



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN OPERATIVA DE UN SISTEMA DE OZONIZACIÓN EN LÍNEA
Y SIMULACIÓN DE LOS RESIDUALES DE OZONO EN LA RED DE
DISTRIBUCIÓN DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA

PRESENTA:

ING. DANIEL RETANA CASTAÑEDA

DIRECTOR DE TESINA: **DR. IGNACIO MONJE RAMÍREZ**

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: M.I. Carlos Manuel Menéndez Martínez

VOCAL 1: Dr. Ignacio Monje Ramírez

VOCAL 2: Dr. Enrique César Valdez

VOCAL 3: M.I. Alba Beatriz Vázquez González

SECRETARIO: M.I. Cristian Emmanuel González Reyes

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Instituto de Ingeniería de la UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Ignacio Monje Ramírez

SUSTENTANTE:

Ing. Daniel Retana Castañeda

AGRADECIMIENTOS

Al Programa Único de Especializaciones de Ingeniería de la UNAM, por permitirme enriquecer mi formación académica.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por abrirme sus puertas y permitir desarrollar mi trabajo de tesina.

Al Dr. Ignacio Monje Ramírez, por aceptar guiar mi trabajo de tesina, por el apoyo y tiempo dedicados a este trabajo, por sus comentarios y consejos tan acertados, por sus enseñanzas a lo largo de mi estancia en el Instituto, pero sobre todo por brindarme su amistad.

A la Dra. Ma. Teresa Orta Ledesma, por abrirme las puertas de su grupo de investigación y coordinar tan sabiamente el mismo.

Al Ing. José Ramón Barajas Hernández, por su amable y paciente enseñanza de la red de distribución de agua potable del Instituto y su ayuda en la obtención del consumo de energía eléctrica, por toda la ayuda brindada que hizo posible el desarrollo de esta tesina, pero sobre todo por su amistad.

A todo el grupo de Balance Hidráulico de PUMAGUA, por el apoyo brindado para obtener información de la red de distribución de agua potable, en especial al Ing. José Daniel Rocha Guzmán, el Ing. Josué P. Hidalgo Jiménez, el Arq. Edwin E. Abarca Villatoro y el Arq. Víctor A. Medina Sámano.

A la M. en I. Alba Beatriz Vázquez González, por los consejos y la confianza que me brindó al ser mi tutora de la Especialidad.

A todos mis compañeros del cubículo 410 del Instituto de Ingeniería, siempre me apoyaron a lo largo de mi estancia, en especial a mi amigo Axa que me capacitó en la operación del sistema de ozonización.

A mi amigo y compañero de trabajo Agustín Hernández Delgado, por brindarme su apoyo en gran parte del desarrollo de la tesina, por las risas que hicieron más ameno el tiempo de trabajo, pero sobre todo por convertirse en mi amigo en tan poco tiempo.

A Sergio A. Rodríguez Rivera y Mario A. Arellano Ceciliano, mis amigos y compañeros de licenciatura y especialidad, quienes compartieron conmigo estas etapas de preparación y me brindaron su apoyo, amistad y consejos.

Y finalmente a mi jurado asignado por su paciente lectura y aportaciones realizadas a este trabajo.

DEDICATORIA

A mis padres Oscar Retana y Patricia Castañeda, siempre han sido un apoyo absoluto a lo largo de toda mi vida, por brindarme su amor incondicional, por ser los guías que nos condujeron a mi hermana y a mí al camino de la educación, por todos los sacrificios realizados, por todos los buenos consejos y regaños tan oportunos, por su paciencia y esfuerzo para hacer de mí una mejor persona cada día. Son seres humanos increíbles, los amo.

A mi hermana Fernanda, por ser el mejor ejemplo que seguir, eres siempre digna de admirar por tu fortaleza, perseverancia y dedicación al trabajo arduo, por las buenas experiencias y recuerdos de nuestra infancia, por tus pensamientos y buenos deseos para continuar en este camino profesional. Te amo Mari.

A ti amor, por ser siempre incondicional, por tu paciencia, por tus consejos, por la vida que compartimos juntos, por tu inmenso amor y soporte durante todos los años que llevamos juntos. Gracias por motivarme siempre a ser una mejor persona y dar lo mejor de mí. Eres la alegría e inspiración en mi vida. Te amo Adriana.

Finalmente, a Víctor Jiménez y Angélica Carrizosa, por su siempre tan amable hospitalidad y por abrirme las puertas de su hogar.

El trabajo experimental fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM que cuenta con certificado de conformidad otorgado por el organismo acreditado Certificación Mexicana, S.C., por haber implementado y mantener un Sistema de Gestión de Calidad de conformidad con los requisitos de la norma internacional ISO 9001:2015

**No. De Certificado CMX C SGC 155 2017, válido en el período del
09 de noviembre de 2017 al 09 de noviembre de 2020**



Índice

Índice de figuras	8
Índice de tablas.....	9
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
1. Introducción.....	12
2. Objetivos	13
3. Antecedentes.....	13
3.1. Ubicación y descripción del área de estudio.....	13
3.2. Descripción de la red de distribución de agua potable en Ciudad Universitaria	17
3.3. Situación actual de la red de distribución de agua potable en el IINGEN	19
4. Descripción del Sistema de Ozonización.....	21
5. Operación del Sistema de Ozonización en Línea.....	31
6. Simulación de los Residuales de Ozono en la Red de Distribución con EPANET.....	38
6.1. Descripción básica del programa EPANET	38
6.2. Modelo hidráulico de la red de distribución.....	39
6.3. Modelo de los residuales de ozono.....	46
6.4. Resultados y su análisis.....	50
7. Mantenimiento	57
7.1. Mantenimiento preventivo.....	57
7.1.1 Filtros de carbón activado de cáscara de coco	57
7.1.2 Filtro bolsa de 1 micra	58
7.1.3 Concentrador de oxígeno	58
7.1.4 Generador de ozono	58
7.1.5 Tanque de contacto.....	59
7.1.6 Calibración del sensor de ozono disuelto.....	59

7.2. Mantenimiento correctivo	62
8. Posibles Fallas de Operación y Soluciones	64
9. Costo de Operación y Mantenimiento	67
10. Conclusiones	70
11. Anexos	72
A. Reemplazo de la solución electrolítica y membrana del sensor de ozono	72
B. Procedimiento de calibración de sonda.....	74
I. Calibración en cero.....	74
II. Calibración en progreso.....	75
C. Método colorimétrico de índigo.....	77
D. Puntos de muestreo en los edificios.....	81
E. Fotografías de componentes del sistema de ozonización.....	83
12. Bibliografía	85

Índice de figuras

FIGURA 1. POBLACIÓN DE LOS EDIFICIOS DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA.....	14
FIGURA 2. RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN CIUDAD UNIVERSITARIA.....	17
FIGURA 3. UBICACIÓN DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO Y POZOS EN CIUDAD UNIVERSITARIA.....	18
FIGURA 4. CROQUIS DE LOCALIZACIÓN DE LA CASETA DEL SISTEMA DE OZONACIÓN.	19
FIGURA 5. RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE ACTUAL DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA.....	20
FIGURA 6. SISTEMA DE POTABILIZACIÓN DE AGUA CON OZONO EN LÍNEA.	21
FIGURA 7. FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO.	22
FIGURA 8. PORTAFILTRO PARA FILTRO BOLSA.....	23
FIGURA 9. INYECTOR DE OZONO VENTURI.....	24
FIGURA 10. SENSOR DE OZONO DISUELTO.....	25
FIGURA 11. ANALIZADOR DE ENTRADA DUAL ROSEMOUNT 1056.	26
FIGURA 12. CONCENTRADOR DE OXÍGENO AIRSEP TOPAZ PLUS.....	26
FIGURA 13. GENERADOR DE OZONO PLASMA BLO3CK.	27
FIGURA 14. VÁLVULA DE VENTILACIÓN DE GAS.	28
FIGURA 15. DESTRUCTOR DE OZONO.	29
FIGURA 16. PANEL DE CONTROL AUTOMÁTICO.	29
FIGURA 17. INTERIOR DE CAJA DE PARED ABB-IP66.....	30
FIGURA 18. SISTEMA DE OZONIZACIÓN EN LÍNEA DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA.	31
FIGURA 19. MANÓMETRO DE ENTRADA AL GENERADOR DE OZONO.....	32
FIGURA 20. ZONAS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DEL IINGEN CON COMPORTAMIENTO SIMILAR EN LA CONCENTRACIÓN RESIDUAL DE OZONO.....	34
FIGURA 21. COMPORTAMIENTO DEL RESIDUAL DE OZONO PARA LOS EDIFICIOS PERTENECIENTES A LA ZONA 1.	35
FIGURA 22. COMPORTAMIENTO DEL RESIDUAL DE OZONO PARA LOS EDIFICIOS PERTENECIENTES A LA ZONA 2.	36
FIGURA 23. COMPORTAMIENTO DEL RESIDUAL DE OZONO PARA LOS EDIFICIOS PERTENECIENTES A LA ZONA 3.	37
FIGURA 24. MANÓMETRO ADAPTADO PARA LA MEDICIÓN DE PRESIONES EN LOS EDIFICIOS.	40
FIGURA 25. MENÚ "DATOS DE CALIBRACIÓN" EN EPANET.	41
FIGURA 26. FORMATO DE ENTRADA DEL ARCHIVO DE CALIBRACIÓN CON EXTENSIÓN DE ARCHIVO .TXT.....	41
FIGURA 27. ESTADÍSTICAS DE CALIBRACIÓN PARA PRESIÓN.....	42
FIGURA 28. PRESIONES EN EL MODELO DE EPANET A LAS 3:00 P.M.....	43
FIGURA 29. VELOCIDADES EN EL MODELO DE EPANET A LAS 3 P.M.	45
FIGURA 30. GRÁFICA DE LA ECUACIÓN DE PRIMER ORDEN DEL OZONO.....	47
FIGURA 31. PATRÓN DE TIEMPO PARA EL SISTEMA DE OZONIZACIÓN.....	49
FIGURA 32. CONCENTRACIÓN RESIDUAL DEL OZONO EN EL MODELO DE EPANET A LAS 10:00 AM	51
FIGURA 33. CONCENTRACIÓN RESIDUAL DEL OZONO EN EL MODELO DE EPANET A LAS 3:00 PM	52
FIGURA 34. CONCENTRACIÓN RESIDUAL DEL OZONO EN EL MODELO DE EPANET A LAS 11:00 PM.....	53

