utilidad.

Después de dar clic en Patente en Línea, en el PASE; se debe seleccionar la opción de Nueva Solicitud y escoger el tipo de figura jurídica que se desea reclamar (modelo de utilidad en este caso) (Marcas y Patentes, 2020). Inmediatamente después aparecerá un formulario que se debe completar con la información y los datos sobre la invención: título del invento, fechas de divulgación previa (si es el caso), información personal de los solicitantes y de los inventores; información acerca de los apoderados legales y de personas autorizadas para llevar a cabo el trámite (si es el caso); y es necesario cargar un documento PDF con la memoria técnica de la invención, los dibujos complementarios y los anexos que solicite el IMPI (Marcas y Patentes, 2020). La memoria técnica es un documento que se compone por cuatro principales apartados: descripción, reivindicaciones, resumen y dibujos; mientras que los anexos que pudiera solicitar el IMPI varían según el tipo de solicitud, por ejemplo: una carta poder, cesión de derechos, traducciones, listado de secuencias, etc. (IMPI, s/f).

En lo que se refiere a la memoria técnica, Anaya (2020) describe cada uno de los apartados con los que se debe de elaborar y algunas de las principales características que deben resaltar de cada uno:

- Descripción de la invención: Debe incluir un título claro y congruente, especificar el campo técnico de la invención, hablar brevemente sobre los antecedentes y lo que ya existe de antemano y debe de contener dos descripciones de la invención: una breve donde se señalen sus características principales y otra detallada donde se hable a fondo del funcionamiento del nuevo producto.

- Reivindicaciones: Son las características esenciales del producto que el inventor buscará proteger. Por lo mismo, deben ser claras y completas por sí mismas.
- Resumen: Incluye una síntesis de la divulgación antes redactada en el apartado de la descripción, de las reivindicaciones y facilita comprender el problema técnico alrededor de la invención, su solución, sus aplicaciones y su propósito. Debe ser un apartado breve.
- Dibujos: Son las imágenes y figuras necesarias para entender la invención, se usa numeración arábica para su etiqueta y no deben ser presentadas con medidas o textos. Preferentemente, deben de referirse a ellas en los apartados anteriores mediante el número de la figura entre paréntesis.

Después de terminar la captura de la solicitud, automáticamente se generará el formato de la solicitud de registro a través del portal y el mismo sistema se conducirá hacia los métodos de pago disponibles: tarjeta de crédito o débito, pago electrónico o pago en ventanilla; y una vez reconocido el pago se deberá firmar la solicitud a través del PASE (Marcas y Patentes, 2020). Con la solicitud firmada, comenzará el Examen de Forma, cuyo propósito es verificar que los documentos cargados al portal cumplan con los requisitos de formato que solicita el IMPI; además, el instituto tiene máximo tres meses para emitir la primera respuesta del examen (IMPI, s/f).

De acuerdo con Anaya (2020), algunos de los requisitos de formato para la memoria técnica y que son revisados en el Examen de Forma son los siguientes:

- Usar hojas de papel bond, color blanco y tamaño carta o A4. Utilizarse por un lado y en sentido vertical, sin rasgaduras, arrugas, borraduras o tachaduras. Deben ser totalmente legibles.
- Presentar la memoria técnica en el siguiente orden: descripción, reivindicaciones y resumen. Las hojas se deben numerar (números arábigos) colocados en el centro de la parte superior o inferior, respetando los márgenes indicados.

- Los márgenes mínimos son: 2 cm en la parte superior, inferior y en el margen derecho y de 2.5 cm en el margen izquierdo.
- Los márgenes máximos son: 4 cm en la parte superior y en el margen izquierdo y de 3 cm en el margen derecho e inferior.
- Todo debe ser impreso en color negro.
- Utilizar interlineado de 1.5 o doble espacio y se sugiere que el texto sea Arial 10.
- En el margen izquierdo se debe numerar los renglones de cada hoja de 5 en 5 líneas.
- No incluir dibujos ni figuras dentro del texto.
- Se permiten cuadros, fórmulas matemáticas ecuaciones químicas, etc.
- Las figuras deben ser numeradas consecutivamente tal y como fueron referidas en la descripción (Figura 1, Figura 2, etc.).

De acuerdo con la guía de patentes y modelos de utilidad del IMPI (s/f), el siguiente paso es realizar el Examen de Fondo, donde el instituto verifica que la invención sea realmente registrable o patentable. Según la misma guía, el trámite finaliza al otorgar los derechos a los inventores y publicar el registro o la patente en la Gaceta de la Propiedad Industrial. Es importante aclarar que el tiempo de vigencia de la patente o modelo de utilidad comienza a contar desde el día en el que empieza la solicitud en el PASE, no en el momento en el que el trámite finaliza (Marcas y Patentes, 2020).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA GENERAL

3.1 Fundamentación

Con el apoyo del profesor asesor de este trabajo escrito, y como parte del proyecto del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) con clave “A1-S-10275” y título “Lodo aerobio granular operado con purga y recirculación de sólidos, en búsqueda de estabilidad de los gránulos y reducción de los lodos”; se desarrolló este trabajo de tesis con el fin de documentar y probar un banco de ozonización estandarizado para su uso en investigaciones en materia de tratamiento de agua y de lodos producto de sedimentadores. Así mismo, el trabajo escrito reúne y presenta los formatos y la documentación necesaria para realizar la solicitud ante el IMPI del reclamo de la propiedad industrial sobre el banco de ozonización. La metodología para alcanzar los objetivos de esta tesis se divide en cinco etapas.

Durante la primera etapa se buscó información sobre el estado del arte de la ozonización mediante la revisión de libros, artículos o cualquier otra fuente de carácter oficial. Esto permitió obtener información acerca de los conceptos básicos relacionados con el ozono y la ozonización, sus usos y aplicaciones; sus beneficios, desventajas y los daños que puede provocar a la salud de las personas ante exposiciones a diferentes concentraciones. También se investigó acerca del sistema de la propiedad intelectual en México, los tipos de propiedad que se protegen, el organismo encargado de otorgar los derechos de protección y el proceso típico que se debe llevar a cabo para solicitar la protección de una invención. La información analizada y resumida se presenta en este trabajo escrito en el Capítulo II.

3.2 Descripción de antecedentes

El objetivo de esta etapa fue presentar un análisis de los bancos de ozonización propios de los investigadores que han publicado algún trabajo que incluya experimentos o pruebas utilizando la técnica de ozonización. De esta manera, es posible dar un contexto general sobre la falta de disponibilidad de un

banco o montaje estandarizado, eficiente, práctico y que permita llevar a cabo los procesos típicos de los experimentos que involucran el uso del ozono. El análisis realizado a cuatro bancos de ozonización diferentes se presenta en este trabajo escrito en el apartado de “Antecedentes en la aplicación de la ozonización”.

3.3 Integración y descripción del banco de ozonización

Durante esta etapa se realizó la integración del banco de ozonización con los equipos especializados y con el material de ferretería brindados por el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA). El objetivo de esta etapa fue integrar y documentar el banco de ozonización, describiendo cuidadosamente su funcionamiento, los equipos que lo conforman y sus especificaciones; las conexiones entre sus elementos, los materiales empleados y presentar diagramas e imágenes que ayuden a la comprensión del montaje realizado. Así mismo, se redactó un manual de operación que indica los pasos a seguir para garantizar que su uso sea seguro y adecuado. Los resultados de esta etapa de la metodología se presentan en los tres primeros incisos del Capítulo IV.

3.4 Pruebas de funcionamiento del banco de ozonización

Posteriormente, se hicieron pruebas de funcionamiento en el banco de ozonización para conocer y presentar sus prestaciones, tiempos de respuesta y los valores de los parámetros de interés durante experimentos típicos de ozonización (concentraciones de ozono a la entrada y salida, temperatura del agua, presión en el sistema, etc.). Se realizaron tres pruebas, como se describen a continuación:

- Prueba 1. Prueba de tiempo de respuesta de los medidores: con esta prueba se midió el tiempo que le toma a los medidores de ozono equipados en el banco de ozonización para ofrecer lecturas con un 95% de precisión de la concentración promedio medida en un intervalo de tiempo.
- Prueba 2: Prueba de funcionamiento de la solución de KI: con esta prueba se comprobó la eficiencia que tiene el yoduro de potasio (KI) en solución para

retener el ozono residual en experimentos de duración corta. Para llevar a cabo la prueba, se colocó un recipiente con solución de KI después del reactor y se comprobó que el medidor de ozono, ubicado después de la solución de KI, marcó una concentración de ozono en el gas de 0.00% en todo momento.

- Prueba 3: Prueba de la variación de la concentración de ozono en diferentes escenarios: en esta prueba se midió la concentración de ozono en el sistema variando el nivel de potencia del generador de ozono (desde 25% hasta 100%) y el flujo de oxígeno que lo alimenta (de 1 a 5 L/min).

Los resultados de esta etapa de la metodología se presentan en el cuarto inciso del Capítulo IV.

3.5 Documentación y solicitud de registro de la propiedad industrial.

Finalmente, con la asesoría del personal de la Secretaría de Investigación y Estudios Superiores (SIEA) de la Universidad Autónoma del Estado de México, se reunieron los documentos necesarios para solicitar el registro de la propiedad industrial ante el IMPI. El proceso constó de los siguientes pasos:

- Se solicitó al IMPI el estado de la técnica sobre la ozonización. Esto sirvió para conocer lo que actualmente se encuentra protegido tanto en México como internacionalmente en materia de dispositivos de experimentación con ozono.
- Se realizó un análisis exhaustivo del estado de la técnica enviado por el IMPI, identificando las cualidades de los dispositivos existentes protegidos y notando las diferencias que el banco de ozonización propio tiene con respecto a lo existente; conociendo así las características que se pueden proteger del montaje propio.
- Elaboración de la memoria técnica de la invención y del oficio de solicitud de registro de la propiedad industrial, documentos requeridos por el IMPI para

iniciar el proceso de la otorgación de derechos de propiedad industrial a los inventores del desarrollo tecnológico. Los resultados de esta etapa de la metodología se presentan en el Capítulo V.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS SOBRE LA INTEGRACIÓN DEL BANCO DE OZONIZACIÓN

4.1 Integración del banco y su funcionamiento

Es de importancia mencionar que los equipos para la integración del banco de ozonización se seleccionaron de manera juiciosa para obtener de ellos el mayor beneficio y evitar cualquier avería en su funcionamiento. Los materiales que predominan en el banco son el acero inoxidable, el vidrio, la tubería FEP y plásticos resistentes a la acción oxidativa del ozono como el caucho de silicona. En la Figura 7 se muestra un diagrama de la disposición y el orden de los equipos en el banco, así como la dirección de flujo del ozono, la entrada del oxígeno, las salidas de agua, la instalación eléctrica que alimenta a los equipos, las salidas analógicas para la lectura de datos en la computadora y los accesorios requeridos.

El primer paso para la integración del banco de ozonización fue armar el estante de alambre y colocar simultáneamente los equipos y las seis repisas de acuerdo con el tamaño real de estos (véase Figura 7). Cabe señalar que la ventaja que ofrece este tipo de estante es que permite la movilidad del banco al estar equipado con cuatro llantas. Para fijar los equipos al estante y evitar su movimiento se usaron cinchos de nylon. Los equipos especializados para la generación y el monitoreo del ozono se ubican intencionalmente en los niveles superiores del estante para que el reactor, que usualmente contendrá agua, se situó en los niveles inferiores del banco. Esto para evitar que el agua suba hacia los equipos y los pueda averiar, siendo esta situación solo posible en el caso de que se presenten presiones negativas en el sistema y el agua sea succionada desde el reactor hacia los niveles superiores del banco.

Para proteger los equipos incluso ante esta posibilidad de presencia de presiones negativas en el sistema, se instala una trampa de agua entre el reactor y el medidor de ozono a la entrada (véase “Trampa de agua 1” en la Figura 7). Tomando en cuenta que el medidor de ozono a la entrada debe recibir el ozono en estado totalmente seco y cualquier tipo de humedad le provocaría un daño en su

Por otro lado, para la medición de la concentración de ozono a la salida del sistema se seleccionó el modelo 465M de Teledyne Instruments que, aunque su tiempo de respuesta para ofrecer lecturas con 95% de exactitud ante cambios de concentraciones es de máximo cuarenta y cinco segundos, ofrece la ventaja de que el mismo equipo puede recibir el ozono húmedo que sale del reactor, tratar este gas para removerle el agua, medir la concentración del ozono ya seco y después destruirlo para liberarlo por la chimenea. Esto se debe porque, como se ve en la Figura 8, el modelo 465M viene equipado con su propia trampa de agua y su propio destructor de ozono.



Figura 8

Trampa de agua (abajo) y destructor de ozono (arriba) en el modelo 465M.

Otra particularidad de este modelo es que a la entrada del equipo cuenta con una bomba que succiona un caudal de gas constante, de modo que es imprescindible que siempre haya gas disponible en la tubería de entrada para ser succionado y evitar averías en la bomba. Así mismo, ante la posibilidad de que el flujo de gas sea mayor al que la bomba puede succionar, fue necesario considerar una bifurcación para que el caudal excedente tenga salida, esto se logró colocando una conexión tee de bronce (metal resistente a la oxidación del ozono) antes de la entrada al medidor de ozono.

Por razones de seguridad, se consideró un equipo destructor de ozono eléctrico para el flujo de gas excedente que no pasa por el medidor de ozono a la salida del sistema. Se trata del destructor de ozono modelo ODS-1H-SCFM que debe su alta eficiencia de hasta el 99.9% a su método de transformar el ozono en oxígeno mediante la destrucción catalítica. Al ser eléctrico, cuenta con una banda calefactora que evita que la humedad presente en el ozono se condense dentro del destructor y lo dañe. Es decir, el destructor puede recibir sin complicaciones el flujo de ozono húmedo que proviene del reactor.

El ozono que se genera en el banco durante los experimentos tiene tres posibles salidas, dos de ellas están después de pasar por el reactor y la trampa de KI, cuya destrucción de ozono residual se logra por medio del destructor equipado en el medidor a la salida del sistema y por el equipo destructor eléctrico, como se describió anteriormente. El banco integra un juego de válvulas que permiten dirigir el flujo de ozono hacia el reactor o, si se desea, desviarlo sin pasar por él y directamente expulsarlo (véase “Válvulas” en Figura 7). Esta última opción es la tercer salida posible del ozono y para asegurar las condiciones de seguridad en la operación del banco también se tomó en cuenta la instalación de un destructor para esta salida. Se trata de un destructor fabricado por Teledyne Instruments que se comercializa como un accesorio del medidor de ozono modelo 465M de la misma marca. Esta salida no requiere de un tratamiento para retirar la humedad del ozono ya que, como se ha descrito, no tendrá contacto con el agua del reactor.

En la parte posterior del banco se colocó la chimenea que está formada por una tubería de PVC vertical de 1.8 m de longitud cuyo fin es expulsar lo más alto posible los residuos de gases utilizados durante los experimentos. Teniendo en cuenta que los destructores de ozono trabajan efectivamente, la chimenea ya no expulsará ozono; sin embargo, por seguridad es que se decide que la chimenea sea telescópica y capaz de levantarse al menos tres metros sobre el nivel del suelo. Cuando no se está usando, la chimenea descansa en una base para tubería de ½” colocada lo más bajo posible de modo que la altura de la chimenea en reposo no sobrepase la altura del banco y no dificulte su traslado. Cuando el banco se

encuentre en el sitio donde será utilizado, se debe levantar la chimenea tan alto como sea permisible y, con ayuda de un desatornillador, apretar uno de los tornillos que se encuentran en los soportes para que sostenga la chimenea en ese nivel.