FIGURA 35. CURVA DE EVOLUCIÓN DEL OZONO RESIDUAL EN ZONA 1	54
FIGURA 36. CURVA DE EVOLUCIÓN DEL OZONO RESIDUAL EN ZONA 2	54
FIGURA 37. CURVA DE EVOLUCIÓN DEL OZONO RESIDUAL EN ZONA 1 Y 2.....	55
FIGURA 38. FILTRO DE PARTÍCULAS GRUESAS DEL CONCENTRADOR DE OXÍGENO.....	58
FIGURA 39. TUBERÍA QUE CONDUCE AL DESTRUCTOR DE OZONO Y DERIVACIÓN PARA EXPULSAR AGUA.	59
FIGURA 40. PANEL DE CONTROL EN CONDICIONES DE NO GENERACIÓN DE OZONO.....	60
FIGURA 41. SENSOR DE OZONO DISUELTO Y CELDA DE FLUJO.....	61
FIGURA 42. MEDICIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL SISTEMA DE OZONIZACIÓN.....	67
FIGURA 43. GRÁFICA DEL CONSUMO DE ENERGÍA POR FASE Y TOTAL DEL SISTEMA	69
FIGURA 44. PIEZAS DEL SENSOR ROSEMOUNT 499AOZ.....	73
FIGURA 45. FRETE DE CAJA DE PARED ABB-IP66.....	83
FIGURA 46. INFERIOR DE CAJA DE PARED ABB-IP66.....	83
FIGURA 47. LATERAL IZQUIERDO DE CAJA DE PARED ABB-IP66.....	84
FIGURA 48. LATERAL DERECHO DE CAJA DE PARED ABB-IP66.....	84

Índice de tablas

TABLA 1. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LOS FILTROS DE CARBÓN ACTIVADO.....	22
TABLA 2. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL PORTAFILTRO.....	23
TABLA 3. ESPECIFICACIONES DEL SENSOR DE OZONO.....	25
TABLA 4. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL CONCENTRADOR DE OXÍGENO.....	27
TABLA 5. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL GENERADOR DE OZONO.....	28
TABLA 6. CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA VÁLVULA DE VENTILACIÓN.....	28
TABLA 7. DATOS PARA ESTIMAR LA CONSTANTE DE DESCOMPOSICIÓN.....	47
TABLA 8. PIEZAS GENERALES DEL CONCENTRADOR DE OXÍGENO TOPAZ PLUZ.....	62
TABLA 9. PIEZAS GENERALES DEL MONITOR DE OZONO DISUELTO.....	63
TABLA 10. PIEZAS GENERALES DEL GENERADOR DE OZONO.....	63
TABLA 11. CONSUMOS Y COSTOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE OZONIZACIÓN.....	67
TABLA 12. COSTOS DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE OZONIZACIÓN.....	68

RESUMEN

La tesis que se presenta a continuación muestra los resultados de un trabajo que se basó en la modelización de las concentraciones residuales de ozono en la red de distribución de agua potable del Instituto de Ingeniería de la UNAM, con el fin de evaluar las condiciones actuales de operación del sistema de potabilización de agua con ozono instalado en el mismo sitio.

El desarrollo de este trabajo tuvo como propósitos específicos determinar experimentalmente el comportamiento de las concentraciones residuales de ozono en los distintos edificios que son abastecidos de agua ozonizada, evaluar las condiciones actuales de operación y desempeño de los equipos instalados del sistema de ozonización y realizar una simulación del comportamiento hidráulico y de los residuales de ozono en el agua mediante el software EPANET que ratifique el comportamiento experimental.

Al realizar la evaluación del sistema de ozonización se generó la siguiente información: 1) la situación actual del desempeño de los equipos instalados en el sistema de ozonización; 2) información que complementa los procedimientos de operación y mantenimiento preventivo tomando en cuenta los resultados de la evaluación operativa; 3) recomendaciones y soluciones de las posibles fallas de operación.

Con base en los resultados obtenidos, se llegó a la conclusión de que existen edificios que guardan un comportamiento similar dependiendo si se encuentran en una zona cercana o lejana al sistema de ozonización. Además, se encontró el tiempo de respuesta que tardan los edificios en alcanzar la misma concentración de ozono que el mismo sistema, entre otras cosas.

Y por último, se estableció el costo de operación y mantenimiento del sistema de ozonización, así como el ahorro que se tiene con respecto a la compra de agua embotellada.

ABSTRACT

The thesis presented below shows the results of a work based on the modeling of residual ozone concentrations in the drinking water distribution network of the UNAM's Engineering Institute, in order to assess the current conditions of operation of the water purification system with ozone installed in the same place.

The purpose of this work was to determine experimentally the behavior of residual ozone concentrations in the different buildings that are supplied with ozonated water, evaluate the current operating and performance conditions of the equipment installed in the ozonation system and perform a simulation of the hydraulic behavior and of the residuals of ozone in the water by means of the EPANET software that ratifies the experimental behavior.

With the evaluation of the ozonation system the following information was generated: 1) the current status of the performance of the equipment installed in the ozonation system; 2) information that complements the operation and preventive maintenance procedures considering the results of the operational evaluation; 3) recommendations and solutions of possible operating failures.

Based on the results obtained, it was concluded that there are buildings that have a similar behavior depending on whether they are in an area near or far from the ozonation system. In addition, the response time that buildings take to reach the same concentration of ozone as the same system is found, among other things.

And finally, it was established the operation and maintenance cost of the ozonation system, as well as the savings that are had with respect to the purchase of bottled water.

1. Introducción

¿Cuál es la importancia del agua? “El agua es vida” es una expresión tan común que la usamos casi como un cliché. Sin embargo, esa frase es probablemente uno de los mensajes más poderosos a los que da testimonio toda la creación. Si, como aprendemos de la geografía, la tierra es agua 2/3, y la ciencia dice que el cuerpo humano tiene un 70% de agua, entonces no hace falta decir que no se puede mantener la vida sin agua. Se ha escrito mucho sobre la importancia del agua. Desde muy temprana edad, se nos ha enseñado el ciclo del agua y cómo sustenta la vida, pero aun así lo damos por sentado. Contaminamos las cuencas, los ríos e incluso la atmósfera que nos proporciona este preciado producto (Africa.com, 2017).

En el Plan de Desarrollo 2008-2012 del Instituto de Ingeniería (IINGEN) se implementó el Proyecto Institucional de Responsabilidad Ambiental (RAM), con el objetivo de adoptar y practicar en el Instituto una cultura ecológica con el fin de promover hábitos de consumo responsable de energía y agua primordialmente (*Gaceta del Instituto de Ingeniería*, junio 2011). Ello derivó en proyectos específicos y en una serie de campañas de concientización, programas de ahorro de energía y agua, adquisición de productos y materiales amigables, en el manejo adecuado de los residuos sólidos y peligrosos minimizando los impactos en el ambiente.

A mediados de 2016 se instaló y puso en marcha un “Sistema de potabilización con ozono en línea para abastecimiento de agua potable segura en el área del Instituto de Ingeniería”, el cual suministra agua ozonizada a diez edificios. Como parte de la presente tesina se realizó la evaluación operativa del sistema, se determinaron las condiciones actuales y el desempeño de los equipos instalados, se determinó el comportamiento de la concentración residual de ozono en agua de la red, experimentalmente y mediante simulación empleando el software EPANET.

Por otra parte, se establecieron las condiciones ideales de los equipos instalados en el sistema de ozonización, se dieron recomendaciones en su operación y se asentaron los problemas usuales que pudieran presentarse, así como sus respectivas soluciones o estrategias para mitigación de ellos.

2. Objetivos

Objetivo general

Evaluar las condiciones operativas de un sistema de ozonización en línea que suministra agua potable a diferentes edificios del Instituto de Ingeniería de la UNAM, conociendo el comportamiento de la concentración residual de ozono en los edificios.

Objetivos específicos

1. Evaluar las condiciones actuales de operación y desempeño de los equipos instalados.
2. Determinar experimentalmente el comportamiento de las concentraciones residuales de ozono en los distintos edificios que son abastecidos con agua ozonizada.
3. Realizar una simulación del comportamiento hidráulico y de los residuales de ozono en el agua mediante el software EPANET.
4. Generar información que complemente los procedimientos de operación y mantenimiento preventivo tomando en cuenta los resultados de la evaluación operativa.
5. Determinar el costo de operación y mantenimiento del sistema de ozonización.