Las tuberías FEP de 1/4" de las tres salidas de ozono descritas anteriormente llegan hasta la parte inferior de la tubería de PVC que formará la chimenea en la parte posterior del banco. Las tres tuberías FEP de 1/4" se introducen por una perforación hecha en la parte inferior de la tubería y suben por el interior de esta hasta salir ligeramente por el extremo superior de la chimenea. Es importante considerar que la longitud de las tuberías FEP que llegan a la chimenea deben de tener unos centímetros extras de holgura para permitir la movilidad de la chimenea ya que, como se ha descrito, la chimenea subirá y bajará cada vez que sea utilizado el banco.

En todas las conexiones mediante roscas NPT se utilizó cinta con acabado PTFE para posteriormente ajustarlas lo más posible con ayuda de llaves de ferretería para evitar fugas de gas durante la operación del banco. Las conexiones a base de roscas NPT se encuentran en los adaptadores del juego de válvulas y en los adaptadores para las conexiones de los equipos, como los destructores de ozono residual, la Trampa de agua 1, los medidores y el generador de ozono, con la tubería FEP que conducirá el ozono. Para reforzar los demás tipos de conexiones, especialmente las conexiones entre las tuberías y las espigas, se utilizaron cinchos de nylon para que funcionen como abrazaderas. Específicamente en las conexiones de tuberías con espigas para la conducción de agua no se utilizó ningún refuerzo en las conexiones ya que no resultaba necesario.

Una vez que los equipos estuvieron colocados en el lugar que les corresponde, asegurados con los cinchos de nylon y realizadas las conexiones de los adaptadores de roscas NPT, el siguiente paso fue instalar las tuberías y sus accesorios. Se utilizó tubo flexible de poliuretano de 3/8" O.D. para conducir el oxígeno desde el tanque hasta el generador de ozono. Medio metro antes de la llegada al generador se instaló un racor neumático especial (véase material No. 5)

El banco cuenta con cuatro equipos que requieren de energía eléctrica para funcionar: el generador de ozono, ambos medidores de concentración y el destructor eléctrico. Para facilitar la instalación eléctrica, así como el control del encendido y apagado de cada equipo se utilizaron tres multicontactos cada uno equipado con un switch (véase material No. 22). Uno de ellos funciona como interruptor principal y es el que está conectado a la extensión que a su vez se conecta al “no-break” y este directamente a la corriente eléctrica. Al interruptor principal se conectan los otros dos multicontactos, que funcionan como interruptores para los medidores de ozono, el generador y el destructor eléctrico de ozono (estos dos últimos tienen interruptor propio).

En la Figura 11 se observa un diagrama de la instalación eléctrica en el banco y de los interruptores existentes etiquetados con números que indican el orden en el que deben de ser encendidos los equipos para comenzar a utilizarlos. Es importante resaltar que, para encender el medidor de ozono a la salida del sistema (modelo 465M), es necesario que el gas se encuentre ya en circulación por las tuberías ya que la bomba del medidor se enciende instantáneamente y podría presentar averías si no hay flujo de gas disponible para ser succionado. Al terminar de utilizar el banco los interruptores deben de apagarse en el orden inverso a como fueron encendidos.

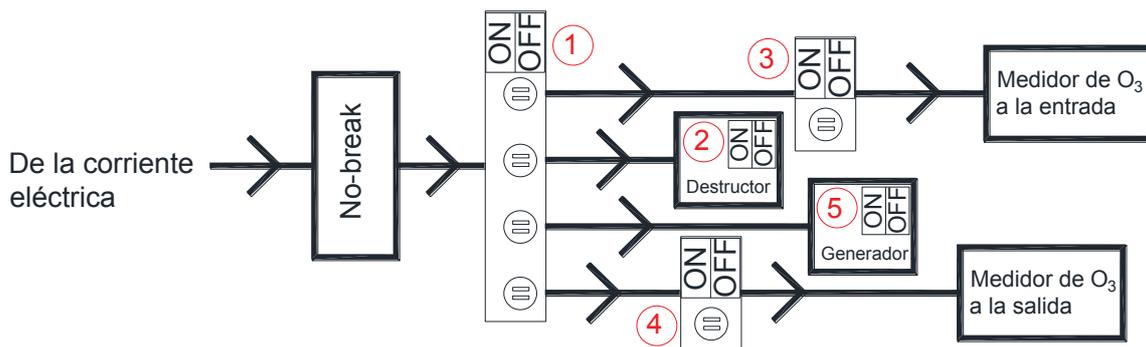


Figura 11

Diagrama de la instalación eléctrica en el banco de ozonización.

Nota: Los números indican el orden sugerido para el encendido de los equipos.

grosor de pared de 1.6 mm, presión de trabajo máxima de 170 psi y de ruptura de 510 psi. Este tubo sirve para conducir el gas oxígeno desde el tanque hasta el equipo generador de ozono.



Figura 13

Tubo flexible de poliuretano marca Parker modelo #95U-6-062-0500.

4. El usuario debe contar con un tanque de oxígeno. Se sugiere que esté equipado con un flujómetro que permita controlar el flujo de oxígeno que sale del tanque hacia el generador.



Figura 14

Tanque de oxígeno, flujómetro y manguera.

- Racor neumático a presión de la serie LF 3000® marca Parker, número de pieza #3106 60 00, estilo “Push-in-Fitting Tube to Tube” con tamaño de conexiones de 3/8”; para la conexión y desconexión rápida de la tubería que alimenta de oxígeno al generador de ozono.



Figura 15

Racor neumático a presión marca Parker.

- Equipo generador de ozono equipado con luces indicadoras LED, flujómetro, perilla para el control de la concentración de ozono a la salida, un sistema propio de alerta, amperímetro y marco y conexiones de acero inoxidable. En la Tabla 8 se muestran las especificaciones del equipo.

Tabla 8

Especificaciones técnicas del equipo generador de ozono.

Característica	Especificación
Modelo	A2ZZ-10G
Conexión entrada de oxígeno	1/4"
Conexión salida de ozono	1/4"
Capacidad de producción máxima	10 g/h
Alimentación eléctrica	110 V 60Hz
Máximo flujo de alimentación de oxígeno	4 L/min
Sistema de refrigeración	Aire/Ventilación
Potencia	190 W

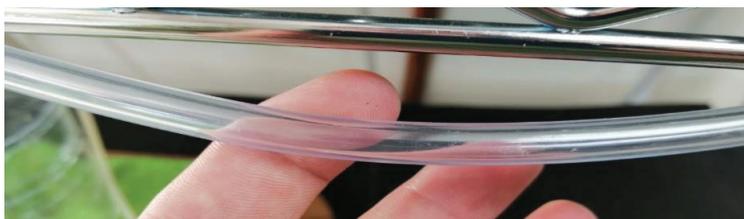


Figura 17

Tubo flexible de poliuretano.

8. Equipo medidor de ozono a la entrada del sistema fabricado por Teledyne Instruments y calibrado por Oxidation Technologies, modelo 454H. El equipo cuenta con una pantalla en el panel frontal de 4 dígitos, una salida analógica estándar de 0-5 voltios para la obtención de datos por computadora y botones para la calibración a cero y la visualización de la presión en el sistema. Además, cuenta con cuatro indicadores digitales LED para el diagnóstico del equipo. El modelo 454H incluye compensación de temperatura y de presión para que las mediciones sean normalizadas a condiciones estándar y sean más precisas. Otras de sus especificaciones se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9

Especificaciones técnicas del medidor de ozono a la entrada del sistema.

Característica	Especificación
Rango de medición	0-5% en peso
Método de medición	Absorción de luz UV
Tiempo de respuesta	2 segundos al 95%
Rango de temperatura	5-45° C
Conexiones de gas	1/4" D.O.
Flujo	0.5 - 5 lpm
Peso	1.27 kg
Alimentación eléctrica	90-265 V 47-63 Hz
Exactitud	±1% de la escala completa
Condición del gas de entrada	Seco

Fuente: (Oxidation Technologies, 2017)



Figura 20

Conjunto de dos válvulas de acero inoxidable de 1/4" y sus accesorios.

Nota: 1: válvulas, 2: adaptadores macho – espiga, 3: adaptador tee y 4: adaptadores macho – macho.

11. Un destructor de ozono fabricado por Teledyne API y vendido por Oxidation Technologies. Se comercializa como un accesorio complementario de los medidores de ozono modelos 465L, 465H y 465M con número de parte: 048990300.



Figura 21

Destructor de ozono con número de pieza: 048990300.

12. Tubería de PVC, diámetro comercial de 1/2", marca Charlotte Pipe, modelo SDR 13.5, presión de trabajo de 315 psi a una temperatura de 23° C, elaborada bajo la norma ASTM D2241. Para fijar la tubería al estante se necesitaron tres soportes de pared para tubería de 1/2" equipados con un tornillo que permita sostener ésta a diferentes niveles y una base para tubo de 1/2" para reposar la tubería cuando no esté en uso.



Figura 22

Tubería PVC Charlotte Pipe de 1/2" en la parte posterior del banco de ozonización.

Nota: 1: tubería que forma la chimenea del banco, 2: dos de las tres abrazaderas de pared para su fijación.

13. Una trampa de agua para proteger al medidor de ozono a la entrada en caso de presencia de presiones negativas en el sistema. Se seleccionó la trampa modelo WT-100 Ozone Compatible comercializada por Ozone Solutions marca Armstrong con cuerpo transparente que permite observar su correcto funcionamiento, peso de 0.82 kg, máxima presión de trabajo de 150 psi, conexión para salida de agua hembra NPT de 1/2", conexión para la entrada de gas hembra NPT de 3/4" y máxima temperatura de trabajo de 65.56° C. Para su instalación se requiere de un adaptador macho NPT de 1/2" – espiga de 1/2", un adaptador macho NPT de 3/4" – macho **NPT** de 3/4", un adaptador

tee hembra NPT de 3/4" – hembra NPT de 3/4" – hembra NPT de 3/4", dos adaptadores macho NPT de 3/4" – hembra NPT de 1/4" y dos adaptadores macho NPT de 1/4" – espiga lisa de 1/4".



Figura 23

Trampa de agua WT-100 Ozone Compatible de Ozone Solutions.

Nota: 1: Trampa, 2: adaptador macho – espiga, 3: adaptador macho – macho, 4: adaptador tee, 5: adaptadores macho – hembra, 6: adaptadores macho – espiga lisa.

14. Manguera industrial de 1/2", transparente, marca Surtek, resistente a temperaturas desde 10 a 60 °C e ideal para la conducción de fluidos a baja presión.



Figura 24

Manguera Surtek transparente de 1/2"

15. Un recipiente de vidrio para utilizarlo como reactor; además, se necesitan accesorios como un tapón de caucho de silicona del tamaño adecuado para que lo selle herméticamente y dos insertos de vidrio para facilitar el paso de la tubería a través del tapón (entrada y salida).



Figura 25

Reactor (izquierda) y tapón de hule e insertos de vidrio (derecha).

16. Un recipiente de vidrio para su uso como trampa de agua o de la solución de KI. Específicamente, se utilizó un Matraz Erlenmeyer de boca angosta con capacidad de 1,000 mL, con número de artículo KX-26500-1000 de la marca KIMAX. Igualmente, se dispuso de un tapón de caucho de silicona, resistente al ozono, del tamaño adecuado para sellarlo y dos insertos de vidrio para facilitar el paso de la tubería a través del tapón (entrada y salida).

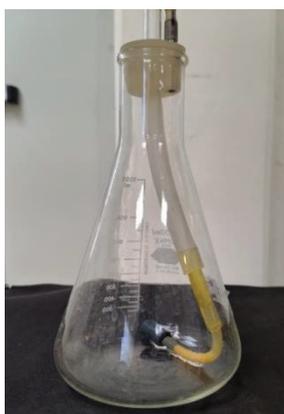


Figura 26

Trampa de agua o de KI y sus accesorios.

17. Dos difusores de piedra, resistentes al ozono, para la inyección del ozono en el agua. Uno de ellos con un diámetro de 3/4" y una longitud de 2" para instalarse en el reactor y el otro con un diámetro de 1/2" y con longitud de 1" para la trampa de KI.

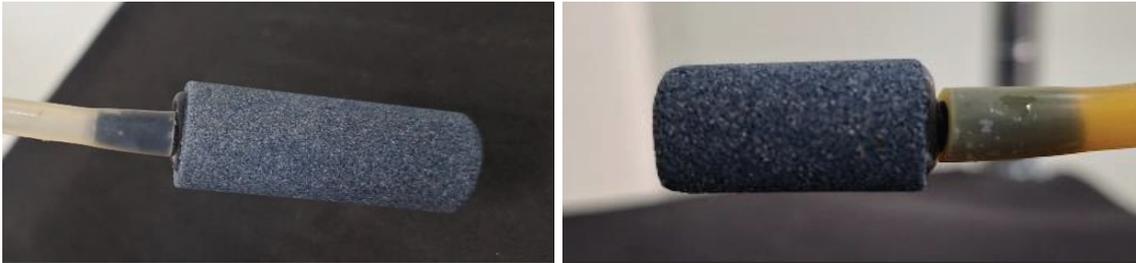


Figura 27

Difusores de piedra para el reactor (izquierda) y para la trampa de KI (derecha).

18. Un medidor de ozono modelo 465M fabricado por Teledyne Instruments y comercializado por Oxidation Technologies. El equipo utiliza el método de absorción de luz UV para medir la concentración de ozono. Además, tiene dos sensores: uno para propiamente medir el ozono y el otro para compensar los cambios en la intensidad de la lámpara y que estos no afecten las mediciones. El modelo cuenta con alarmas de advertencia y con un sistema de compensación de presión y temperatura. Para llevar a cabo las mediciones, el equipo toma una muestra de gas a una tasa de flujo constante entre 1.0 y 1.5 lpm; por lo que siempre debe tener gas disponible en la tubería de entrada para evitar que se dañe la bomba. Otras de sus especificaciones se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10

Especificaciones técnicas del medidor de ozono a la salida del sistema.

Característica	Especificación
Rango	0-3 % en peso
Exactitud	±1% de la escala completa
Resolución de las lecturas	0.001%
Tiempo de respuesta (95%)	<45 s

instalación y conexión con las tuberías del sistema se necesita de un adaptador hembra NPT de 1/2" – espiga de 1/2" y de un adaptador macho NPT de 1/2" – espiga de 1/2"; ambos de acero inoxidable. En la Tabla 11 se muestran otras especificaciones del destructor.

Tabla 11

Especificaciones técnicas del destructor eléctrico de ozono.

Característica	Especificación
Capacidad de flujo	1 CFM
Eficiencia	99.90%
Conexión de entrada	1/2" NPT
Conexión de salida	1/2" NPT
Material	Acero inoxidable
Potencia	25 W
Alimentación eléctrica	120 VAC 60 Hz
Pérdida de presión	0-0.25 psi
Máxima concentración de ozono	10% en peso
Rango de humedad del gas	0-100%

Fuente: (Ozone Solutions, 2023)



Figura 29

Destructor de ozono modelo ODS-1H-SCFM.

20. Una conexión tee de bronce espiga de 1/4" – espiga de 1/4" – espiga de 1/4".



Figura 30

Conexión tee de bronce con espigas de 1/4".

21. Una extensión eléctrica de uso rudo, marca Volteck, modelo ER-10X16, con 10 metros de longitud, cables de calibre 16 AWG y tres contactos.