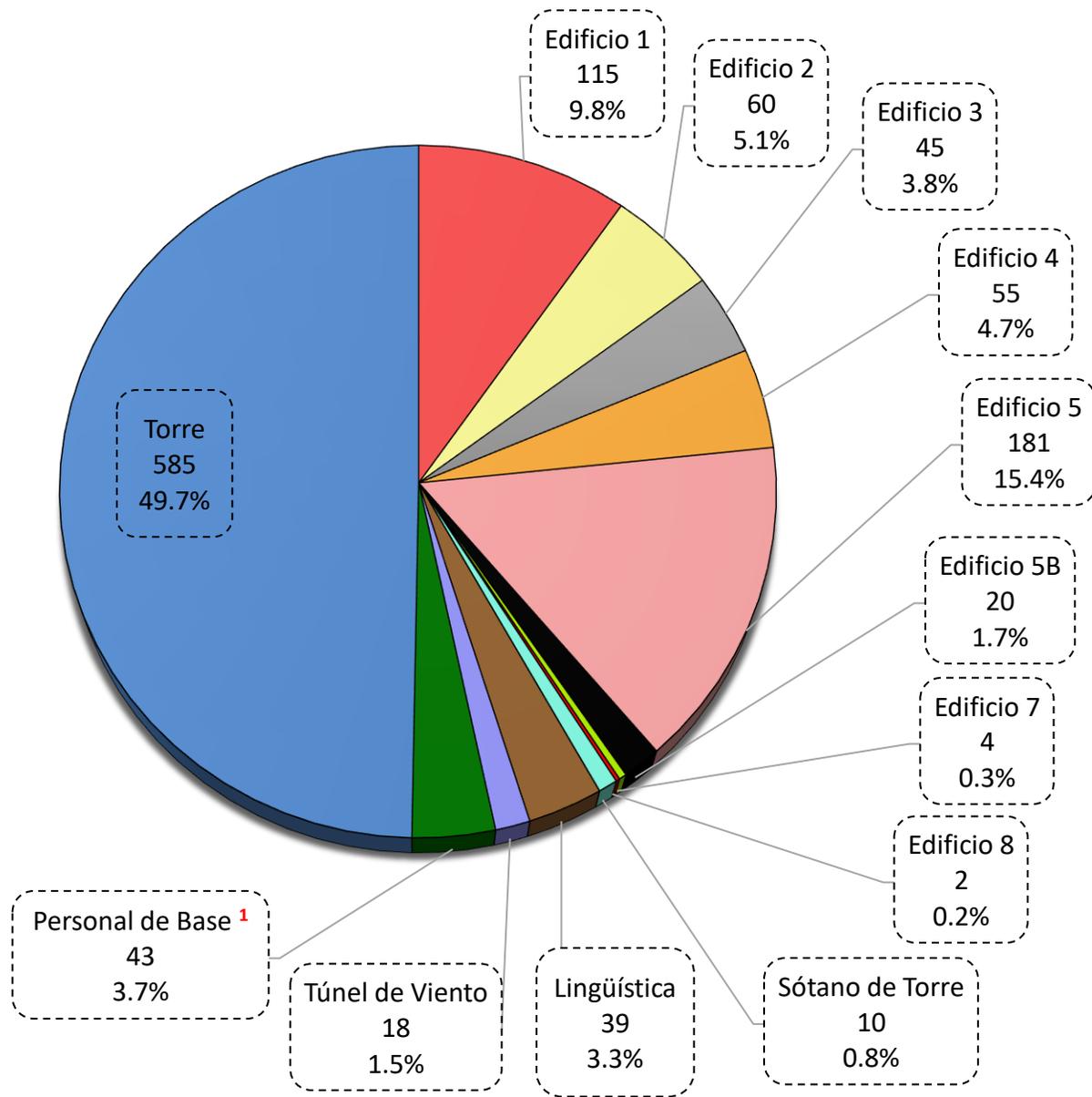
3. Antecedentes

3.1. Ubicación y descripción del área de estudio

El Instituto de Ingeniería es un centro de investigación en diversas áreas de la ingeniería que realiza investigación aplicada y fundamental, dirigida a la solución de problemas de interés nacional. Asimismo, ha puesto especial atención en formar recursos humanos especializados y en difundir los resultados de sus investigaciones, contribuyendo así al desarrollo del país y al bienestar de la sociedad.

Las instalaciones del Instituto de Ingeniería, objeto del presente proyecto, se encuentran ubicadas dentro del Campus Central de la UNAM, Ciudad Universitaria. A continuación, se hace una breve descripción de los edificios considerados en este estudio y de la población existente.

Figura 1. Población de los edificios del Instituto de Ingeniería.



Fuente: Instituto de Ingeniería de la UNAM (diciembre de 2018).

¹ El personal de base es una población flotante debido a que son choferes, personal de intendencia y vigilantes.



Edificio 1 "Fernando Hiriart Balderrama"

En este edificio se albergan la Dirección, Secretaría Académica, Secretaría Administrativa, Coordinación de Sismología e Instrumentación Sísmica - Unidad de Promoción y Comunicación, Laboratorio de Instrumentación Sísmica y la Unidad de Servicios de Información.



Edificio 2

En este edificio se albergan la Subdirección de Estructuras y Geotecnia y la Coordinación de Ingeniería Estructural.



Edificio 3 "Raúl Sandoval Ladázuri"

En este edificio se albergan el Laboratorio de Estructuras y Materiales y el Laboratorio de Hidráulica.



Edificio 4 "Raúl Marsal Córdoba"

En este edificio se albergan la Coordinación de Geotecnia y el Laboratorio de Mecánica de Suelos.



Edificio 5

En este edificio se albergan la Subdirección de Hidráulica y Ambiental, las Coordinaciones de Hidráulica e Ingeniería Ambiental y el Laboratorio de Ingeniería Ambiental.



Edificio 5B

En este edificio se alberga el Taller de Carpintería y un área de cubículos.



Edificio 7 "Nabor Carrillo Flores"

En este edificio se albergan los Laboratorios de Mecánica de Rocas, Enrocamientos y Microscopía Electrónica.



Edificio 8

En este edificio se albergan los Laboratorios de Hidromecánica, Ingeniería Marítima y de Flujo Bifásico.



Edificio 11

En este edificio se alberga el Laboratorio de Modelos Fluviales y modelos hidráulicos.



Edificio 13 "Torre de Ingeniería"

En este edificio se albergan los Laboratorios de Transporte y Sistemas Territoriales y Geoinformática, las Coordinaciones de Mecánica y Energía, de Ingeniería Sismológica y de Ingeniería de Procesos Industriales y Ambientales, el Grupo de Sistemas Educativos y la Secretaría Técnica. También se encuentra el restaurante "Azul y Oro" que brinda servicio de alimentos.

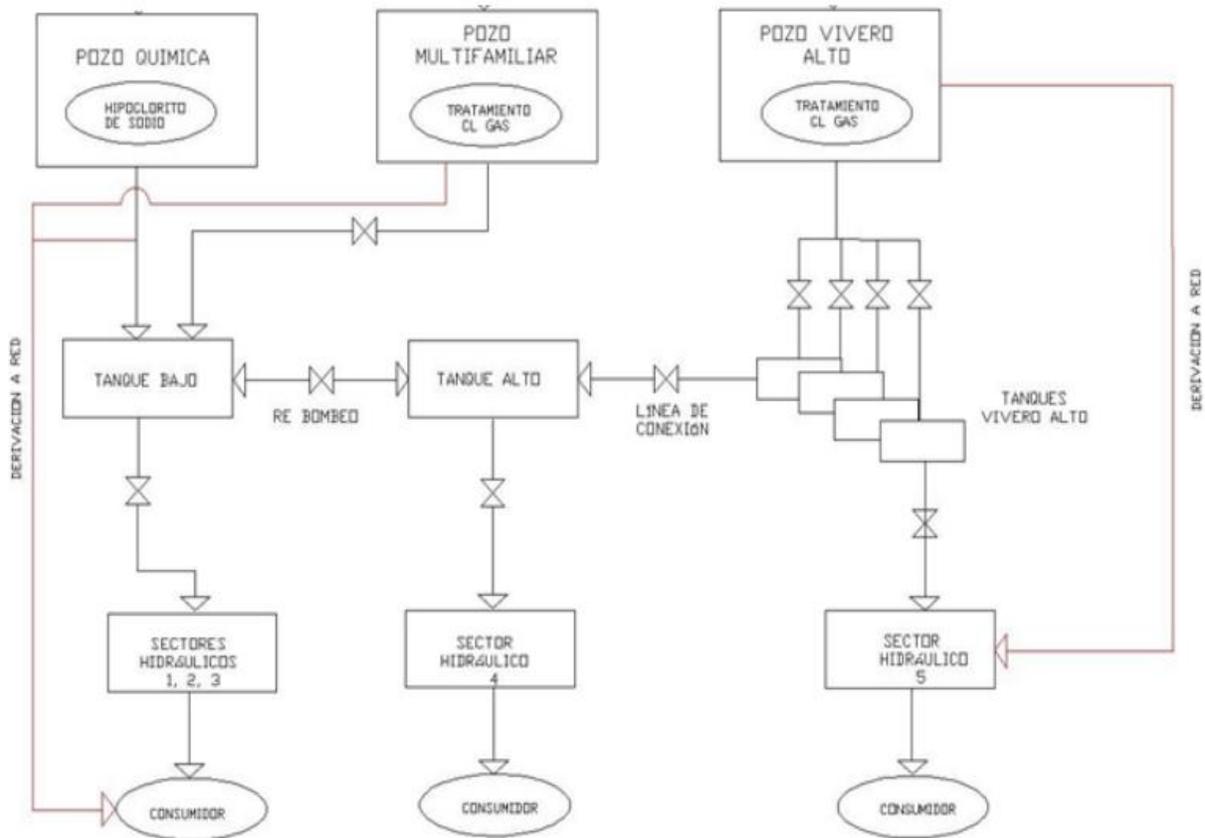


Basamento de la Torre de Ingeniería

Aquí se albergan la Coordinación de Mecánica Aplicada, Ala Norte y Sur, del Grupo de Mecánica Numérica, los grupos de Ingeniería Lingüística, de Sismología y de Saneamiento de Suelos, y el Túnel de Viento.

3.2. Descripción de la red de distribución de agua potable en Ciudad Universitaria

Figura 2. Red de distribución de agua potable en Ciudad Universitaria.



Fuente: Monroy, 2015.

El Campus Principal de la UNAM se abastece de tres pozos: Pozo I (Pozo "Facultad de Química"), Pozo II (Pozo del "Multifamiliar") y Pozo III (Pozo del "Vivero Alto"); los cuales son de uso exclusivo para Ciudad Universitaria (Rocha Guzmán, 2008, p.55). De los tres pozos se extrae un promedio de 70 l/s, siendo los pozos Multifamiliar y Vivero Alto los que aportan el 85% del agua extraída (PUMAGUA, 2016, p. 23)

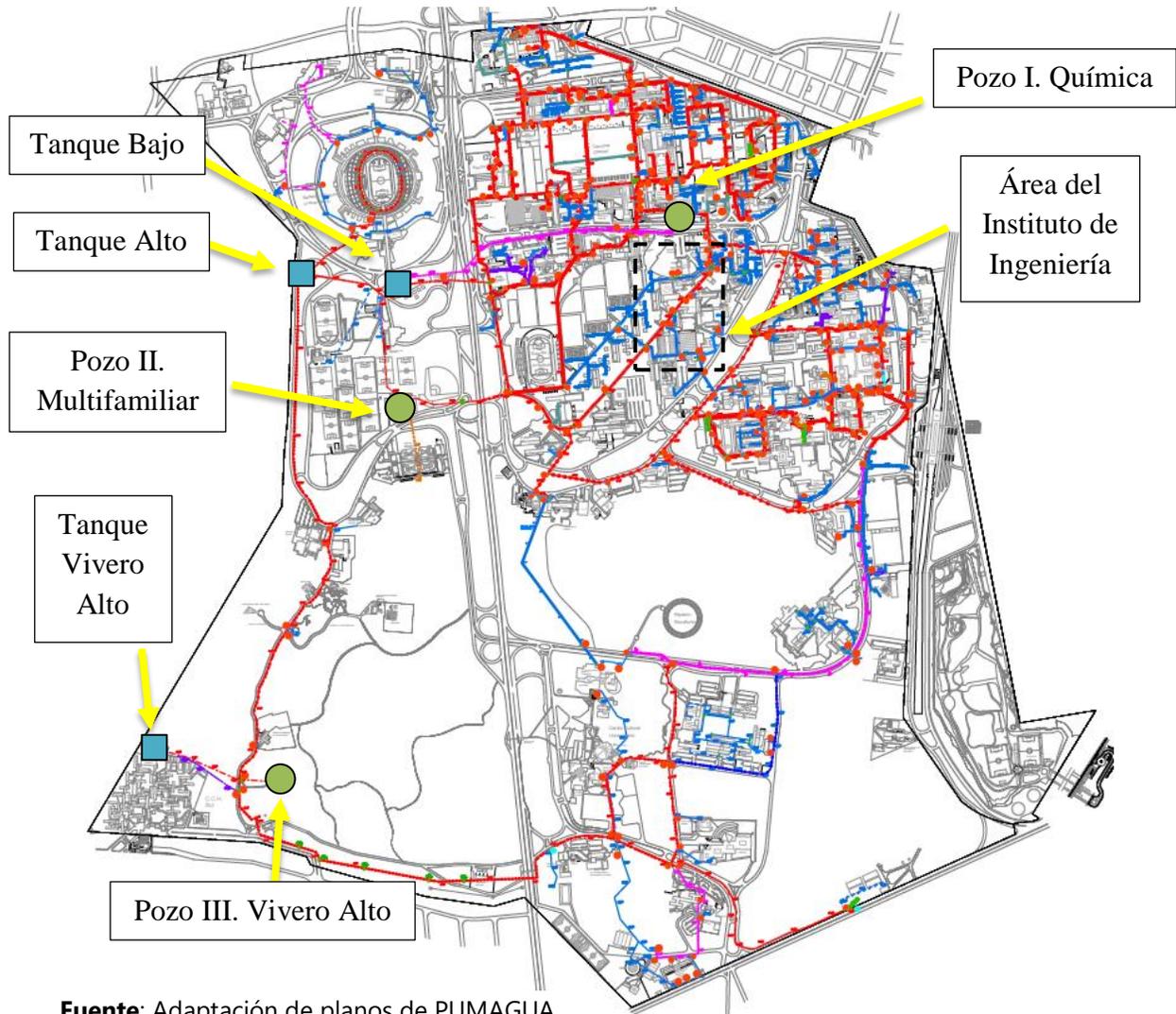
El sistema de regularización de Ciudad Universitaria cuenta con tres tanques reguladores: Tanque Alto, Tanque Bajo y Tanque de Vivero Alto. Los tres tanques son abastecidos por los tres pozos con que cuenta el campus. Son del tipo "superficiales" y cuentan en conjunto con una capacidad de 12,000 m³ (Rocha Guzmán, 2008, p.67).

La regulación tiene por objeto cambiar el régimen de suministro (captación-conducción), que normalmente es constante, a un régimen de demandas (de la red de distribución), que siempre

es variable. El tanque de regulación es la estructura destinada para cumplir esta función, y debe proporcionar un servicio eficiente, bajo normas estrictas de higiene y seguridad, procurando que su costo de inversión y mantenimiento sea mínimo. La capacidad del tanque está en función del gasto máximo diario y la ley de demandas de la localidad, calculándose ya sea por métodos analíticos o gráficos (CONAGUA, 2016, págs.18-19).

El Tanque Bajo es abastecido por el pozo de Química y su función es apoyar al Tanque Alto (mediante un equipo de rebombeo); esto cuando el pozo Multifamiliar está en mantenimiento. El Tanque Alto es abastecido por el pozo Multifamiliar y cuando está en mantenimiento también lo puede apoyar el Tanque Vivero Alto. El Tanque Vivero Alto se alimenta del pozo Vivero Alto; este tanque está formado por cuatro tanques que se comunican entre sí (Rocha Guzmán, 2008, p.67).

Figura 3. Ubicación de Tanques de Almacenamiento y Pozos en Ciudad Universitaria.



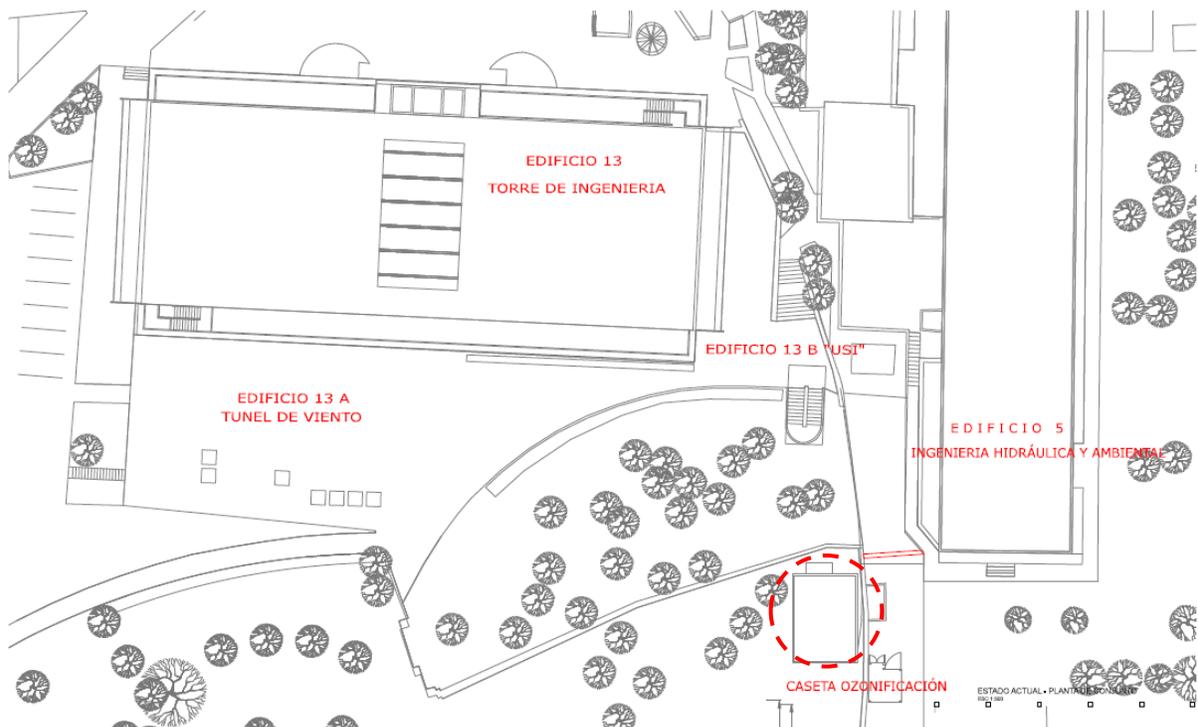
Fuente: Adaptación de planos de PUMAGUA.