Figura 31

Extensión eléctrica Volteck.

22. Tres multicontactos. El primero de ellos y el principal es de marca Volteck de 6 contactos, modelo MUL-660, cable de calibre 14 AWG supresor de picos de energía de hasta 600 julios. El segundo es de marca Steren con 6 contactos, modelo 905 – 040, cable de calibre 17 AWG supresor de picos de

hasta 90 julios de energía. El tercero es de marca Goodwill con 6 contactos, modelo 66900.



Figura 32

Multicontactos principal (abajo) y auxiliares (arriba).

23. Cable dúplex polarizado, transparente, calibre 22 AWG, marca Steren, modelo POP22 – 100 VTA, fabricado en cobre con aislante de PVC cristal, temperatura máxima 60 °C y tensión eléctrica máxima de 300 V.



Figura 33

Cable dúplex polarizado Steren.

24. Un conector de corriente jack (hembra) invertido 2.1 mm a dos terminales atornillables. Además, un conector de corriente de plug (macho) invertido de 2.1 mm a dos terminales atornillables. Ambos son de la marca Steren.

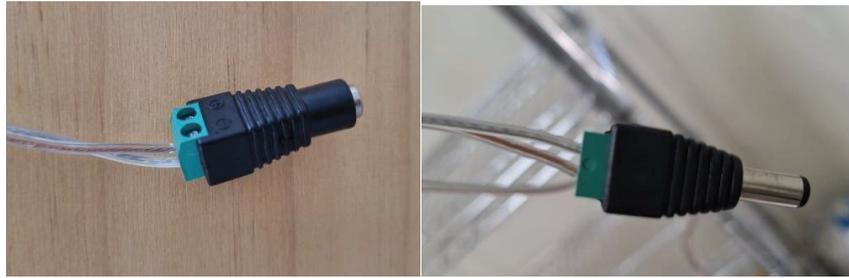


Figura 34

Conector de corriente jack (izquierda) y plug (derecha).

25. Dos terminales de latón redondas, hembra, con forro aislante color azul y dos terminales de latón redondas, macho, con forro azul aislante. Las cuatro terminales son de la marca Steren.

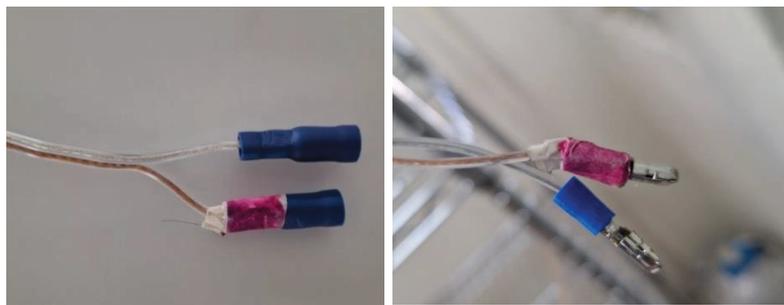


Figura 35

Dos terminales de latón hembra (izquierda) y dos macho (derecha).

26. El hardware Microlink 752 y Microlink 590, este último consiste en una unidad de terminales atornillables que se conecta al Microlink 752 y permite la lectura permanente de las señales emitidas por los medidores de ozono a través de los cables dúplex polarizados. El equipo Microlink 590 cuenta con filtro de ruido, protección contra tensiones eléctricas altas a la entrada, entradas de corriente alterna y convertidor de corriente a tensión eléctrica.

El dispositivo Microlink 752 se conecta por medio de USB a la computadora y permite medir las señales de tensión eléctrica recibidas en el Microlink 590. Las mediciones se realizan con base en señales de tensión eléctrica o con base en resistencia eléctrica. Cuenta con 16 canales de entrada analógica diferencial suficientes para monitorear máximo 16 entradas de tensión

28. Cinta de politetrafluoroetileno (PTFE), comercialmente conocido como Teflón, de 1/2" de ancho, color blanco para colocarla en las roscas NPT y evitar fugas del gas en las uniones.



Figura 38

Cinta de teflón en las uniones de roscas NPT.

29. Yoduro de potasio, reactivo de la línea de productos “anhydrous, free-flowing, Redi-Dri™, ACS reagent, ≥99%” con referencia de material 746428-1KG de la marca Sigma – Aldrich.

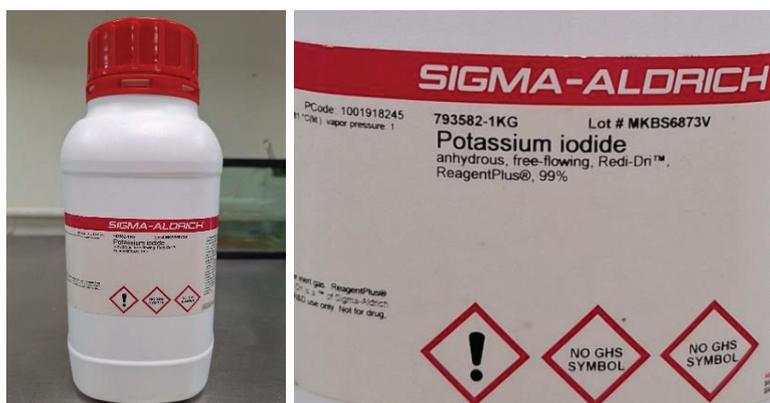


Figura 39

Frasco de KI de la marca Sigma – Aldrich (izquierda) y detalles de la etiqueta (derecha).

4.3 Costo del banco de ozonización

La Tabla 12 muestra el costo unitario de todos los elementos antes descritos y que se incluyen el banco de ozonización. También se indica la cantidad de los

presentan en la Tabla 13. La potencia eléctrica total instalada es de 0.319 kW (30 W del medidor a la entrada, 74 W del medidor a la salida, 190 W del generador de ozono y 25 W del destructor eléctrico). Se consideró una tarifa estándar de 1.27 MXN por kWh de energía, solo como ejemplo.

Tabla 13.

Costos por insumos del banco de ozonización considerando un uso de 30 min.

Insumo	Unidad	Costo unitario	Cantidad	Total
Yoduro de potasio en polvo marca Sigma - Aldrich	kg	\$7,344.00	0.020	\$146.88
Gas oxígeno grado 0, ultra alta pureza	L	\$0.80	90.0	\$71.71
Energía eléctrica	kWh	\$1.27	0.160	\$0.20
TOTAL				\$218.79

4.4 Manual de uso

Para utilizar de forma segura el banco de ozonización, así como evitar averías en los equipos especiales y materiales que lo conforman, se sugiere que se sigan los pasos siguientes:

1. Retirar los seguros ubicados en dos de las cuatro llantas que permiten el desplazamiento del banco y empujar el banco hacia el lugar deseado, preferentemente al aire libre o a un lugar con ventilación adecuada. Al llegar al sitio se deben de colocar los seguros de las llantas para evitar desplazamientos accidentales.
2. Poner en su lugar el recipiente de vidrio utilizado como reactor, cuya boca quede herméticamente sellada con el tapón de diámetro variable de silicón con el que el banco está equipado (si se requiere de un reactor que no pueda ser herméticamente cerrado con el tapón, se deberá de modificar o remplazar el tapón para asegurar que el reactor quede perfectamente aislado del exterior. Otro criterio que se debe tener en cuenta es el volumen de la muestra a ozonizar al momento de seleccionar el reactor. El reactor inicialmente instalado es de 2 L.

3. Teniendo en cuenta las mismas consideraciones explicadas en el paso 2 para el reactor, se debe colocar un recipiente de vidrio para la trampa de agua o trampa de yoduro de potasio (KI), se recomienda que tenga una capacidad de 1 L aproximadamente. Asegurarse que el frasco quede herméticamente cerrado.
4. Preparar la muestra de agua o cualquier objeto que vaya a ser sometido a ozonización, colocar la muestra en el reactor de vidrio previamente seleccionado, cerrarlo herméticamente y colocar el reactor en su posición adecuada, como se muestra en la Figura 7.
5. Cuando sea necesario (en experimentos de corta duración) o cuando lo desee el usuario, preparar la solución de KI al 2% de concentración (en masa) y colocar la solución en la trampa seleccionada anteriormente, cerrarla herméticamente y colocar la trampa en su lugar correspondiente, como se ilustra en la Figura 7.
6. Conectar la manguera que alimenta de oxígeno al equipo generador de ozono mediante el conector especial previamente adecuado que permite una conexión rápida y segura.
7. Con ayuda de un destornillador de punta Phillips (punta de cruz), levantar y asegurar la chimenea lo más alto que sea posible, se sugiere asegurar la chimenea apretándola con un solo tornillo para evitar el desgaste de la tubería que la conforma.
8. Encender el equipo de cómputo donde se hará la recolección y el manejo de los datos. Posteriormente, se deben unir los conectores jack y plug y las terminales de latón para conectar los cables dúplex polarizados que mandan la señal eléctrica analógica desde ambos medidores de ozono en el banco hasta los equipos Microlink 590 y Microlink 752 que reciben las señales y las transforman en señales digitales que se envían después a la computadora. Las conexiones se encuentran previamente adaptadas para que sean fáciles de realizar mediante conectores rápidos y seguros.
9. Con ayuda de una extensión, realizar la conexión eléctrica preferentemente desde un equipo “no-break” para proteger a los equipos eléctricos. Conectar

la extensión al “no-break” y posteriormente conectar la conexión principal del banco (la que alimenta de electricidad a todo el banco) a la extensión.

10. Verificar que las válvulas que dividen el flujo de gas, hacia el reactor o hacia la chimenea, no se encuentren ambas cerradas para evitar un aumento en la presión del sistema que pueda dañar los conductos y conexiones. Para llevar a cabo el proceso de ozonización es necesario que la válvula que permite el paso del gas hacia el reactor se encuentre abierta y que la otra válvula se encuentre cerrada.
11. Tomando las precauciones necesarias, abrir la válvula del tanque de oxígeno (preferentemente equipado con un flujómetro) y permitir un flujo de salida ligeramente superior al flujo con el que se desea trabajar en el banco durante los procesos de ozonización. Si el proceso hasta aquí es adecuado se debe notar como la muestra de agua dentro del reactor burbujea debido al flujo de oxígeno que recibe; si no se nota este burbujeo debe cerrar la válvula del tanque de oxígeno y revisar la disposición de las válvulas que incluye el banco, como se explicó en el paso 10, y la hermeticidad de los tapones.
12. Encender los aparatos electrónicos en el siguiente orden: primero el interruptor principal, después el interruptor del destructor de ozono, en seguida el interruptor del medidor de ozono a la entrada y finalmente el interruptor del medidor de ozono a la salida del sistema.
13. Calibrar el medidor de ozono a la entrada, para hacerlo se deben de presionar ambos botones etiquetados con la palabra “Zero” al mismo tiempo e inmediatamente soltarlos. Se logra la calibración cuando el medidor indique una concentración de ozono de 0%.
14. Calibrar el medidor de ozono a la salida, para hacerlo se debe de presionar el botón “CFG”, en seguida presionar el botón “▼” una vez para que en la pantalla se muestre la opción “DIAG” y presionar el botón “ENT”. En el nuevo menú de opciones que se mostrará, se debe presionar el botón “▼” en tres ocasiones para que la pantalla muestre la opción “AUTO ZERO”. Por último, presionar dos veces el botón “ENT” y esperar a que el proceso de calibración

termine. Se puede verificar la calibración cuando el medidor indique una concentración de ozono de 0%.

15. Verificar que el equipo Microlink 752 esté conectado mediante un cable USB al equipo de cómputo equipado con el software Windmill para la recolección de datos. Se deben abrir las herramientas “Windmill Logger” y “Windmill Chart” y en la pestaña de “File” dar clic en la opción de “Restore Logger Setup” (si no se ha creado el ajuste, deberá crearlo). El “Logger Setup”, o configuración de registro, es la combinación de ajustes que utiliza el software para mostrar los datos recibidos.
16. Darle nombre al archivo creado y manualmente iniciar (dando clic en “Start”) la lectura y almacenamiento de las concentraciones de ozono que emiten los medidores. Para verificar que todo se encuentra en orden, las lecturas para este momento se deben de mantener en 0.0% tanto en las lecturas de entrada de ozono como en las de salida, ya que todavía no se está produciendo ozono.
17. Con precaución y recomendando el uso de una mascarilla, acercase al generador de ozono y encenderlo. Además, se aconseja que antes del encendido inhale y sostenga la respiración hasta que encienda el equipo y se aleje un par de metros antes de respirar normalmente. El software puede medir el tiempo de ozonización, sin embargo, si se requiere mayor precisión por parte del usuario, se recomienda utilizar un cronómetro.
18. Tomar en cuenta al momento de leer las concentraciones de ozono en la computadora que el medidor de ozono a la salida presenta un ligero retardo en las lecturas (no mayor a 45 s, según la ficha técnica del equipo). Es decir, cuando la concentración de ozono cambia, el equipo requiere de un periodo de tiempo para que la lectura del medidor sea precisamente la concentración de ozono real. Esto no sucede en el medidor de ozono a la entrada que es capaz de mostrar cambios en la concentración de ozono instantáneamente.
19. Cuando el objetivo del experimento se haya cumplido o el tiempo deseado haya finalizado, con precaución y portando su mascarilla, apagar el generador de ozono. Igualmente, se recomienda que inhale antes de

acercarse al banco, sostener la respiración un momento mientras se acerca, apagar el generador de ozono y alejarse un par de metros antes de respirar normalmente.

20. Guardar las lecturas registradas en el equipo de cómputo, cerrar los programas de lectura de datos y apagar el equipo.
21. Apagar los equipos electrónicos, para ello, apagar primero el interruptor del medidor de ozono a la salida, después el interruptor del medidor de ozono a la entrada, en seguida el interruptor del destructor de ozono y finalmente, el interruptor principal. Desconectar y recoger la extensión en caso de haber utilizado una.
22. Cerrar la válvula del tanque de oxígeno, pero dejar el flujómetro aún abierto para que el oxígeno que queda en el conducto termine de salir.
23. Desconectar los cables que mandan la señal eléctrica desde los medidores hasta la computadora.
24. Esperar hasta que el reactor no burbujee, lo que indicará que el oxígeno residual ha terminado de salir. En seguida, se deberá cerrar el flujómetro del tanque de oxígeno y, posteriormente, desconectar la tubería que alimenta de oxígeno al generador de ozono utilizando el mecanismo de la conexión rápida con la que cuenta el banco. Se recomienda tapar el extremo de esta tubería con un poco de plástico para evitar la entrada de partículas de polvo o insectos.
25. Con ayuda de un destornillador de punta Phillips (punta de cruz), liberar la chimenea que se encuentra sujeta con el tornillo y bajarla hasta que repose en su base.
26. Ya que hayan pasado varios minutos después de haber apagado el generador de ozono se puede destapar el reactor y la trampa de agua o de KI removiendo su respectivo tapón de silicón. Disponer del contenido de los recipientes como el usuario lo considere adecuado y lavarlos perfectamente con suficiente agua y jabón.

27. Remover los seguros de las llantas para permitir la movilización del banco de regreso al laboratorio o a su lugar de reposo. Al llegar al destino deseado se deben de colocar los seguros para evitar desplazamientos accidentales.
28. Realizar limpieza general, enrollar y guardar la extensión y los cables de adquisición de datos.