3.3. Situación actual de la red de distribución de agua potable en el IINGEN

La red de distribución de agua potable del Instituto de Ingeniería es abastecida con agua del Tanque Bajo y pertenece únicamente al Sector Hidráulico I. El sistema de ozonización se encuentra ubicado a un costado de los edificios 5 y 13 (ver **Figura 4**) y abastece a los edificios 1, 2, 3, 4, 5, 5B, 7, 8, 11, y 13 o Torre de Ingeniería. Los edificios 2, 3 y 4, anteriormente eran abastecidos con agua de la red de distribución correspondiente al Sector Hidráulico III y a partir del mes de julio del 2017, fueron interconectados a la misma red de agua ozonizada.

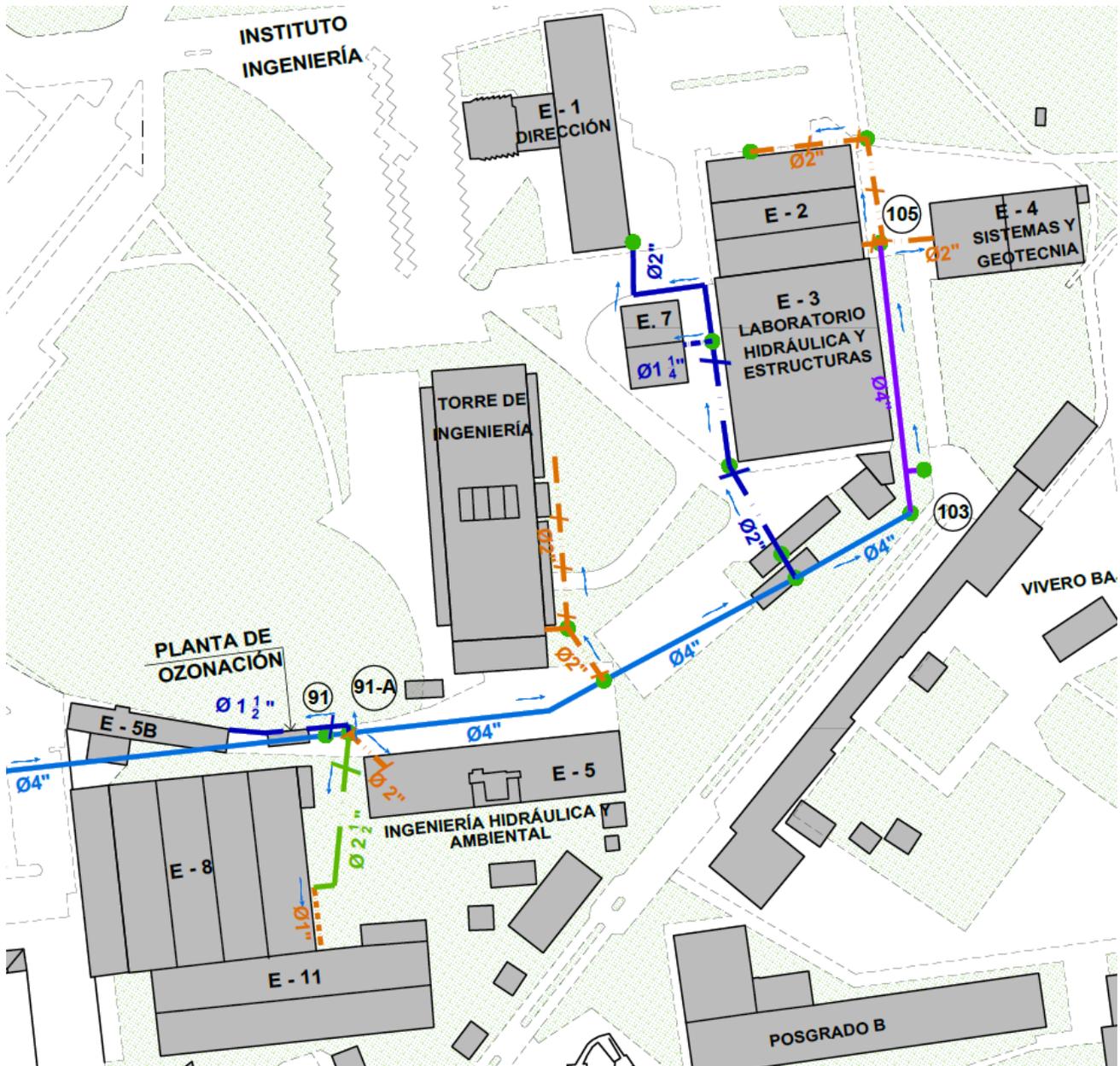
De la información contenida en los planos de PUMAGUA (**Figura 5**), se puede observar la trayectoria, material y diámetro de las tuberías actuales.

Figura 4. Croquis de localización de la caseta del sistema de ozonización.



Fuente: Melgarejo, 2016.

Figura 5. Red de distribución de agua potable actual del Instituto de Ingeniería.



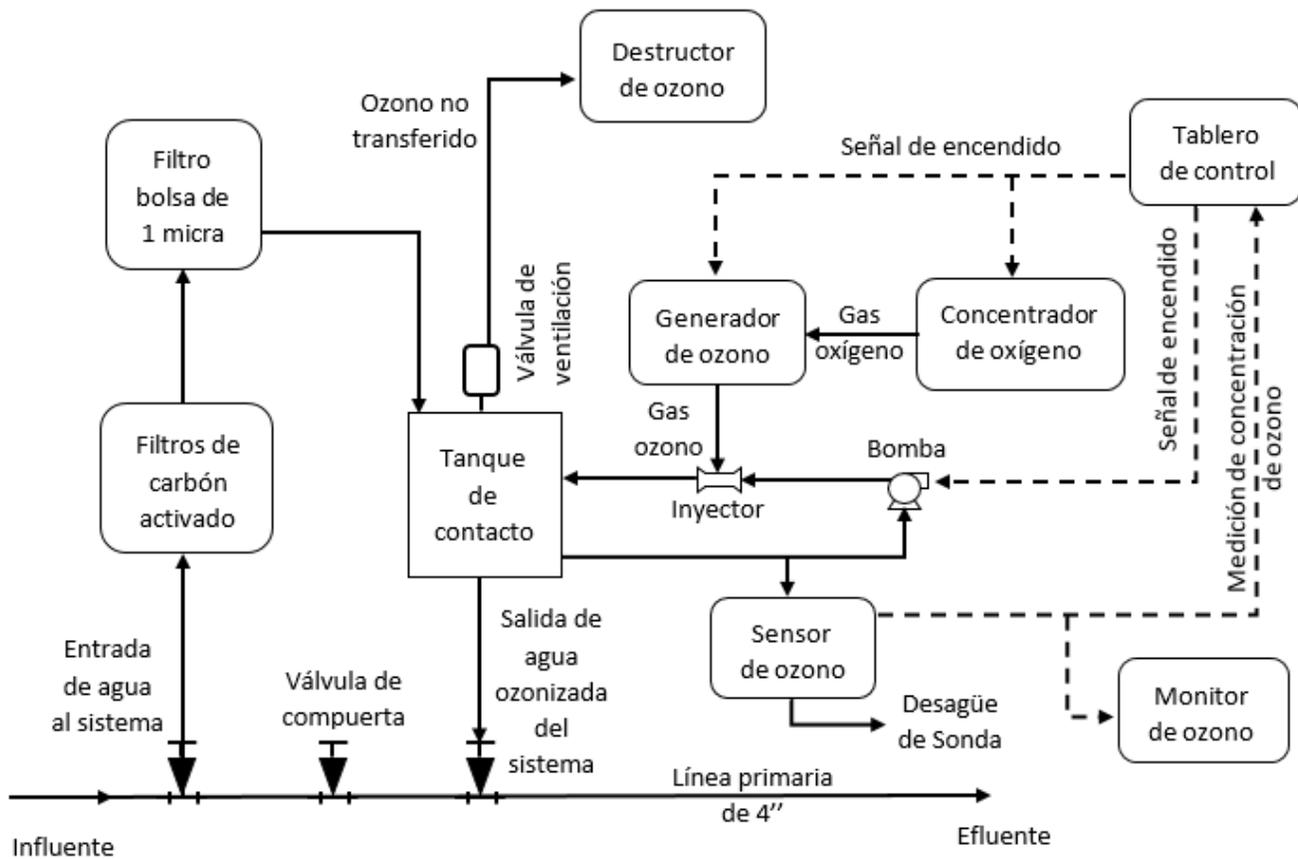
Fuente: Plano proporcionado por el grupo de Balance Hidráulico de PUMAGUA (febrero de 2019).

MATERIAL	SIMBOLOGÍA	DIÁMETRO	SIMBOLOGÍA	
Cobre		1"		Crucero
Cobre		2"		Diámetro de tubería
Fierro Fundido		4"		Flujo de conducción
PPR		2 1/2"		
PEAD		4"		
PVC		1 1/4"		
PVC		1 1/2"		
PVC		2"		

4. Descripción del Sistema de Ozonización

El sistema de ozonización en línea instalado consta de los siguientes componentes básicos: 1) filtros gemelos de carbón activado; 2) filtro bolsa de 1 micra; 3) tanque de contacto para garantizar un tiempo de retención hidráulico y dosificación y transferencia de masa de ozono al agua; 4) sistema de inyección de ozono en línea integrado por: bomba centrífuga, inyector Venturi, sensor y monitor de ozono disuelto, concentrador de oxígeno y generador de ozono; 5) válvula desgasificadora y destructor térmico de ozono; y 6) tablero de control automático.