4.5 Resultados de las pruebas de funcionamiento

4.5.1 Prueba de tiempo de respuesta de los medidores

Con el fin de conocer cuál es el tiempo de respuesta operacional del medidor de concentración de ozono a la salida y comparar este con el valor nominal indicado en sus especificaciones se realizó una prueba en el banco. Para su desarrollo, se dispuso de 1 L de agua limpia en el reactor de tal modo que el consumo del ozono dentro de él sería hipotéticamente nulo y por ende la concentración a la entrada y a la salida debería de coincidir. El generador se configuró para trabajar al 50% de su capacidad y el flujómetro (el equipado en el mismo generador de ozono) para permitir una entrada de oxígeno de 2.5 L/min. En esta prueba no se utilizó solución de KI por lo que el matraz Erlenmeyer se dejó vacío, como una trampa de agua.

La Tabla 23, en el Anexo 1, muestra los datos recopilados en esta prueba por cada minuto y se puede observar su representación gráfica en la Figura 40. Sin embargo, el sistema de adquisición de datos con el que se cuenta está configurado para guardar lecturas cada 5 segundos. A manera de ejemplo, para observar la lista de todos los datos obtenidos a cada 5 segundos durante esta prueba, diríjase al Anexo 1, a la Tabla 24.

En la Figura 40 se puede notar que el medidor a la entrada responde inmediatamente al encendido y apagado del generador de ozono, a diferencia del medidor a la salida que le toma tiempo pasar de lecturas de 0% a 3.5% y viceversa. Además, se puede ver que el medidor a la entrada, al inicio, muestra lecturas más altas y estas disminuyen conforme avanza el tiempo hasta llegar a ser constantes. Este efecto se debe al tiempo que tarda el generador de ozono en estabilizarse y ofrecer una concentración constante. Teniendo en cuenta que el generador de

ozono fue encendido en el segundo 25 y apagado en el segundo 645, el valor promedio de las lecturas del medidor de ozono a la entrada con el generador encendido es de 3.77%.

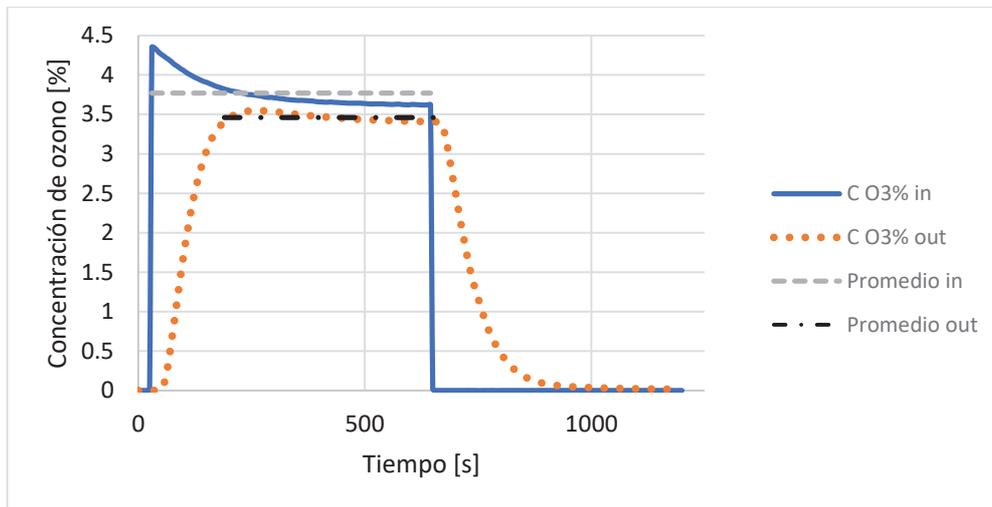


Figura 40

Gráfica de la concentración de ozono en porcentaje de masa en la prueba de tiempo de respuesta de los medidores.

Para calcular el valor promedio del medidor a la salida se tomaron en cuenta los valores desde el segundo 190 hasta el segundo 665, rango donde el medidor mostró lecturas aproximadamente uniformes. El promedio para el medidor a la salida es de 3.46%, es decir, 0.31% menor que el promedio del medidor a la entrada con una diferencia de 8.22%. Esta diferencia no puede ser debido al consumo de ozono en el reactor (ya que se utilizó agua potable), por lo que se debería a las diferencias en el cálculo de las concentraciones de los equipos y a su precisión. Para el cálculo de los promedios en las pruebas siguientes se seguirán los mismos criterios que en esta prueba para seleccionar los valores a considerar para el cálculo. Con base en la información anterior, el usuario puede incluir un coeficiente de corrección para hacer coincidir los dos promedios exactamente.

Reiterando, el valor promedio de las lecturas del medidor a la salida en esta prueba es de 3.46%. Para calcular el tiempo de respuesta operacional de este

medidor se tomó en cuenta el tiempo que le llevó pasar desde 0.00% hasta el 95% del valor promedio registrado por el medidor. El 95% de 3.46% es 3.29%. En la Tabla 14 se muestran las lecturas cada 5 segundos del medidor a la salida desde que el generador se enciende (en el segundo 25) hasta que las lecturas llegan y superan al valor de 3.29%.

Tabla 14

Concentraciones de ozono en el medidor a la salida después de encender el generador.

Tiempo [s]	Conc. %O₃ out
25	0.00
30	0.00
35	0.00
40	0.00
45	0.002
50	0.008
55	0.05
60	0.16
65	0.30
70	0.50
75	0.69
80	0.90
85	1.11
90	1.32
95	1.53
100	1.72
105	1.90
110	2.07
115	2.23
120	2.38
125	2.52
130	2.64
135	2.75
140	2.85
145	2.94
150	3.03

Tabla 14

Concentraciones de ozono en el medidor a la salida después de encender el generador (continuación).

Tiempo [s]	Conc. %O₃ out
155	3.11
160	3.17
165	3.23
170	3.27
175	3.31

Nota: 1% = 6,520 ppm.

Como se puede notar, a pesar de que el generador es encendido en el segundo 25, al ozono le toma tiempo para llegar y ser detectado por el medidor a la salida; según la Tabla 14 este tiempo es de aproximadamente 20 segundos. Así, el medidor comienza a registrar lecturas superiores a 0.00% en el segundo 45 y es hasta después del segundo 170 y antes del segundo 175 cuando llega a 3.29%. Esto quiere decir que el tiempo de respuesta del medidor para alcanzar el 95% del valor promedio de las lecturas es de 125 segundos (resultado de restar 170s – 45s).

Por otra parte, cuando el generador de ozono es apagado (segundo 645), las lecturas del medidor a la salida ahora deben de bajar desde su valor promedio en 3.46% hasta 0.00%. El 95% de ese trayecto es el valor 0.17%. En la Tabla 15 se muestran las lecturas del medidor a la salida después de apagar el generador.

Tabla 15

Concentraciones de ozono en el medidor a la salida después de apagar el generador.

Tiempo [s]	Conc. %O₃ out
645	3.41
650	3.41
655	3.41
660	3.41
665	3.40

Tabla 15

Concentraciones de ozono en el medidor a la salida después de apagar el generador (continuación).

Tiempo [s]	Conc. %O₃ out
670	3.37
675	3.29
680	3.16
685	3.01
690	2.84
695	2.67
700	2.52
705	2.34
710	2.19
715	2.03
720	1.88
725	1.73
730	1.59
735	1.47
740	1.36
745	1.27
750	1.17
755	1.08
760	0.99
765	0.90
770	0.81
775	0.74
780	0.68
785	0.62
790	0.57
795	0.52
800	0.47
805	0.43
810	0.39
815	0.36
820	0.32
825	0.29
830	0.27
835	0.24

Tabla 15

Concentraciones de ozono en el medidor a la salida después de apagar el generador (continuación).

Tiempo [s]	Conc. %O₃ out
840	0.22
845	0.20
850	0.18
855	0.17

Nota: 1% = 6,520 ppm.

Igualmente, el efecto de haber apagado el generador demora 20 segundos en llegar al medidor a la salida por lo que las lecturas comienzan a bajar hasta el segundo 665. El tiempo que le llevó al medidor para bajar desde 3.46% hasta 0.17% es de 190 segundos (resultado de restar 855s – 665s). Dependiendo del tipo de experimento que se realiza, los tiempos de respuesta de los equipos pueden ser relevantes o no, pudiendo ser este un criterio para decidir utilizar la opción de medición a la salida del sistema con la solución de KI en lugar de con el medidor.

4.5.2 Prueba de funcionamiento de la solución de KI

La segunda prueba fue realizada con el fin de observar la efectividad y el correcto funcionamiento de la solución de KI cuando esta se coloca en la trampa, después del reactor (véase Figura 7). Teóricamente, la solución de KI tiene la capacidad de atrapar importantes cantidades de ozono y destruirlo, como se ha discutido en el marco teórico de este trabajo. Además, el uso del KI es un método alternativo para estimar la masa de ozono saliente del reactor (Rakness et al., 1996). De la misma manera que en la primera prueba, en el reactor se colocó 1 L de agua limpia que, hipotéticamente, no debe de consumir ozono. El generador de ozono se configuró para trabajar al 50% de su capacidad y el flujómetro (el equipado en el mismo generador de ozono) para permitir una entrada de oxígeno de 3.0 L/min.

Para la solución de KI, se mezclaron 14 gramos de KI (véase material 29) con 686 gramos de agua limpia. En la Tabla 25, en el Anexo 1, se muestran las

concentraciones de ozono medidas a la entrada y a la salida del sistema a cada 30 segundos para esta prueba. Sin embargo, en la Figura 41 se muestra la información de manera gráfica para su mayor comprensión.

El generador de ozono fue encendido en el segundo 25, es por eso que en el segundo 30 la concentración a la entrada del sistema era ya de 4.04%. En la prueba anterior quedó evidente que transcurren cerca de 20 segundos desde que el generador de ozono es encendido hasta que lo detecta el medidor a la salida del sistema. No obstante, de forma congruente con el uso de la solución de KI, las lecturas de este medidor se mantuvieron en 0.00% durante toda la prueba.

Estas lecturas nulas se deben, evidentemente, al uso de la solución de KI en la trampa con la que dispone el banco de ozonización. Para conocer la concentración promedio y la cantidad de ozono que es destruida gracias a la solución de KI se requiere del empleo de un método de titulación química, bien documentado por Rakness et al. (1996). La aplicación de este método queda fuera de los alcances de la prueba y de los objetivos de este trabajo escrito.

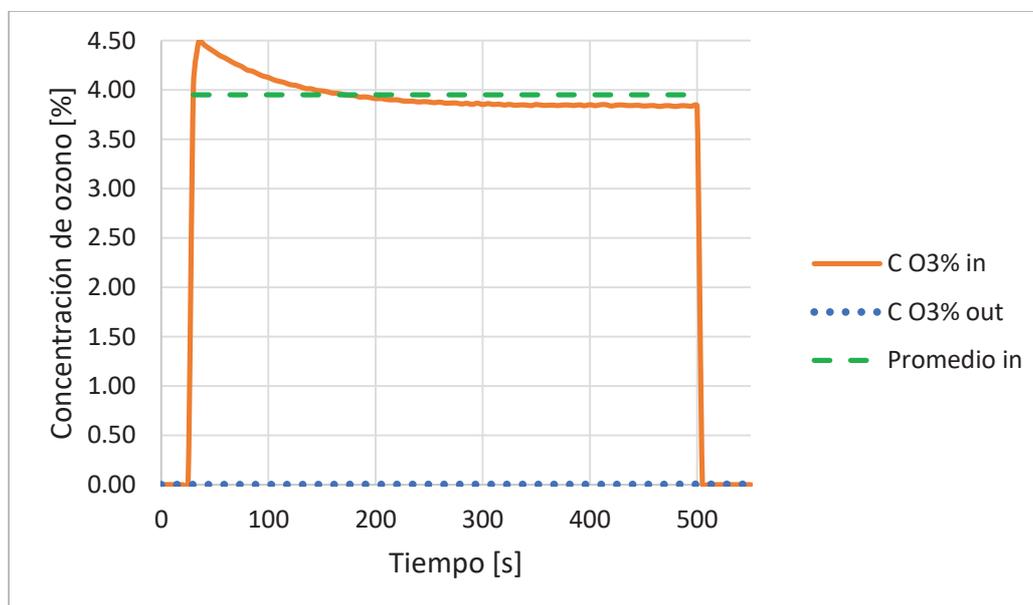


Figura 41

Gráfica de la concentración de ozono en porcentaje de masa en la prueba de funcionamiento de la solución de KI.

En la prueba anterior se describió el efecto del generador de ozono que al ser encendido le toma un pequeño tiempo para estabilizarse y entregar una concentración constante de ozono en la mezcla de gas. Por tal motivo, es importante conocer el promedio de las lecturas del medidor a la entrada del sistema, promedio que representa el valor constante de entrada de ozono al reactor. Teniendo en cuenta que el generador de ozono fue encendido en el segundo 25 y apagado en el segundo 500, el valor promedio de las lecturas del medidor de ozono a la entrada con el generador encendido es de 3.95%. Esta prueba demostró la eficiencia de la solución de KI para atrapar el ozono, ya sea como medida de seguridad para destruirlo o para estimar la cantidad de ozono que no reacciona.

4.5.3 Prueba de la variación de la concentración de ozono en diferentes escenarios

Para realizar esta prueba se dispuso de 700 mL de agua limpia en el reactor (por lo que teóricamente el consumo de ozono debe de ser nulo) y se dejó la trampa de KI vacía, trabajando simplemente como trampa de humedad. Es importante informar que el flujómetro en el tanque de oxígeno se configuró en 6 L/min y el flujómetro que se manipuló durante la prueba fue el que se encuentra en el mismo generador. Matemáticamente, se puede expresar esta prueba con la siguiente función:

$$\%ozono_producido = f(\text{potencia del generador}, \text{flujo de } O_2) \text{ --- 3.0}$$

Dicho en lenguaje común, el objetivo de esta prueba es conocer y observar la variación de la concentración de ozono en el banco y la respuesta dinámica del equipo generador variando el nivel de potencia del generador y el flujo de oxígeno que se le suministra. Además, la prueba sirve para asegurarnos de que las lecturas de los medidores son correctas, teniendo en cuenta la posibilidad de proponer un factor de corrección o de calibración si las mediciones a la entrada y a la salida no son exactamente iguales. Para definir las condiciones de la prueba, la variable del nivel de la potencia del generador tomo los valores de 25%, 50%, 75% y 100%. Para cada uno de estos niveles de potencia se hizo trabajar al generador con una entrada de oxígeno de 1, 2, 3 y 5 L/min; es decir, se hicieron 16 corridas distintas donde se

midió la concentración de ozono en la mezcla de gas a la entrada y a la salida del sistema.

4.5.3.1 *Corrida con el nivel de potencia del generador al 25%*

En la Tabla 26, en el Anexo 1, se muestran las lecturas cada 30 segundos de los medidores a la entrada y a la salida del sistema durante el tiempo en el que el generador de ozono trabajó al 25% de su nivel de potencia máxima, indicando también los tiempos en los que el generador trabajó con flujos de 1, 2, 3 y 5 L/min de entrada de oxígeno. En la Figura 42 se muestra la gráfica de las concentraciones de esta prueba para su mejor visualización. El generador fue encendido en el segundo 165.