Figura 6. Sistema de potabilización de agua con ozono en línea.



Fuente: Elaboración propia, diciembre de 2018.

Filtros de carbón activado

El agua clorada proveniente de la red de distribución se conduce a través de una tubería de 4" de acero galvanizado que llega al sistema de ozonización. Los filtros gemelos de carbón activado de cáscara de coco (Carbo Shell®) son los primeros dispositivos que reciben al agua previo a la etapa de ozonización.

Tienen como finalidad reducir los niveles de cloro que contiene el agua, los cuales llegan a superar ocasionalmente los niveles recomendados en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994 "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización" (1.5 mg/L), lo cual imparte al agua sabor y olor desagradable.

Los filtros gemelos están instalados para que trabajen alternadamente, es decir, que mientras uno opera realizando la filtración del agua clorada, el otro se encuentra en modo de espera o "Standby" después de un proceso de retrolavado o limpieza que permite evitar la acumulación de partículas suspendidas en el medio filtrante.

Las condiciones de operación recomendadas de los filtros de carbón activado se enlistan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Condiciones de operación de los filtros de carbón activado.

Presión de operación mínima/máxima	20 psi (1.4 kg/cm ²) / 100 psi (8.6 kg/cm ²)
Temperatura de operación mínima/máxima	4°C – 43°C
Temperatura de diseño	15°C a 25°C
Voltaje de alimentación	120 V
Frecuencia de alimentación	60 Hz

Fuente: Tecnoagua (Manual de Operación).

Figura 7. Filtro de carbón activado.



Fuente: Tecnoagua.com.mx

Filtro bolsa de 1 micra

Este filtro bolsa de polipropileno de una micra se instaló posteriormente a la puesta en marcha del sistema de ozonificación como solución a los problemas que generaban las partículas que escapaban de los filtros de carbón activado, ya que obstruían el paso del agua en el inyector Venturi, afectaban la inyección de ozono y el flujo de agua en la celda del sensor de ozono disuelto.

El medio filtrante va contenido en un portafiltro de acero inoxidable de marca Hydronix[®], modelo BF-304-2N, que cuenta con una clavija movible para un cambio de bolsa rápido.

Las condiciones de operación recomendadas del filtro bolsa se enlistan en la siguiente tabla:

Tabla 2. Condiciones de operación del portafiltro.

Presión de operación máxima	150 psi (10.5 kg/cm ²)
Temperatura de operación máxima	93 °C
Entrada / Salida	2" FNPT (Female National Pipe Thread)
O-Ring Material	EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) Grado FDA
Tamaño de bolsa compatible	#1 o 2 Estándar

Fuente: Aiqua.mx

Tanque de contacto

El sistema de ozonización utiliza un tanque de contacto (ver **Figura 18**) para transferir y dosificar al agua el ozono gas generado y para garantizar un tiempo de contacto entre el agua y el ozono que asegure la desinfección del agua.

El tanque de contacto es de acero inoxidable en calibre 10, con unas medidas de 0.62 metros de diámetro y 2.60 metros de altura, resultando así con un volumen de 785 litros.

Por otra parte, el tanque cuenta con una válvula desgasificadora para liberar el exceso de gas que no fue transferido al agua y conducirlo a una unidad de destrucción térmica para su liberación segura al ambiente.

Figura 8. Portafiltro para filtro bolsa.



Fuente: Aiqua.mx

Bomba centrífuga

La presión que se maneja dentro de la red de distribución de agua es de aproximadamente 4.5 kg/cm² y para la inyección del ozono en línea se cuenta con un inyector tipo Venturi, a través del cual se hace pasar agua a presión con un diferencial de entrada y salida alrededor de 2-3 kg/cm² para lograr la incorporación del gas por efecto del vacío. Para ello se tiene instalada una bomba centrífuga de 5 HP (ver **Figura 18**), que permite generar dicho diferencial de presión y con ello lograr mantener la presión en la línea en un orden de 4.0 kg/cm² sin tener pérdidas significativas de carga hidráulica para el suministro de agua a los edificios.

Inyector Venturi

Como se mencionó anteriormente, para la incorporación del ozono en línea se utiliza un inyector tipo Venturi de la marca Mazzei[®], el cual permite la dosificación y la solubilización del gas mediante la dispersión de burbujas finas en el tanque de contacto. Como se puede apreciar en la **Figura 9**, el gas ozono se inyecta en un puerto de succión por efecto de vacío debido al fluido de agua que se hace pasar a presión a través de una sección de tubería con cambio de diámetro en el interior del inyector Venturi.

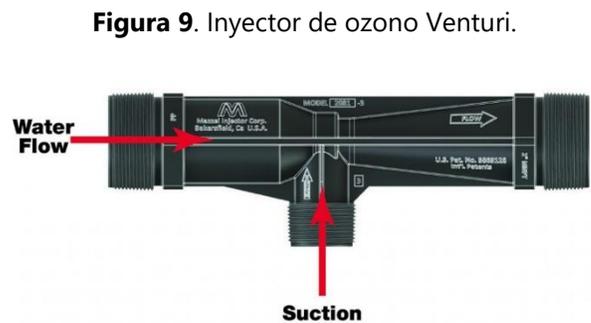


Figura 9. Inyector de ozono Venturi.

Fuente: Mazzei.com

Mediante este inyector es posible dosificar una gran cantidad de ozono en tiempos cortos para satisfacer la demanda de este oxidante y con ello mantener un residual por un tiempo necesario para asegurar la inactivación de microorganismos patógenos que pudieran estar presentes en el agua.

Mediante este inyector es posible dosificar una gran cantidad de ozono en tiempos cortos para satisfacer la demanda de este oxidante y con ello mantener un residual por un tiempo necesario para asegurar la inactivación de microorganismos patógenos que pudieran estar presentes en el agua.

Sensor de ozono disuelto

El sensor Rosemount[®] modelo 499AOZ es un sensor amperométrico que mide en forma continua y en línea la concentración de ozono disuelto en el agua con una sensibilidad entre 0-3 ppm (mg/L). El sensor está compuesto por una membrana permeable a los gases colocada sobre un cátodo de oro. Un ánodo de plata y una solución electrolítica completan el circuito

interno. Durante la operación, el ozono se difunde a través de la membrana, y una vez dentro del sensor, reacciona con la solución electrolítica (KBr) para formar un compuesto intermedio. Una tensión de polarización aplicada al cátodo reduce completamente el compuesto. La reducción produce una corriente que el monitor mide y que es directamente proporcional a la velocidad a la que el ozono se difunde a través de la membrana, que en última instancia es proporcional a la concentración de ozono en la muestra (EMERSON, 2015, p. 1). El reemplazo de la solución electrolítica y el cambio de membrana es variable, en promedio se realiza cada seis meses.

El sensor tiene un tiempo de respuesta que tarda 30 segundos en alcanzar el 90% de la lectura final a 25 grados centígrados. Además, el sensor cuenta con una compensación automática para los cambios en la permeabilidad de la membrana flexible que iguala la presión de la membrana para evitar la distorsión y asegurar un pequeño impacto en la capacidad de respuesta del sensor cuando cambia la presión (EMERSON, 2017b, p. 4).

A continuación, se enlistan otras especificaciones del sensor de ozono disuelto:

Tabla 3. Especificaciones del sensor de ozono.

Linealidad	$\pm 5\%$ de la lectura o ± 3 ppb a 25°C
Presión de operación	0 a 65 psi
Volumen de solución electrolítica	25 ml (aprox.)
Vida de la solución electrolítica	3 meses (aprox.); para mejores resultados el proveedor recomienda un reemplazo mensual.
Temperatura de operación	0 a 50 °C
Material del Cátodo	Oro
Repetibilidad	$\pm 2\%$ de la lectura a temperatura constante
Flujo en la celda	3.8 a 19 L/min

Fuente: (EMERSON, 2017b, p. 4)

Figura 10. Sensor de ozono disuelto.



Fuente: Manual Emerson

Monitor de ozono

El monitor de ozono instalado es un analizador inteligente de entrada dual de la marca Rosemount[®], modelo 1056, que acepta entradas de hasta 2 sensores de análisis de líquidos. Este instrumento multiparamétrico permite medir, además de ozono disuelto, pH, resistividad, conductividad, temperatura, cloro, oxígeno, turbidez, entre otros parámetros, lo cual depende del sensor instalado (EMERSON, 2017a). Además, cuenta con una pantalla táctil mediante la cual se puede calibrar el sensor que está en uso (EMERSON, 2017^a, p. 1)

Concentrador de oxígeno

El concentrador de oxígeno AirSep[®], modelo Topaz Plus, es una unidad autónoma que utiliza la tecnología de adsorción por cambio de presión (PSA, por sus siglas en inglés) para producir oxígeno en el sitio. El proceso de PSA toma aire del ambiente para entregar una corriente concentrada en oxígeno continuamente para la producción de ozono (AirSep, 2012, p. 11).

El aire ambiente que ingresa al sistema pasa primero por una malla filtrante para eliminar partículas grandes de polvo y luego fluye a través de un compresor interno. El aire se enfría mediante un ventilador y se hace pasar a presión a través de columnas empacadas con material desecante y un material cerámico inerte llamado tamiz molecular, que separa el aire comprimido en oxígeno y otros gases (AirSep, 2012, p. 11).