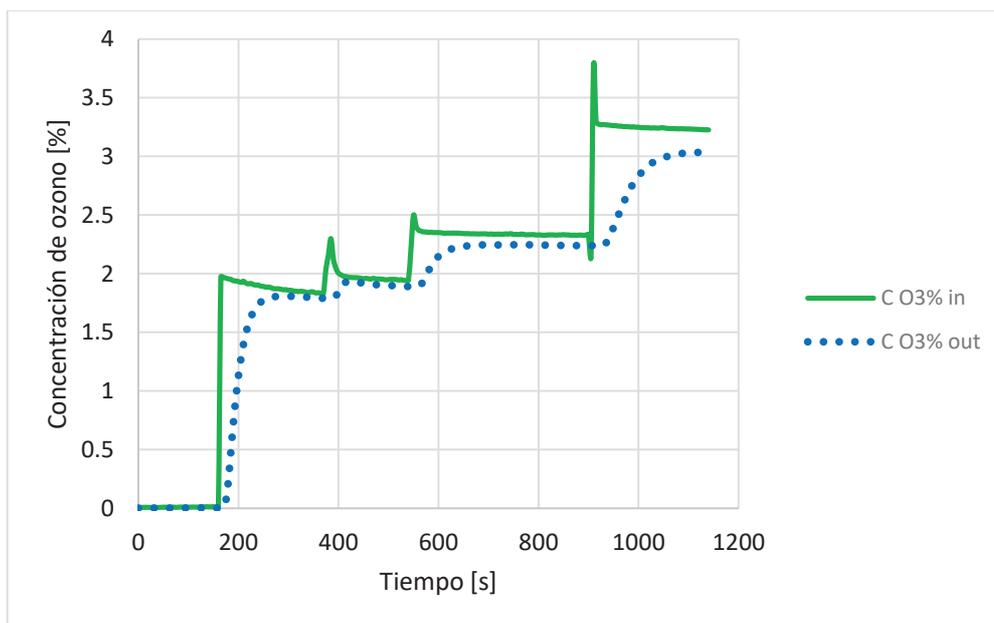


Figura 42

Gráfica de la concentración de ozono en porcentaje de masa en la prueba con el generador a 25% de nivel de potencia.

Nota: La forma de escalones que se puede apreciar en la gráfica muestra los cambios de flujo de 5, 3, 2 y 1 L/min.

Observando la gráfica anterior se puede notar el comportamiento de los medidores, mientras que el de la entrada responde rápido y presenta un pico al inicio debido al comportamiento del generador, al de la salida le lleva tiempo en presentar concentraciones constantes. Los valores promedio de las lecturas en los medidores se calcularon de la misma manera que como se han calculado en las pruebas pasadas y siguiendo los mismos criterios. En la Tabla 16 se muestran, para cada uno de los cuatro escenarios posibles en esta prueba, los valores promedio de concentración a la entrada y a la salida, los amperes a los que trabajó el generador de ozono y la presión del sistema. Esta última obtenida con ayuda del medidor de ozono a la entrada.

Cabe señalar que la concentración de ozono a la entrada siempre fue mayor que la de la salida. Debido a ello, se agregó una columna que indica la diferencia que existe entre estas concentraciones mediante un factor de corrección. Este factor se calcula como la división de la concentración a la entrada entre la concentración a la salida.

Tabla 16

Tabla de resultados de la prueba con el generador trabajando al 25% de su potencial.

Flujo O₂ [L/min]	Conc %O₃ in	Conc %O₃ out	Factor	Intensidad [A]	Presión [psi]
5	1.89	1.80	1.049	0.50	13.82
3	1.99	1.91	1.042	0.50	13.34
2	2.34	2.24	1.043	0.48	12.71
1	3.26	3.03	1.074	0.48	11.87

Nota: 1% = 6,520 ppm.

Analizando lo anterior, se puede ver que mientras el flujo de oxígeno que alimenta al generador aumenta, la concentración en porcentaje de masa disminuye. Cuando el caudal era de 1 L/min la concentración fue de 3.26% a la entrada y de 3.03% a la salida, mientras que con el caudal de 5 L/min las concentraciones fueron 1.89% y 1.80%, respectivamente.

Los factores de corrección para los caudales entre 2 y 5 L/min son muy similares, yendo desde 1.042 hasta 1.049; siendo ligeramente diferente solamente el correspondiente a 1 L/min cuyo valor es de 1.074. La intensidad eléctrica se mantuvo en un intervalo muy corto, entre 0.48 y 0.50 A. La presión en el sistema disminuye si lo hace también el flujo de oxígeno, de 13.82 psi con 5 L/min hasta 11.87 psi con 1 L/min. Poder conocer la presión en el sistema es una ventaja adicional del banco, ya que la temperatura y la presión son parámetros esenciales para un cálculo exacto de las dosis de ozono.

4.5.3.2 *Corrida con el nivel de potencia del generador al 50%*

En la Tabla 27, ubicada en el Anexo 1, se muestran las lecturas cada 30 segundos de los medidores a la entrada y a la salida del sistema durante el tiempo en el que el generador de ozono trabajó al 50% de su nivel de potencia máxima, indicando también los tiempos en los que el generador trabajó con flujos de 1, 2, 3 y 5 L/min de entrada de oxígeno. En la Figura 43 se muestra la gráfica de las concentraciones de esta prueba para su mejor visualización. El generador estaba encendido desde el segundo 0.0 porque esta prueba se realizó inmediatamente después de la prueba pasada, solo cambiando el nivel de potencia del generador de 25% a 50%.

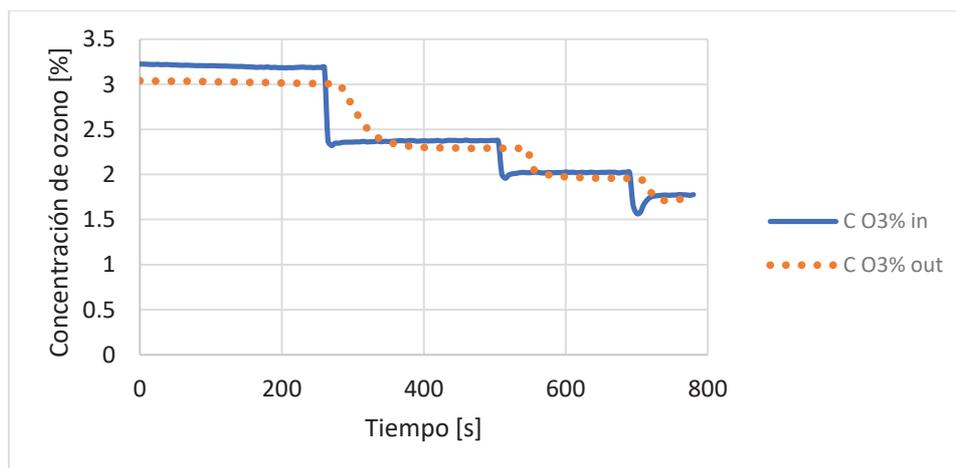


Figura 43

Gráfica de la concentración de ozono en porcentaje de masa en la prueba con el generador a 50% de nivel de potencia.

Nota: La forma de escalones que se puede apreciar en la gráfica muestra los cambios de flujo de 1, 2, 3 y 5 L/min.

Analizando lo presentado anteriormente, se mantuvo constante el comportamiento dinámico del generador de ozono ante los cambios de flujo de oxígeno de entrada y; en los cuatro escenarios de esta prueba, la concentración de ozono a la entrada fue mayor que la de la salida. En la Tabla 17 se muestran los valores promedio de concentración a la entrada y a la salida, además de otros resultados obtenidos manualmente en la prueba como los amperes a los que trabajó el generador de ozono y la presión del sistema.

Tabla 17

Tabla de resultados de la prueba con el generador trabajando al 50% de su potencial.

Flujo O₂ [L/min]	Conc %O₃ in	Conc %O₃ out	Factor	Intensidad [A]	Presión [psi]
1	3.20	3.02	1.061	0.47	11.88
2	2.37	2.30	1.030	0.47	12.61
3	2.02	1.96	1.031	0.48	13.19
5	1.73	1.72	1.007	0.48	13.71

Nota: 1% = 6,520 ppm.

Como se puede ver, se repite que mientras el flujo de oxígeno que alimenta al generador aumenta, la concentración en porcentaje de masa disminuye. Cuando el caudal era de 1 L/min la concentración fue de 3.20% a la entrada y de 3.02% a la salida, mientras que con el caudal de 5 L/min las concentraciones fueron 1.73% y 1.72%, respectivamente.

Los factores de corrección para los caudales de 2 y 3 L/min son muy similares, aproximadamente de 1.03; para el flujo de 5 L/min es de 1.007. Finalmente, el mayor factor fue para el flujo de 1 L/min con 1.061. La intensidad eléctrica se mantuvo en un intervalo muy corto, entre 0.47 y 0.48 A. La presión en

el sistema aumenta conforme aumenta el flujo de oxígeno, de 11.88 psi con 1 L/min hasta 13.71 psi con 5 L/min.

4.5.3.3 **Corrida con el nivel de potencia del generador al 75%**

Lo propio se realizó con el generador trabajando al 75% de su capacidad máxima y en la Tabla 28, localizada en el Anexo 1, se muestran las lecturas cada 30 segundos de los medidores a la entrada y a la salida del sistema durante esta prueba, también se indican los intervalos de tiempo en los que el generador trabajó con flujos de 1, 2, 3 y 5 L/min de entrada de oxígeno. En la Figura 44 se muestra la gráfica de las concentraciones de esta prueba para su mejor visualización. Así mismo, el generador estaba encendido desde el segundo 0.0 porque esta prueba se realizó inmediatamente después de la prueba pasada, solo cambiando el nivel de potencia del generador de 50% a 75%.

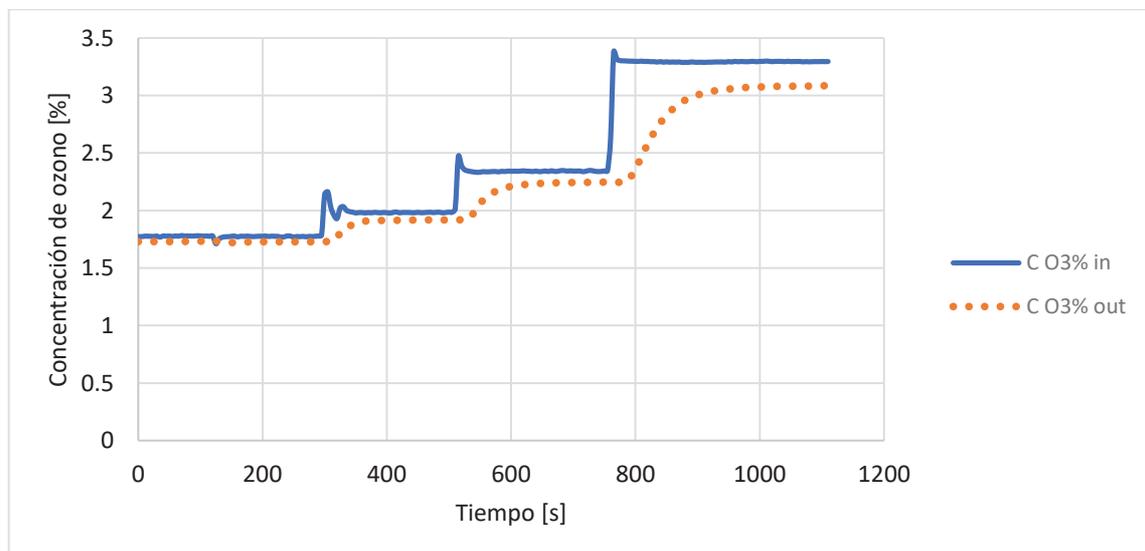


Figura 44

Gráfica de la concentración de ozono en porcentaje de masa en la prueba con el generador a 75% de nivel de potencia.

Nota: La forma de escalones que se puede apreciar en la gráfica muestra los cambios de flujo de 5, 3, 2 y 1 L/min.

Como se puede observar, en los cuatro escenarios de esta prueba, la concentración de ozono a la entrada continuó siendo mayor que la de la salida. En la Tabla 18 se muestran los valores promedio de concentración a la entrada y a la salida, además de otros resultados obtenidos manualmente al momento de realizar la prueba que constan de la intensidad eléctrica del generador, en amperes; y la presión del sistema en psi.

Tabla 18

Tabla de resultados de la prueba con el generador trabajando al 75% de su potencial.

Flujo O ₂ [L/min]	Conc %O ₃ in	Conc %O ₃ out	Factor	Intensidad [A]	Presión [psi]
5	1.77	1.73	1.026	0.47	13.72
3	1.99	1.92	1.040	0.48	13.22
2	2.34	2.24	1.045	0.48	12.63
1	3.30	3.08	1.070	0.48	11.83

Nota: 1% = 6,520 ppm.

Continuando con la interpretación de la tabla anterior, se puede observar que mientras el flujo de oxígeno que alimenta al generador aumenta, la concentración de ozono en porcentaje de masa disminuye. Cuando el caudal era de 5 L/min la concentración fue de 1.77% a la entrada y de 1.73% a la salida, mientras que con el caudal de 1 L/min las concentraciones fueron 3.30% y 3.08%, respectivamente.

Los factores de corrección para los caudales de 2 y 3 L/min son muy similares, aproximadamente de 1.04; para el flujo de 5 L/min es de 1.026. Finalmente, el mayor factor fue para el flujo de 1 L/min con 1.070. La intensidad eléctrica se mantuvo en un intervalo muy corto, entre 0.47 y 0.48 A. La presión en el sistema disminuye conforme disminuye el flujo de oxígeno, de 13.72 psi con 5 L/min hasta 11.83 psi con 1 L/min.

4.5.3.4 Corrida con el nivel de potencia del generador al 100%

Finalmente, la última parte de la prueba se realizó con el generador trabajando al 100% de su capacidad máxima y en la Tabla 29, en el Anexo 1, se muestran las lecturas cada 30 segundos de los medidores a la entrada y a la salida del sistema durante esta prueba. También se indican los intervalos de tiempo en los que el generador trabajó con flujos de 1, 2, 3 y 5 L/min de entrada de oxígeno. En la Figura 45 se muestra la gráfica de las concentraciones de esta prueba para su mejor visualización. Cabe recalcar que el generador estaba encendido desde el segundo 0.0 porque esta prueba se realizó inmediatamente después de la prueba pasada, solo cambiando el nivel de potencia del generador de 75% a 100%.

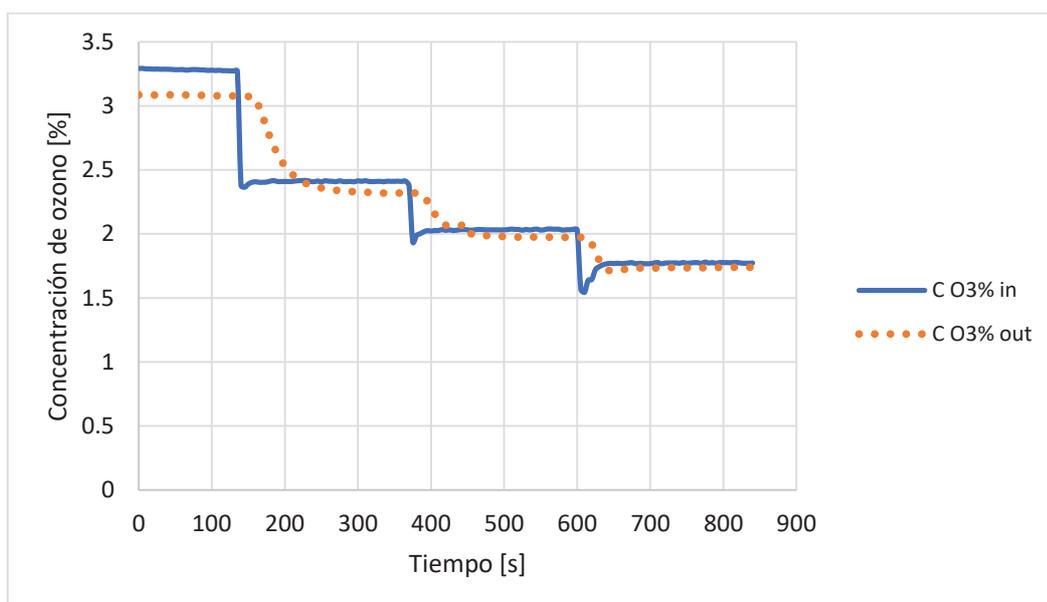


Figura 45

Gráfica de la concentración de ozono en porcentaje de masa en la prueba con el generador a 100% de nivel de potencia.

Nota: La forma de escalones que se puede apreciar en la gráfica muestra los cambios de flujo de 1, 2, 3 y 5 L/min.

De acuerdo con lo anterior, en los cuatro escenarios de esta prueba, la concentración de ozono a la entrada continuó siendo mayor que la de la salida. En

la Tabla 19 se muestran los valores promedio de concentración a la entrada y a la salida, además de otros resultados obtenidos manualmente al momento de realizar la prueba que consisten en la intensidad eléctrica del generador, en amperes; y la presión del sistema en psi.

Tabla 19

Tabla de resultados de la prueba con el generador trabajando al 100% de su potencial.

Flujo O ₂ [L/min]	Conc %O ₃ in	Conc %O ₃ out	Factor	Intensidad [A]	Presión [psi]
1	3.28	3.08	1.065	0.47	11.82
2	2.41	2.32	1.038	0.47	12.51
3	2.03	1.97	1.027	0.47	13.10
5	1.76	1.74	1.011	0.47	13.68

Nota: 1% = 6,520 ppm.

En la tabla anterior se puede observar que mientras el flujo de oxígeno que alimenta al generador aumenta, la concentración de ozono en porcentaje de masa disminuye. Cuando el caudal era de 1 L/min la concentración fue de 3.28% a la entrada y de 3.08% a la salida, mientras que con el caudal de 5 L/min las concentraciones fueron 1.76% y 1.74%, respectivamente.

Los factores de corrección para los caudales de 2 y 3 L/min son muy similares, yendo de 1.027 a 1.038; para el flujo de 5 L/min es de 1.011. Finalmente, el mayor factor fue para el flujo de 1 L/min con 1.065. La intensidad eléctrica se mantuvo constante de 0.47 A. La presión en el sistema crece conforme aumenta el flujo de oxígeno, de 11.82 psi con 1 L/min hasta 13.68 psi con 5 L/min.

4.5.3.5 Tendencias generales de los resultados de las pruebas

En los apartados anteriores se han expuesto los resultados de esta prueba separando todos los escenarios posibles en cuatro, según el nivel de potencia a la

que trabajó el generador (25%, 50%, 75% y 100%). No obstante, es importante señalar algunos otros datos de interés que resultan del análisis general de la prueba en su conjunto. En la Tabla 20 se muestran, a manera de resumen, las concentraciones de ozono a la entrada y a la salida del sistema durante toda la prueba; así como el factor de corrección, la presión en el sistema y la intensidad de corriente del generador de ozono. Esta vez se presenta la tabla dividiendo los 16 escenarios posibles en cuatro grupos, de acuerdo con el flujo de oxígeno que alimentó al generador.

Tabla 20

Tabla de resultados generales para la prueba de concentraciones.

Flujo O₂ [L/min]	Potencia generador	Conc %O₃ in	Conc %O₃ out	Factor	Intensidad [A]	Presión [psi]
1	25%	3.26	3.03	1.07	0.48	11.87
	50%	3.20	3.02	1.06	0.47	11.88
	75%	3.30	3.08	1.07	0.48	11.83
	100%	3.28	3.08	1.07	0.47	11.82
2	25%	2.34	2.24	1.04	0.48	12.71
	50%	2.37	2.30	1.03	0.47	12.61
	75%	2.34	2.24	1.05	0.48	12.63
	100%	2.41	2.32	1.04	0.47	12.51
3	25%	1.99	1.91	1.04	0.50	13.34
	50%	2.02	1.96	1.03	0.48	13.19
	75%	1.99	1.92	1.04	0.48	13.22
	100%	2.03	1.97	1.03	0.47	13.10
5	25%	1.89	1.80	1.05	0.50	13.82
	50%	1.73	1.72	1.01	0.48	13.71
	75%	1.77	1.73	1.03	0.47	13.72
	100%	1.76	1.74	1.01	0.47	13.68

Nota: 1% = 6,520 ppm.

Es importante señalar que el generador de ozono no reacciona al cambiar el nivel de potencia, al contrario de lo que presumía el fabricante. Por ejemplo, para un flujo de entrada de oxígeno de 1 L/min las concentraciones a la entrada variaron

solo de 3.20% a 3.30% (variación de 3%), para 2 L/min de 2.34% a 2.41% (variación de 2.9%), para 3 L/min de 1.99% a 2.03% (variación de 1.9%) y para 5 L/min de 1.73% a 1.89% (variación de 8.4%). Debido a esto, se puede inferir que el nivel de potencia del generador no genera una diferencia significativa en la cantidad de ozono generado.

La variable que sí modifica la concentración de ozono en el sistema es el flujo de entrada de oxígeno. Se puede observar en la tabla que conforme el flujo de oxígeno aumenta, la concentración de ozono en la mezcla de aire disminuye considerablemente. Esto sucede porque la capacidad del equipo para generar el ozono es siempre la misma; por lo que, si aumenta el flujo de oxígeno, disminuye el tiempo de residencia en el generador y provoca la disminución de la concentración de ozono. La intensidad medida en el generador se mantuvo casi constante en todos los escenarios de la prueba, variando solo de 0.47 a 0.50 A (variación de 6.0%) sin importar el nivel de potencia con el que esté trabajando. Finalmente, la presión en el sistema se modifica significativamente si cambia el flujo de entrada de oxígeno. Para 1 L/min la presión varía de 11.82 a 11.88 psi, para 2 L/min de 12.51 a 12.71 psi, para 3 L/min de 13.10 a 13.34 psi y para 5 L/min de 13.68 a 13.82 psi.

En vista de estos resultados, para controlar las dosis de ozono durante los experimentos se recomienda usar, como parámetros de variación, el flujo de gas de oxígeno que alimenta al generador y/o el tiempo de ozonización. Tomando en cuenta el aspecto económico, el costo de la energía eléctrica al utilizar el banco de ozonización es muy bajo (ver Tabla 13). Por ello, operativamente se recomienda que el generador de ozono trabaje al 75% de su potencia teórica para que sea lo más eficiente posible generando ozono con el flujo de oxígeno que lo alimenta. Adicionalmente, el generador de ozono instalado podría ser sustituido por uno que, efectivamente, sí permita variar la intensidad eléctrica y la potencia utilizada.

De acuerdo con los resultados anteriores (Tabla 20), el factor de corrección que se propone utilizar para hacer coincidir la concentración de ozono a la entrada con la de la salida del sistema (cuando teóricamente no debe haber existido consumo de ozono en el reactor) puede depender del flujo de oxígeno con el que

se alimenta el generador. De esta manera, para el flujo de oxígeno de 5 L/min se recomienda el factor de corrección de 1.02. Para 3 y 2 L/min se recomienda el factor de corrección igual a 1.04. Para 1 L/min se recomienda el uso de 1.07 como factor de corrección. La diferencia entre la concentración a la entrada y la concentración a la salida puede ser causada por varias situaciones como: pequeños errores en los aparatos de medición, minúsculas cantidades de ozono que se disuelven en el agua (mismo que después se descompone en agua y oxígeno diatómico), etc.

El flujo másico es otro aspecto importante a tener en cuenta en las pruebas antes realizadas, ya que indica efectivamente la cantidad de ozono (en masa) que es suministrada al reactor en un lapso de tiempo. Para realizar el cálculo del flujo másico basta con multiplicar el flujo de gas que ingresa al sistema por la concentración de ozono que lleva. Tomando los datos de la Tabla 20 sobre el flujo de oxígeno que alimenta al generador y la concentración de ozono a la entrada del sistema (promediando las cuatro lecturas para cada valor de flujo); la Tabla 21 expone los valores de flujo másico de ozono para cada valor del flujo de oxígeno acarreador. Como se puede observar, cuanto mayor es el flujo de oxígeno acarreador, mayor es la producción de ozono; sin embargo, en la práctica no se alcanza la capacidad especificada por el fabricante del generador (10 g/h).

Tabla 21.

Flujo másico de ozono para diferentes flujos de oxígeno acarreador.

Flujo O ₂ [L/min]	Conc %O ₃ in	Conc [g/m ³] O ₃ in	Flujo másico [g/h]
1.00	3.26	46.61	2.80
2.00	2.36	33.81	4.06
3.00	2.01	28.69	5.16
5.00	1.79	25.57	7.67

CAPÍTULO V. RESULTADOS SOBRE EL PROCESO DE RECLAMO DE PROPIEDAD INDUSTRIAL

5.1 Solicitud del estado de la técnica

Con apoyo del personal a cargo en la SIEA de la Universidad Autónoma del Estado de México, se escribió y se envió al IMPI un oficio donde se hacía expresa la solicitud del estado de la técnica sobre el tema: “Banco de ozonización para investigaciones en tratamiento de aguas” y se mandó al IMPI para que el organismo realizara la búsqueda de lo que actualmente se encuentra protegido tanto en México como en el mundo. La carta de solicitud y su anexo se encuentran en el Anexo 2 de este trabajo.

5.2 Análisis de los resultados del estado de la técnica.

Después de haber mandado la solicitud, el IMPI envió los resultados de la búsqueda sobre el estado de la técnica que fue solicitado. Encontró en total 128 documentos que se relacionan con el tema de la ozonización, de los cuales 112 se encontraron en la base de datos “Derwent innovation”, 7 en la base de datos “SIGA” administrada por el IMPI y los 9 restantes en documentos públicos de Internet. De los 128 documentos encontrados, el IMPI marcó como “particularmente relevante en combinación” (es decir, con color amarillo en el semáforo que maneja el IMPI) a tres de ellos. En la Tabla 22 se muestran los tres registros más cercanos y sus diferencias con el banco de ozonización integrado. Además, en el Anexo 3 se agregan las páginas más relevantes del resultado de la búsqueda realizada por el IMPI.

Tabla 22

Comparación de los registros señalados como “relevantes en combinación” por el IMPI con el banco de ozonización integrado.

Título	¿Qué es?	Diferencias con el banco
<p>Method for manufacturing insulating paint protective film of PCB.</p>	<p>Es un sistema de experimentación con ozono que facilita la regulación automática de las condiciones de operación al contar con un medidor de concentración y un sistema de válvulas que opera automáticamente mediante un controlador para regular la concentración de ozono que existirá dentro del reactor a como el usuario lo desee.</p>	<p>El proceso incluye nitrógeno, un solo medidor, un solo destructor (es decir, solo una posible salida), solo recibe datos de concentración de ozono a la salida del sistema (en la mezcla de gas que sale del reactor), no se trata de un montaje y no es adaptable ni movable. Se trata de un dispositivo que facilita al investigador controlar la concentración de ozono en el gas que hay dentro del reactor.</p>
<p>Integrated catalytic ozonation experimental device</p>	<p>Es un dispositivo experimental con ozonización catalítica que comprende una unidad de control y una unidad de sinergia de reacción que sirve para producir eficientemente OH en sinergia con el ozono.</p>	<p>No incluye un sistema de adquisición de datos automáticamente por medio de computadora, a pesar de que cuenta con medidor de ozono a la entrada y a la salida del sistema. Necesita de una fuente de agua residual (es decir, de un caudal de entrada) ya que realiza experimentos con agua en movimiento. No presume de incluir pretratamientos de humedad.</p>
<p>Small catalytic ozonation test device</p>	<p>Es un dispositivo para experimentos de oxidación catalítica con ozono. Se trata de un reactor equipado con una capa de catalizador para llevar a cabo reacciones de oxidación avanzada.</p>	<p>Se trata de un dispositivo solo para oxidación catalítica, por lo que no tiene adaptabilidad para otros tipos de oxidación. Además, al no contar con medidores de ozono no es posible conocer la cantidad de ozono que se consume en la reacción, no incluye destructores para el ozono residual y opera con agua en circulación con ayuda de una bomba.</p>

5.3 Memoria técnica de la invención

Como se ha mencionado anteriormente, al momento de realizar la solicitud en línea del modelo de utilidad en el PASE, se debe anexar la memoria técnica de la invención. Para consultar la memoria técnica que fue enviada al IMPI para la solicitud del trámite y con el formato adecuado para su remisión, diríjase al Anexo 4.

La memoria técnica consta de 25 páginas. Además, incluye tres figuras (diagramas de elaboración propia) para comprender y sustentar el funcionamiento del banco de ozonización. A continuación, se presenta una lista de las secciones que conforman la memoria técnica y una breve descripción de su contenido.

- Campo de la invención: describe a cuál rama o campo del conocimiento pertenece la invención que se reclama. En el presente caso, la invención pertenece al campo de la ingeniería sanitaria e ingeniería ambiental.
- Antecedentes de la invención: resume algunas de las invenciones ya existentes en materia de ozonización. Igualmente, incluye información técnica acerca del ozono y sus aplicaciones.
- Breve descripción de la invención: muestra, a grandes rasgos, la composición y el funcionamiento del banco de ozonización.
- Breve descripción de las figuras: en este apartado, se describe el contenido de las figuras presentadas y se etiquetan con números las partes importantes a mostrar para después describir a detalle la invención.
- Descripción detallada de la invención: es una descripción amplia de todas las partes que conforman la invención y de su funcionamiento paso a paso.
- Pasos típicos para la operación del dispositivo: enlista un resumen de los pasos a seguir para utilizar la invención segura y adecuadamente.
- Reivindicaciones: presenta las características del banco de ozonización que se pretenden reclamar.

- Resumen de la invención: describe la invención y las reivindicaciones muy brevemente. Además, incluye una breve justificación para el uso y el aprovechamiento de la invención.
- Figuras: en este apartado, se agregan las figuras anteriormente descritas.
- Referencias: se enlistan a los autores que aportaron información para la redacción de la memoria técnica.

5.4 Oficio de solicitud del trámite de registro de propiedad industrial

Además de la memoria técnica, y para recibir el apoyo de la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados (SIEA), fue preciso solicitar a la directora de la secretaría, mediante un oficio, el inicio del trámite de registro de propiedad industrial del banco de ozonización ante el IMPI bajo la figura jurídica del modelo de utilidad. Para consultar el oficio de solicitud descrito anteriormente, diríjase al Anexo 5. El personal de la SIEA fue el encargado de reunir el oficio de solicitud del trámite de registro de propiedad industrial y la memoria técnica, hacer los pagos correspondientes y comenzar las gestiones de la solicitud ante el IMPI.

Actualmente, el trámite se encuentra en proceso. Sin embargo, se ha aprobado el examen de forma, como lo indica el oficio emitido por el IMPI (véase Anexo 7). El IMPI, a través de este mismo oficio, le asignó el número MX/u/2024/000206 a la solicitud de modelo de utilidad. Con esto, el registro de la solicitud ya es visible en el SIGA.