Las propiedades únicas del tamiz molecular le permiten separar físicamente el nitrógeno del aire. Esto permite que el oxígeno salga de las columnas como una corriente concentrada (>95%) para que posteriormente sea enviado a un tanque de mezcla que mantiene un flujo estable. El oxígeno fluye desde el tanque de mezcla a través de un regulador de presión que permite establecer la presión de suministro según lo requerido (AirSep, 2012, p. 11).

Finalmente, el oxígeno fluye a través de un medidor de flujo que permite establecer la velocidad de flujo requerida.

Figura 11. Analizador de entrada dual Rosemount 1056.



Fuente: Manual Emerson

Figura 12. Concentrador de oxígeno AirSep Topaz Plus.



Fuente:
www.medicaexpo.es

Las condiciones de operación recomendadas del concentrador de oxígeno se enlistan en la siguiente tabla:

Tabla 4. Condiciones de operación del concentrador de oxígeno.

Flujo de oxígeno	6-8 LPM en el rotámetro.
Presión estándar de oxígeno	15-20 psi
Pureza del oxígeno	93% ± 3%
Concentración del oxígeno	Por arriba del 95%
Nivel de sonido	55 dB a 1 metro de distancia (a campo abierto)
Rango de temperatura ambiente	40°C (máxima) - 4°C (mínima)
Consumo normal de energía	350 W

Fuente: (AirSep, 2012, p. 35)

Generador de ozono

El generador de ozono de plasma, Plasma Blo₃ck[®] de Plasma Technics Inc.[®], es un componente mecanizado de precisión fabricado en aluminio que, al aplicarle alto voltaje a la porción interna del generador, donde el gas que proviene del concentrador fluye a través de éste en estado plasma, convierte el oxígeno en ozono.

Si bien el material con que está hecho el generador, proporciona máxima seguridad para la purificación del agua, el aluminio reacciona con el ácido nítrico que se produciría si se utilizará directamente aire atmosférico como gas de alimentación. Por lo que este equipo sólo utiliza oxígeno o una corriente concentrada de oxígeno libre de nitrógeno y de humedad para producción del ozono gas.

El plasma se define como un gas que es parcialmente ionizado (en un pequeño porcentaje) y se crea a temperatura ambiente o inferior. La ionización del oxígeno puro se lleva a cabo entre dos electrodos que están separados por una barrera aislante (barrera dieléctrica). Sobre el plasma las moléculas de oxígeno se dividen en átomos de oxígeno individuales que luego se recombinan con O₂ y forman el ozono (O₃).

Las condiciones de operación recomendadas del generador de ozono se enlistan en la siguiente tabla:

Figura 13. Generador de ozono Plasma BIO3ck.



Fuente: www.plasmatechnics.com

Tabla 5. Condiciones de operación del generador de ozono.

Nivel de producción de ozono	10 gr/hr (basado en 5% de concentración)
Flujo del gas ozono	3 LPM al 5% de concentración y 5 psi
Potencia	135 W
Presión del oxígeno de entrada	10 – 12 psi
Flujo de oxígeno	3 – 10 LPM
Voltaje	Universal

Fuente: (PlasmaTechnics, 2018)

Válvula de ventilación

La válvula automática de ventilación de aire/gas de acero inoxidable, marca Armstrong® modelo 11-av, tiene el propósito de proporcionar una ventilación del gas ozono que no ha sido transferido al agua en el tanque de contacto.

Este dispositivo emplea un flotador que acciona una válvula guiada de flotación libre. La guía de la palanca garantiza un cierre positivo en todas las condiciones sin dejar pasar agua.

Las condiciones de operación recomendadas de la válvula de ventilación se enlistan en la siguiente tabla:

Tabla 6. Condiciones de operación de la válvula de ventilación.

Presión máxima de trabajo y temperatura	34 Bar a 38°C y 30 Bar a 260 °C
Flujo de aire/gas	195 m ³ /h
Presión máxima de trabajo (hidrocarburos)	12 bar

Fuente: (Aljac, n.d.)

Figura 14. Válvula de ventilación de gas.



Fuente:
www.armstronginternational.com

Destructor térmico de ozono

La concentración que alcanza el ozono disuelto es directamente proporcional a la presión parcial del gas de ozono sobre el agua. Por lo tanto, aún con una eficiencia de transferencia de 90% (una de las mejores alcanzadas), el gas que escapa puede contener 500 a 1,000 ppm de ozono (Solsona & Méndez, 2002).

El ozono no transferido en el agua procesada en el tanque de contacto es liberado como gas no transferido mediante la válvula de ventilación y enviado a un "destructor" térmico para evitar daños al medio ambiente. El destructor de ozono, mediante el efecto de la temperatura, convierte de nuevo este gas a oxígeno antes de liberarlo a la atmósfera.

El destructor de ozono está diseñado para reducir la concentración en la corriente de gas agotada a 0.1 ppm, el límite actual propuesto por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA, por sus siglas en inglés) para la exposición de trabajadores en una jornada de 8 horas.

Tablero de control automático

A partir de este tablero es que se tiene el control de encendido o apagado de la bomba de recirculación, generador y destructor de ozono y concentrador de oxígeno, con funcionamiento manual o automático por medio de un controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés), ver en **Figura 17**.

Además, el panel de control permite modular la generación de ozono, registrar la medición de ozono disuelto, monitorear la presión a la salida de la bomba de recirculación, y observar en todo momento un valor de consigna o "setpoint" de la concentración residual de ozono para el encendido o apagado del equipo. Este valor de consigna ha sido establecido conforme a la experiencia y realizando el monitoreo de todos los edificios para mantener valores residuales de ozono en el agua en un intervalo entre 0.07-0.2 mg/L.

Figura 15. Destructor de ozono.



Fuente: Elaboración propia, diciembre de 2018.

Figura 16. Panel de control automático.



Fuente: Elaboración propia, diciembre de 2018.

El panel de control, PLC, monitor y generador de ozono, válvula de entrada al generador de ozono, así como otros componentes eléctricos y de presión, se encuentran ubicados en un panel de distribución, también llamado caja de pared, que permite mantener aislados eléctricamente a estos componentes, así como mantenerlos seguros y fuera del alcance de la intemperie.

Figura 17. Interior de Caja de Pared ABB-IP66.

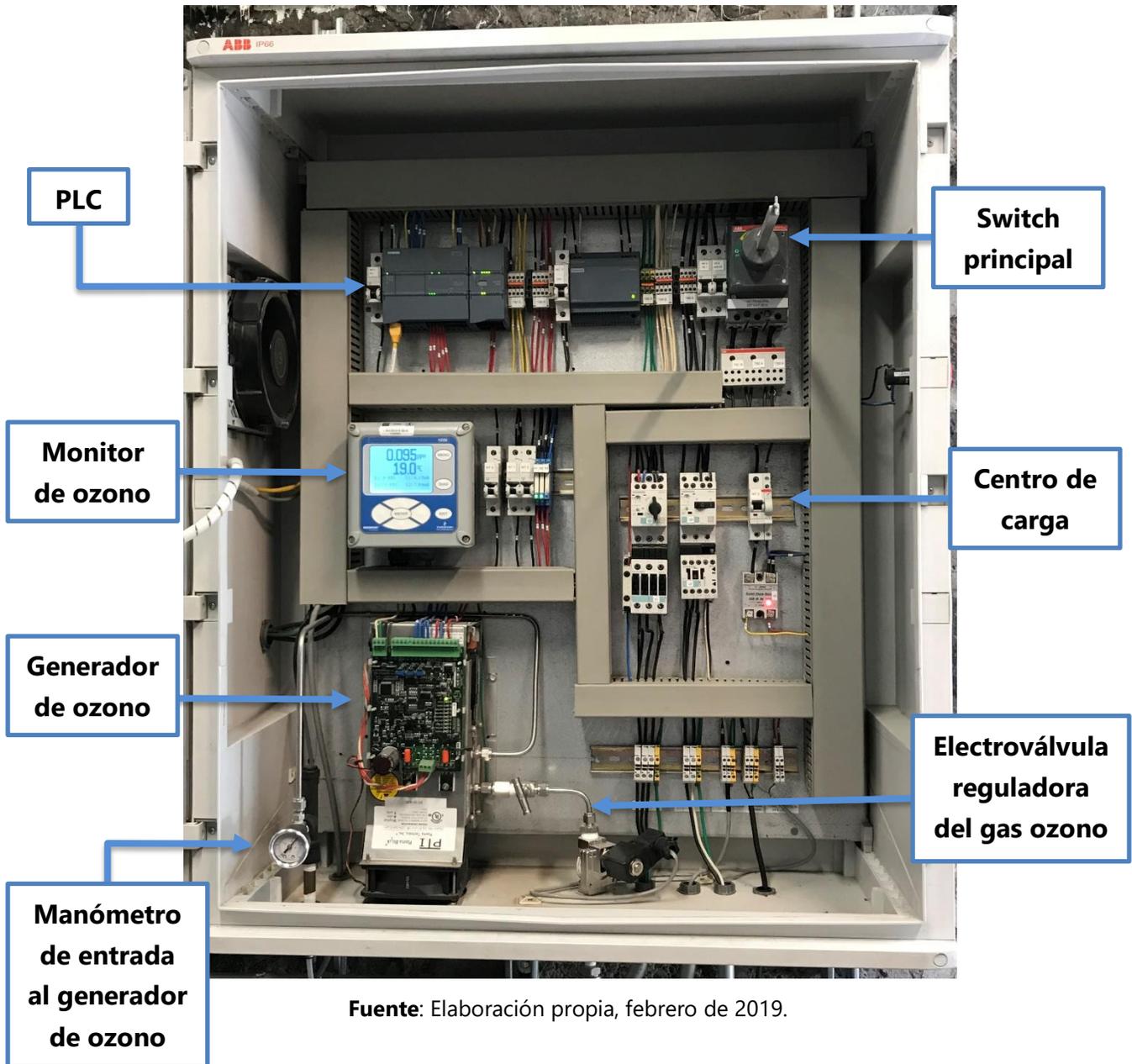


Figura 18. Sistema de ozonización en línea del Instituto de Ingeniería.