Conclusiones

Las especificaciones técnicas del medidor a la salida del sistema, modelo 465M, indican que el equipo tiene un tiempo de respuesta menor a 45 segundos para alcanzar el 95% de precisión ante cambios en las lecturas de concentración. En la práctica y particularmente al equipo con el que se cuenta, le tomó 125 segundos subir desde lecturas de concentración de ozono (en porcentaje de masa) de 0.00% a 3.29% (95% del promedio de las lecturas del experimento, siendo este promedio de 3.46%). Este tiempo es 2.78 veces el que se indica en las especificaciones del equipo.

De la misma manera, cuando el generador de ozono fue apagado, al medidor 465M le tomó 190 segundos bajar desde concentraciones de 3.46% hasta 0.17% (95% del trayecto entre 3.46% y 0.00%). Este tiempo corresponde a 4.22 veces el tiempo indicado en las especificaciones del equipo. Debido a este comportamiento, es preferible que cuando el experimento que se va a realizar tenga una duración estimada de menos de 4 o 5 minutos se utilice la trampa de KI para medir la cantidad de ozono residual que sale del reactor, ya que el medidor 465M puede no contar con el tiempo suficiente para ofrecer al usuario lecturas precisas.

Una solución de KI preparada al 2% en peso, por ejemplo 686 g de agua y 14 g de soluto KI, es efectiva para atrapar el ozono residual en experimentos de ozonización cortos (típicamente de 30 min). En la práctica, durante un experimento de 540 segundos de duración y mientras se utilizaba la solución de KI, el medidor a la salida del sistema siempre marcó 0.00%. Por lo tanto, para la precisión operativa, la capacidad destructora de la solución de KI fue del 100%.

La potencia del equipo generador de ozono con el que se dispone, (controlada por la perilla manual que el generador equipa), no tiene un efecto importante en la cantidad de ozono que se genera. Mientras el flujo de oxígeno que entra al generador sea constante, la concentración de ozono medida por el equipo a la entrada (modelo 454H) a diferentes niveles de potencia del generador (entre 25% y 100%) varía solamente del 2% al 8%. Además, un aumento en la potencia

del generador no siempre se traducía en un aumento en la concentraci3n de ozono, por pequeño que fuera.

La variable que afecta significativamente a la concentraci3n de ozono que entra al sistema es el flujo de oxígeno que alimenta al generador. Por ejemplo, en la práctica y con el generador trabajando al 50% de su potencia, cuando el flujo de oxígeno era de 1,2,3 y 5 L/min la concentraci3n de ozono entrante fue de 3.20%, 2.37%, 2.02% y 1.73%; respectivamente. En términos generales, con este comportamiento, la concentraci3n de ozono disminuye si el flujo de oxígeno aumenta.

Los medidores de ozono a la entrada y a la salida del sistema presentan algunas variaciones en sus lecturas, mismas que se pueden deber al método y a la forma con el que los equipos calculan la concentraci3n de ozono en el gas (el proceso del equipo a la salida es más complejo al incluir pretratamiento de humedad). Generalmente, el medidor a la entrada del sistema registra concentraciones de ozono superiores a las registradas por el equipo a la salida, esto cuando no hay consumo de ozono en el reactor (es decir, las concentraciones a la entrada y a la salida deberían ser iguales). Para corregir esta variaci3n, se propone un ajuste a las lecturas del medidor a la salida del sistema por un factor de 1.04.

Finalmente, se comprueba que es posible la integraci3n de un banco de ozonizaci3n que satisfaga la necesidad de disponibilidad de un equipo estandarizado, funcional, flexible y listo para su adquisici3n como sistema completo por laboratorios de investigaci3n y docencia en tratamiento de agua, y/o en industria. Realizado a partir de la integraci3n innovadora de partes de equipos especializados existentes y de ferretería, es posible que el banco contemple un reactor propio con instalaciones y conexiones adecuadas, un pretratamiento para la humedad del ozono a la salida, que garantice la seguridad del operador, que permita variar y hacer mediciones de dosis a la entrada y salida del sistema, que sea un banco m3vil y que propicie la adquisici3n automática de datos mediante un equipo de c3mputo, conforme a las funciones esenciales y prácticas típicas en experimentos de ozonizaci3n de agua y de algunos alimentos.

Recomendaciones y trabajos futuros

En todo trabajo de investigación existen limitaciones y alcances previamente definidos. Para continuar y perfeccionar el trabajo desarrollado en esta tesis se proponen las siguientes mejoras:

- Colocar abrazaderas de acero inoxidable en las conexiones de la tubería FEP con los diferentes equipos y adaptadores del banco de ozonización. Esto con el fin de evitar fugas de ozono.
- Disponer de un sensor de ozono que detecte si hay presencia de este gas en los gases expulsados por la chimenea; y de ser así, que el generador de ozono se apague automáticamente.
- Realizar más pruebas en el banco de ozonización para lograr obtener resultados estadísticos y proyecciones ante escenarios teóricos no revisados previamente.
- Realizar pruebas en el banco de ozonización para conocer con precisión el tiempo en el que la trampa de KI funciona y es eficiente antes de saturarse.
- Realizar un análisis detallado de la cantidad de energía eléctrica que consume el banco de ozonización, esto para conocer minuciosamente el consumo energético y el gasto económico que representaría.
- Desarrollar un software propio para la recolección automática de datos. Esto con el fin de evitar que el usuario necesite de la instalación y configuración de un software ajeno al banco.
- Incluir manómetros a la entrada del reactor y a la salida de este. Esto con el fin de conocer la presión en ambos puntos del banco de ozonización.

Referencias

- A2Z Ozone. (s/f). *Z-10G Commercial Ozone Generator* | A2Z Ozone. Recuperado el 8 de septiembre de 2023, de <https://www.a2zozone.com/products/z-10g>
- Aguirre, D. M. (2022). *PROCESO DE APLICACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO DEL OZONO PARA OTORGAR RESISTENCIA A LA TRACCIÓN-ELONGACIÓN Y A LA ABRASIÓN A UN TEJIDO PLANO ACABADO ALGODÓN 100%* [Tesis Profesional]. Universidad Técnica del Norte.
- Amador-Díaz, A., Veliz-Lorenzo, E., & Bataller-Venta, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 46, 1–10.
- Anaya, J. C. (2020, octubre 20). *Proteger tu invención, ahora es más fácil. Conoce “Patente en Línea”*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/609794/20oct2020.pdf>
- Augusto, A., & Garcia, F. (2007). El ozono como agente antiséptico en la industria pesquera. *Infopesca Internacional*, 31, 32–37.
- Beutelspacher, E., & Calderón, J. M. (2005). *Diseño y construcción de un generador de ozono para aplicaciones de purificación de agua*. [Tesis de Maestría]. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Camarena, G., & Rios, D. A. (2013). *AISLAMIENTO Y DETERMINACION DE LA CINETICA DE INACTIVACION DE LA Escherichia coli CON OZONO A NIVEL LABORATORIO* [Tesis profesional]. Universidad Nacional del Centro de Perú.
- Catálogo Nacional de Regulaciones, T. y S. (2023). *Solicitud de patente nacional*. <https://catalogonacional.gob.mx/FichaTramite/IMPI-03-001-A.html>
- Creмасco, M. A., Tomaz, E., Mochi, V. T., & Vergel, C. F. (2013). Pérdida de Ozono en Líneas de Flujo Poliméricas: PVC y Silicona. *Información tecnológica*, 24(3), 95–102. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000300011>
- De Castro, F. V. (2012). *La contaminación en España: Los efectos del ozono y del cambio climático*. Editorial Club Universitario.

- Doménech, J. (2004). Ozono frente a cloro. *Offarm*, 23(5), 120–126.
- Esparza, M. (2014). Drought and Water Shortages in Mexico. Current Status and Future Prospects. *Secuencia*, 89, 193–219.
- Fahey, D. W. (2002). Veinte Preguntas y Respuestas sobre la Capa de Ozono. *Evaluación Científica del Agotamiento de Ozono:2002*, 1–39.
- Gallego, G. J., Muñoz, S., Gaviria, J. D., & Serna, I. C. (2007). Uso del Ozono en diferentes campos de la Odontología. *Vol 20 No.2*, 65–68.
- Hidalgo-Tallón, F. J., & Torres, L. M. (2013). Ozonoterapia en medicina del dolor. Revisión. *Rev Soc Esp Dolor*, 20(6), 291–300.
- Hoda, G. (2007). Ozone treatment of textile wastewater relevant to toxic effect elimination in marine environment. *Egyptian journal of aquatic research*, 33(1), 98–115.
- Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. (s/f). *Guía sobre Invenciones Patentes y Modelos de Utilidad*.
- Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI). (2023). *¿Qué es el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial?* <https://www.gob.mx/impi/acciones-y-programas/conoce-el-imp-i-que-es-el-imp-i>
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. (2018). *ICSC 0068 - OZONO*. https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=68&p_edit=&p_version=2&p_lang=es
- Jaimes-Urbina, J. A., & Vera-Solano, J. A. (2020). Los contaminantes emergentes de las aguas residuales de la industria farmacéutica y su tratamiento por medio de la ozonización. *Informador técnico*, 84(2), 249–262. <https://doi.org/http://doi.org/10.23850/22565035.2305>
- Langlais, B., Reckhow, D. A., & Brink, D. R. (1991). *Ozone in Water Treatment* (B. Langlais, D. A. Reckhow, & D. R. Brink, Eds.). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203744635>

Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, Diario Oficial de la Federación (2020).

Marcas y Patentes. (2020). *Cómo patentar un producto en México || Como registrar una patente en México*.
https://www.youtube.com/watch?v=PK8EedcAscA&ab_channel=MarcasyPatentes

Monge, R. S., & Poma, M. A. (2012). *DEGRADACIÓN DEL SURFACTANTE ANIÓNICO DODECILBENCENSULFONATO SÓDICO EN MEDIO ACUOSO A NIVEL LABORATORIO MEDIANTE OZONIZACIÓN* [Tesis profesional]. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ.

Norma Oficial Mexicana, Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente y criterios para su evaluación, Pub. L. No. NOM-020-SSA1-2014, Diario Oficial de la Federación (2014).
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5356801&fecha=19/08/2014#gsc.tab=0

Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI). (2020). *¿Qué es la propiedad intelectual?* <https://www.wipo.int/publications/es/details.jsp?id=4528>

Oxidation Technologies, L. (2017). *454 Ozone Analyzer*.
<https://www.oxidationtech.com/api454.html>

Ozone Solutions. (s/f). *The Definitive Guide To Understanding*. Recuperado el 5 de septiembre de 2023, de <https://ozonesolutions.com/content/DefinitiveGuide.pdf>

Ozone Solutions. (2023). *Ozone Destruct System (ODS)-1H-SCFM*.
<https://ozonesolutions.com/ods-1h/>

Pietrobon, E. (s/f). *Desinfección por Luz Ultravioleta*. Recuperado el 8 de junio de 2024, de <https://n9.cl/p43pl>

Rakness, K., Gordon, G., Langlais, B., Masschelein, W., Matsumoto, N., Richard, Y., Robson, M., & Somiya, I. (1996). Guideline for measured of ozone concentration in the process gas from on ozone generator. *Ozone Sci. Eng.*, 18, 209–229.

- Rodríguez, F. J. (2003). *Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización*. Ediciones Díaz de Santos.
- Scwhartz, A., & Martínez-Sánchez, G. (2012). La ozonoterapia y su fundamentación científica. *Revista Española de Ozonoterapia*, 2(1), 163–198.
- Secretaría de Economía. (2019). *La propiedad industrial en México*. <https://www.gob.mx/se/articulos/la-propiedad-industrial-en-mexico-196503>
- Secretaría de Economía. (2023). *Aprende a registrar marcas y patentes en el IMPI*. <https://e.economia.gob.mx/guias/registrar-marcas-y-patentes-en-el-imp/>
- Seminario, L., Acuna, J., & Williams, S. (2014). El Ozono y su Aplicación en la Conservación de Alimentos. *ResearchGate*.
- Shirk, O. (2000). Las mediciones del ozono. *Mapfre Seguridad*, 77, 17–21.
- Trujillo, C. A. (2010). *ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD CATALÍTICA DEL DIÓXIDO DE TITANIO SOPORTADO EN ALÚMINA EN LA SÍNTESIS DE OZONO A PARTIR DE OXÍGENO POR EL MÉTODO DE DESCARGA SILENCIOSA* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- Veliz, E., Llanes, J. G., Fernández, L. A., & Bataller, M. (2016). Coagulación-floculación, filtración y ozonización de agua residual para reutilización en riego agrícola. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VII(1), 17–34.

Figuras

- Augusto, A., & Garcia, F. (2007). Descarga por efecto corona, (p.33) [Esquema]. *Revista Infopesca Internacional*. <https://n9.cl/z7iji>
- Fahey, D. W. (2002). Ozono Atmosférico, (p.3) [Esquema]. *Evaluación Científica del Agotamiento de Ozono:2002*. <https://n9.cl/6te7h4>
- Hoda, G. (2007). Schematic Representation of the Ozonation set-up, (p.101) [Esquema] *Egyptian journal of aquatic research*. <https://n9.cl/r0gbw>

- Monge, R. S., & Poma, M. A. (2012). Esquema del sistema de ozonización: a) Fuente de oxígeno, b) Generador de ozono, c) Reactor, d) Trampas, (p. 42) [Esquema]. Repositorio institucional – Universidad Nacional del Centro de Perú. <https://n9.cl/yypyl>
- Veliz, E., Llanes, J. G., Fernández, L. A., & Bataller, M. (2016). Diagrama de flujo utilizado a escala de banco, (p.21) [Esquema]. Revista Scielo. <https://n9.cl/ochds5>
- Trujillo, C. A. (2010). Molécula de ozono, (p. 3) [Esquema]. Repositorio institucional – Universidad Nacional de Colombia. <https://n9.cl/9l9fj>

Anexo 1. Tablas sobre concentraciones de ozono en porcentaje de masa en las pruebas realizadas

Considere que 1% = 6,520 ppm.

Tabla 23

Concentraciones de ozono en porcentaje de masa en la prueba de tiempo de respuesta de los medidores.

Tiempo [s]	Tiempo [min]	Conc. %O ₃ in	Conc. %O ₃ out
0	0	0.00	0.00
60	1	4.22	0.16
120	2	3.99	2.38
180	3	3.84	3.35
240	4	3.75	3.54
300	5	3.71	3.54
360	6	3.68	3.49
420	7	3.65	3.46
480	8	3.64	3.44
540	9	3.63	3.42
600	10	3.62	3.41
660	11	0.00	3.41
720	12	0.00	1.88
780	13	0.00	0.68
840	14	0.00	0.22
900	15	0.00	0.08
960	16	0.00	0.05
1,020	17	0.00	0.03
1,080	18	0.00	0.02
1,140	19	0.00	0.02
1,200	20	0.00	0.00

Tabla 24

Concentraciones de ozono en porcentaje de masa en la prueba de tiempo de respuesta de los medidores a cada 5 segundos.

Tiempo [s]	Tiempo [min]	Conc %O ₃ in	Conc %O ₃ out
0	0.00	0.00	0.00
5	0.08	0.00	0.00
10	0.17	0.00	0.00
15	0.25	0.00	0.00
20	0.33	0.00	0.00
25	0.42	0.00	0.00
30	0.50	4.35	0.00
35	0.58	4.35	0.00
40	0.67	4.32	0.00
45	0.75	4.29	0.00
50	0.83	4.26	0.01
55	0.92	4.25	0.05
60	1.00	4.22	0.16
65	1.08	4.20	0.30
70	1.17	4.18	0.50
75	1.25	4.16	0.69
80	1.33	4.13	0.90
85	1.42	4.12	1.11
90	1.50	4.09	1.32
95	1.58	4.07	1.53
100	1.67	4.06	1.72
105	1.75	4.03	1.90
110	1.83	4.02	2.07
115	1.92	4.00	2.23
120	2.00	3.99	2.38
125	2.08	3.97	2.52
130	2.17	3.96	2.64
135	2.25	3.94	2.75
140	2.33	3.93	2.85
145	2.42	3.92	2.94
150	2.50	3.91	3.03
155	2.58	3.90	3.11
160	2.67	3.88	3.17
165	2.75	3.87	3.23
170	2.83	3.86	3.27
175	2.92	3.85	3.31
180	3.00	3.84	3.35
185	3.08	3.83	3.38
190	3.17	3.82	3.41
195	3.25	3.81	3.43
200	3.33	3.81	3.45
205	3.42	3.80	3.47
210	3.50	3.79	3.49
215	3.58	3.79	3.50
220	3.67	3.78	3.51
225	3.75	3.78	3.52
230	3.83	3.77	3.53

Tiempo [s]	Tiempo [min]	Conc %O ₃ in	Conc %O ₃ out
235	3.92	3.76	3.53
240	4.00	3.75	3.54
245	4.08	3.75	3.54
250	4.17	3.75	3.55
255	4.25	3.75	3.55
260	4.33	3.74	3.55
265	4.42	3.74	3.55
270	4.50	3.73	3.55
275	4.58	3.73	3.55
280	4.67	3.72	3.54
285	4.75	3.72	3.54
290	4.83	3.71	3.54
295	4.92	3.71	3.54
300	5.00	3.71	3.54
305	5.08	3.71	3.53
310	5.17	3.70	3.53
315	5.25	3.70	3.52
320	5.33	3.70	3.52
325	5.42	3.69	3.52
330	5.50	3.69	3.51
335	5.58	3.69	3.51
340	5.67	3.68	3.51
345	5.75	3.68	3.50
350	5.83	3.68	3.50
355	5.92	3.68	3.50
360	6.00	3.68	3.49
365	6.08	3.68	3.49
370	6.17	3.68	3.49
375	6.25	3.67	3.49
380	6.33	3.67	3.48
385	6.42	3.67	3.48
390	6.50	3.66	3.48
395	6.58	3.66	3.47
400	6.67	3.66	3.47
405	6.75	3.66	3.47
410	6.83	3.65	3.46
415	6.92	3.65	3.47
420	7.00	3.65	3.46
425	7.08	3.66	3.46
430	7.17	3.65	3.46
435	7.25	3.65	3.46
440	7.33	3.65	3.45
445	7.42	3.65	3.45
450	7.50	3.65	3.45
455	7.58	3.65	3.45
460	7.67	3.64	3.45
465	7.75	3.64	3.44
470	7.83	3.64	3.44
475	7.92	3.64	3.44
480	8.00	3.64	3.44
485	8.08	3.64	3.44
490	8.17	3.64	3.44
495	8.25	3.64	3.44

Tiempo [s]	Tiempo [min]	Conc %O ₃ in	Conc %O ₃ out
500	8.33	3.64	3.43
505	8.42	3.64	3.43
510	8.50	3.63	3.43
515	8.58	3.63	3.43
520	8.67	3.63	3.43
525	8.75	3.63	3.43
530	8.83	3.63	3.43
535	8.92	3.63	3.42
540	9.00	3.63	3.42
545	9.08	3.63	3.42
550	9.17	3.63	3.42
555	9.25	3.63	3.42
560	9.33	3.63	3.42
565	9.42	3.63	3.42
570	9.50	3.63	3.42
575	9.58	3.63	3.42
580	9.67	3.63	3.42
585	9.75	3.62	3.42
590	9.83	3.62	3.42
595	9.92	3.62	3.41
600	10.00	3.62	3.41
605	10.08	3.63	3.41
610	10.17	3.63	3.41
615	10.25	3.62	3.41
620	10.33	3.62	3.41
625	10.42	3.62	3.41
630	10.50	3.62	3.41
635	10.58	3.62	3.41
640	10.67	3.62	3.41
645	10.75	3.62	3.41
650	10.83	0.02	3.41
655	10.92	0.00	3.41
660	11.00	0.00	3.41
665	11.08	0.00	3.40
670	11.17	0.00	3.37
675	11.25	0.00	3.29
680	11.33	0.00	3.16
685	11.42	0.00	3.01
690	11.50	0.00	2.84
695	11.58	0.00	2.67
700	11.67	0.00	2.52
705	11.75	0.00	2.34
710	11.83	0.00	2.19
715	11.92	0.00	2.03
720	12.00	0.00	1.88
725	12.08	0.00	1.73
730	12.17	0.00	1.59
735	12.25	0.00	1.47
740	12.33	0.00	1.36
745	12.42	0.00	1.27
750	12.50	0.00	1.17
755	12.58	0.00	1.08
760	12.67	0.00	0.99

Tiempo [s]	Tiempo [min]	Conc %O ₃ in	Conc %O ₃ out
765	12.75	0.00	0.90
770	12.83	0.00	0.81
775	12.92	0.00	0.74
780	13.00	0.00	0.68
785	13.08	0.00	0.62
790	13.17	0.00	0.57
795	13.25	0.00	0.52
800	13.33	0.00	0.47
805	13.42	0.00	0.43
810	13.50	0.00	0.39
815	13.58	0.00	0.36
820	13.67	0.00	0.32
825	13.75	0.00	0.29
830	13.83	0.00	0.27
835	13.92	0.00	0.24
840	14.00	0.00	0.22
845	14.08	0.00	0.20
850	14.17	0.00	0.18
855	14.25	0.00	0.17
860	14.33	0.00	0.15
865	14.42	0.00	0.14
870	14.50	0.00	0.13
875	14.58	0.00	0.12
880	14.67	0.00	0.11
885	14.75	0.00	0.10
890	14.83	0.00	0.10
895	14.92	0.00	0.09
900	15.00	0.00	0.08
905	15.08	0.00	0.08
910	15.17	0.00	0.07
915	15.25	0.00	0.07
920	15.33	0.00	0.07
925	15.42	0.00	0.06
930	15.50	0.00	0.06
935	15.58	0.00	0.06
940	15.67	0.00	0.06
945	15.75	0.00	0.05
950	15.83	0.00	0.05
955	15.92	0.00	0.05
960	16.00	0.00	0.05
965	16.08	0.00	0.05
970	16.17	0.00	0.04
975	16.25	0.00	0.04
980	16.33	0.00	0.04
985	16.42	0.00	0.04
990	16.50	0.00	0.04
995	16.58	0.00	0.04
1000	16.67	0.00	0.04
1005	16.75	0.00	0.04
1010	16.83	0.00	0.03
1015	16.92	0.00	0.03
1020	17.00	0.00	0.03
1025	17.08	0.00	0.03

Tiempo [s]	Tiempo [min]	Conc %O ₃ in	Conc %O ₃ out
1030	17.17	0.00	0.03
1035	17.25	0.00	0.03
1040	17.33	0.00	0.03
1045	17.42	0.00	0.03
1050	17.50	0.00	0.03
1055	17.58	0.00	0.03
1060	17.67	0.00	0.03
1065	17.75	0.00	0.03
1070	17.83	0.00	0.03
1075	17.92	0.00	0.02
1080	18.00	0.00	0.02
1085	18.08	0.00	0.02
1090	18.17	0.00	0.02
1095	18.25	0.00	0.02
1100	18.33	0.00	0.02
1105	18.42	0.00	0.02
1110	18.50	0.00	0.02
1115	18.58	0.00	0.02
1120	18.67	0.00	0.02
1125	18.75	0.00	0.02
1130	18.83	0.00	0.02
1135	18.92	0.00	0.02
1140	19.00	0.00	0.02
1145	19.08	0.00	0.02
1150	19.17	0.00	0.02
1155	19.25	0.00	0.02
1160	19.33	0.00	0.02
1165	19.42	0.00	0.02
1170	19.50	0.00	0.02
1175	19.58	0.00	0.02
1180	19.67	0.00	0.02
1185	19.75	0.00	0.01
1190	19.83	0.00	0.00
1195	19.92	0.00	0.00
1200	20.00	0.00	0.00

Tabla 25

Concentraciones de ozono en porcentaje de masa en la prueba de funcionamiento de la solución de KI.

Tiempo [s]	Tiempo [min]	Conc. %O ₃ in	Conc %O ₃ out
0	0.0	0.00	0.00
30	0.5	4.04	0.00
60	1.0	4.32	0.00
90	1.5	4.16	0.00
120	2.0	4.05	0.00
150	2.5	3.99	0.00

Tiempo [s]	Tiempo [min]	Conc. %O ₃ in	Conc %O ₃ out
180	3.0	3.94	0.00
210	3.5	3.90	0.00
240	4.0	3.88	0.00
270	4.5	3.87	0.00
300	5.0	3.85	0.00
330	5.5	3.84	0.00
360	6.0	3.84	0.00
390	6.5	3.85	0.00
420	7.0	3.84	0.00
450	7.5	3.84	0.00
480	8.0	3.83	0.00
510	8.5	0.00	0.00
540	9.0	0.00	0.00

Tabla 26

Concentraciones de ozono en porcentaje de masa en la prueba con el generador a 25% de nivel de potencia.

Flujo [L/min]	Tiempo [s]	Tiempo [min]	Conc %O ₃ in	Conc %O ₃ out
Generador apagado	0	0	0.01	0.00
	30	0.5	0.01	0.00
	60	1.0	0.01	0.00
	90	1.5	0.01	0.00
	120	2.0	0.01	0.00
	150	2.5	0.01	0.00
5	180	3.0	1.96	0.24
	210	3.5	1.94	1.39
	240	4.0	1.90	1.74
	270	4.5	1.87	1.80
	300	5.0	1.86	1.81
	330	5.5	1.85	1.80
	360	6.0	1.84	1.79
3	390	6.5	2.12	1.79
	420	7.0	1.97	1.94
	450	7.5	1.96	1.92
	480	8.0	1.96	1.90
	510	8.5	1.95	1.90

Flujo [L/min]	Tiempo [s]	Tiempo [min]	Conc %O ₃ in	Conc %O ₃ out
	540	9.0	1.95	1.89
2	570	9.5	2.36	1.94
	600	10.0	2.35	2.15
	630	10.5	2.35	2.22
	660	11.0	2.34	2.24
	690	11.5	2.34	2.25
	720	12.0	2.34	2.25
	750	12.5	2.33	2.25
	780	13.0	2.33	2.25
	810	13.5	2.33	2.24
	840	14.0	2.33	2.24
	870	14.5	2.33	2.24
	900	15.0	2.33	2.24
1	930	15.5	3.27	2.24
	960	16.0	3.26	2.50
	990	16.5	3.25	2.77
	1020	17.0	3.24	2.92
	1050	17.5	3.24	2.99
	1080	18.0	3.24	3.02
	1110	18.5	3.23	3.03
	1140	19.0	3.23	3.04

Tabla 27

Concentraciones de ozono en porcentaje de masa en la prueba con el generador a 50% de nivel de potencia.

Flujo [L/min]	Tiempo [s]	Tiempo [min]	Conc %O ₃ in	Conc %O ₃ out
1	0	0.0	3.22	3.04
	30	0.5	3.22	3.04
	60	1.0	3.21	3.03
	90	1.5	3.21	3.03
	120	2.0	3.20	3.03
	150	2.5	3.19	3.02
	180	3.0	3.19	3.02
	210	3.5	3.19	3.01
	240	4.0	3.19	3.01
2	270	4.5	2.32	3.00

Flujo [L/min]	Tiempo [s]	Tiempo [min]	Conc %O ₃ in	Conc %O ₃ out
	300	5.0	2.36	2.75
	330	5.5	2.36	2.44
	360	6.0	2.37	2.34
	390	6.5	2.37	2.31
	420	7.0	2.38	2.30
	450	7.5	2.37	2.29
	480	8.0	2.38	2.29
3	510	8.5	2.01	2.29
	540	9.0	2.02	2.29
	570	9.5	2.02	2.01
	600	10.0	2.03	1.97
	630	10.5	2.02	1.96
	660	11.0	2.03	1.96
	690	11.5	2.02	1.95
5	720	12.0	1.75	1.80
	750	12.5	1.77	1.72
	780	13.0	1.78	1.73

Tabla 28

Concentraciones de ozono en porcentaje de masa en la prueba con el generador a 75% de nivel de potencia.

Flujo [L/min]	Tiempo [s]	Tiempo [min]	Conc %O ₃ in	Conc %O ₃ out
5	0	0.00	1.77	1.73
	30	0.50	1.78	1.73
	60	1.00	1.78	1.73
	90	1.50	1.78	1.73
	120	2.00	1.78	1.73
	150	2.50	1.78	1.72
	180	3.00	1.78	1.73
	210	3.50	1.77	1.73
	240	4.00	1.78	1.73
	270	4.50	1.77	1.73
3	300	5.00	2.14	1.73
	330	5.50	2.03	1.84
	360	6.00	1.98	1.90
	390	6.50	1.98	1.91

Flujo [L/min]	Tiempo [s]	Tiempo [min]	Conc %O ₃ in	Conc %O ₃ out
	420	7.00	1.98	1.92
	450	7.50	1.98	1.92
	480	8.00	1.99	1.92
	510	8.50	2.01	1.92
2	540	9.00	2.34	1.98
	570	9.50	2.34	2.15
	600	10.00	2.34	2.21
	630	10.50	2.34	2.23
	660	11.00	2.34	2.24
	690	11.50	2.34	2.24
	720	12.00	2.34	2.24
	750	12.50	2.34	2.25
1	780	13.00	3.30	2.24
	810	13.50	3.30	2.47
	840	14.00	3.29	2.76
	870	14.50	3.29	2.92
	900	15.00	3.29	3.00
	930	15.50	3.29	3.04
	960	16.00	3.30	3.06
	990	16.50	3.30	3.07
	1020	17.00	3.29	3.08
	1050	17.50	3.29	3.08
	1080	18.00	3.29	3.08
	1110	18.50	3.30	3.08

Tabla 29

Concentraciones de ozono en porcentaje de masa en la prueba con el generador a 100% de nivel de potencia.

Flujo [L/min]	Tiempo [s]	Tiempo [min]	Conc %O ₃ in	Conc %O ₃ out
1	0	0.0	3.29	3.09
	30	0.5	3.29	3.08
	60	1.0	3.28	3.08
	90	1.5	3.28	3.08
	120	2.0	3.28	3.08
2	150	2.5	2.39	3.07
	180	3.0	2.41	2.75

Flujo [L/min]	Tiempo [s]	Tiempo [min]	Conc %O ₃ in	Conc %O ₃ out
	210	3.5	2.41	2.47
	240	4.0	2.41	2.37
	270	4.5	2.41	2.34
	300	5.0	2.41	2.33
	330	5.5	2.41	2.32
	360	6.0	2.41	2.32
3	390	6.5	2.02	2.30
	420	7.0	2.03	2.07
	450	7.5	2.03	2.07
	480	8.0	2.03	1.98
	510	8.5	2.04	1.98
	540	9.0	2.04	1.98
	570	9.5	2.04	1.98
	600	10.0	2.03	1.97
5	630	10.5	1.74	1.80
	660	11.0	1.77	1.72
	690	11.5	1.77	1.73
	720	12.0	1.77	1.74
	750	12.5	1.77	1.73
	780	13.0	1.77	1.74
	810	13.5	1.78	1.74
	840	14.0	1.77	1.74