Fuente: Elaboración propia, diciembre de 2018.

5. Operación del Sistema de Ozonización en Línea

La evaluación operativa del sistema de ozonización en línea tuvo como alcance determinar las condiciones actuales de operación y evaluar los residuales de ozono en la red de distribución del Instituto de Ingeniería en puntos de consumo de agua de los edificios abastecidos.

La operación y el control automático del sistema de ozonización depende de la concentración de ozono residual que se desee tener en el agua, la cual se mide en línea de manera constante mediante el uso de un sensor para ozono disuelto en una corriente derivada de agua del tanque de contacto. Las lecturas que arroja dicho sensor de ozono disuelto son la señal para el encendido y apagado del generador de ozono.

La producción y la inyección de ozono gas en línea depende de la demanda de agua que no es constante, si no que varía a lo largo del día. De acuerdo al seguimiento realizado, se registró una concentración promedio de ozono en el gas que se inyecta en línea entre 1 y 3% (w/v), para

mantener en el agua los residuales de ozono deseados (0.07 – 0.2 mg/L). En ciertas ocasiones dicho porcentaje puede llegar a 0% por periodos cortos de tiempo en momentos de muy bajo consumo de agua. El valor vuelve a incrementarse a los valores promedio cuando la concentración de ozono residual del tanque de contacto se encuentra por debajo del valor de consigna establecido (0.07 mg/L)

Por el contrario una condición de operación anormal es que se detenga definitivamente la producción de ozono, lo cual puede estar relacionado con algún problema de presión en el generador de ozono y/o la falta de alimentación de oxígeno, Las medidas correctivas de operación se pueden consultar en el Capítulo 8 "**Posibles Fallas de Operación**".

Por ejemplo en este caso, se debe verificar que el flujo y la presión del concentrador de oxígeno se encuentre entre 6-8 LPM y 15-20 psi, respectivamente. Asimismo, corroborar que la presión en el manómetro de entrada al generador de ozono se encuentre en un intervalo entre 10-12 psi (ver **Figura 19**).

De manera rutinaria se realizan monitoreos semanales de los residuales de ozono en la red de distribución, y se verifica la calibración del sensor de ozono disuelto.

Para medir el ozono disuelto en el agua se utiliza el método colorímetro de índigo (ver el anexo **C. Método colorimétrico de índigo**), descrito en los "Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales" de la AWWA, APHA y la WPCF, el cual se basa en la medición de la decoloración por la reacción del ozono con el trisulfonato de potasio índigo en solución acuosa. Este método es empleado debido a sus atributos primarios que son su sensibilidad, selectividad, exactitud (en pruebas de laboratorio el error relativo es de 1%) y sencillez.

El método permite medir la concentración del ozono acuoso en un rango bastante amplio que dependerá del reactivo utilizado, ya sea el reactivo índigo I (rango bajo) que mide concentraciones de 0.01 a 0.1 mg de O₃/L, o el reactivo índigo II (rango alto) que mide concentraciones de 0.05 a 0.5 mg de O₃/L.

Figura 19. Manómetro de entrada al generador de ozono.



Fuente: Elaboración propia, enero 2019.

Es preciso mencionar que existen compuestos que pueden causar interferencias en las mediciones, dependiendo de su concentración (H_2O_2), Mn (II), bromo y cloro; para el control de dichas interferencias se hace uso de ácido malónico y glicina, respectivamente.

Como parte de la valoración operativa se llevó a cabo el monitoreo de ozono residual en todos los edificios que son abastecidos con agua ozonizada, a excepción del edificio 11 que se ha mantenido cerrado por cuestiones de mantenimiento. En el anexo "**D**" se podrán observar los puntos de muestreo de los edificios.

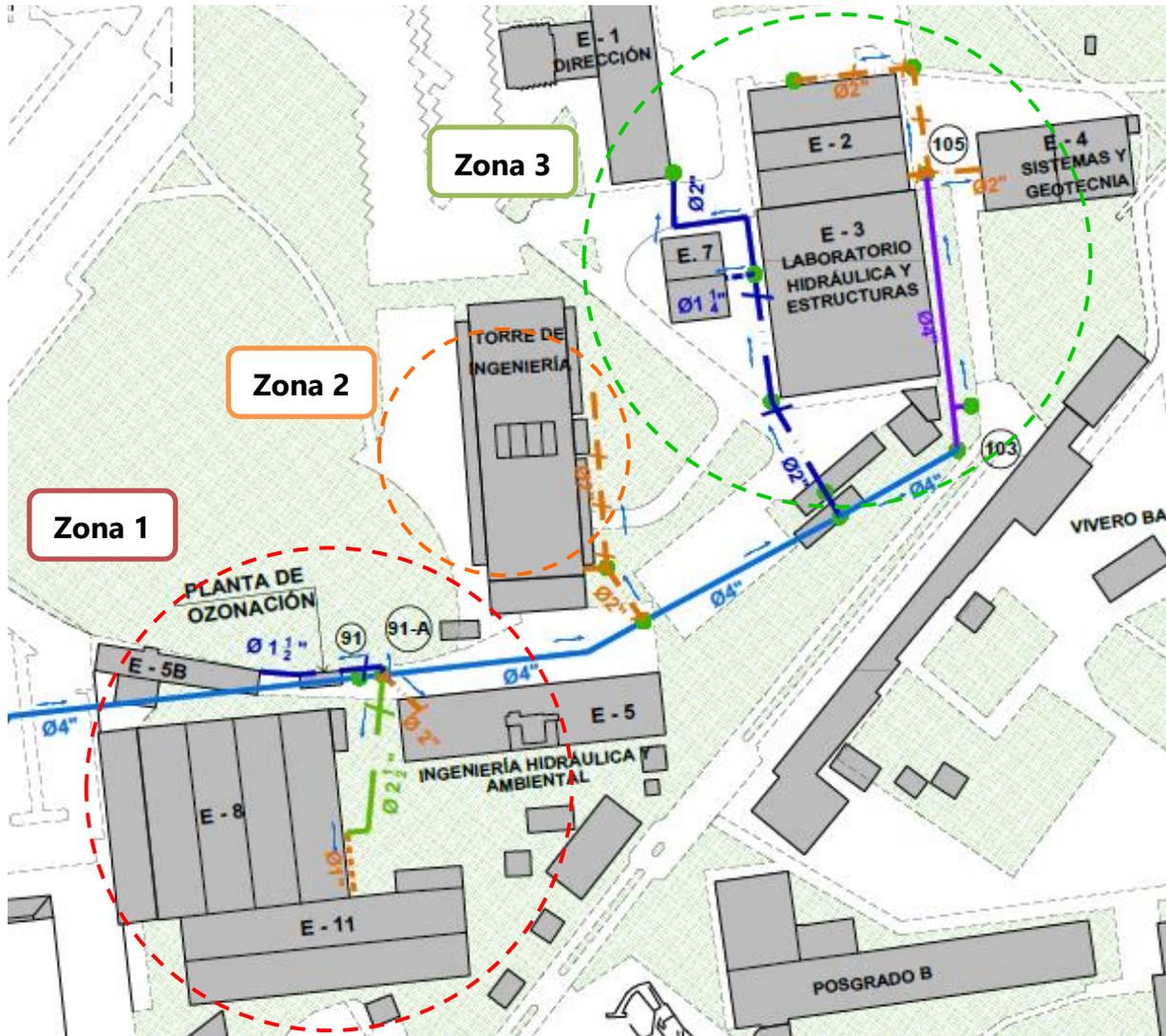
De acuerdo con los resultados del monitoreo realizado durante un periodo de 5 meses, se identificaron tres zonas que presentaron un comportamiento similar con respecto a la concentración de ozono residual. En la **Figura 20** se muestra un plano con las tres zonas identificadas y los edificios correspondientes: Zona 1, edificio 5, 5B Y 8; Zona 2, Torre de Ingeniería y su basamento; y la Zona 3, edificios 1, 2, 3, 4, y 7.

En las **Figura 21**, **Figura 22** y **Figura 23** se grafican los valores promedio de concentración de ozono residual (C_R promedio) para los edificios. En general, los valores se mantienen en un intervalo de concentración entre 0.05 – 0.2 mg/L, y las fluctuaciones que se tienen se atribuyen a la demanda específica de agua que se tienen en los edificios y de la estabilidad intrínseca del ozono en el agua.

Esporádicamente en algunos días se detectaron valores fuera del rango deseable de C_R (0.05 - 0.2 mg/L) para el proceso, atribuibles a la recalibración y cambios de membrana del sensor de ozono disuelto; los valores vuelven a su condición normal después del ajuste respectivo.

Durante los 5 meses de medición las concentraciones de ozono residual promedio en las distintas zonas son: 0.135 mg/L para los edificios de la zona 1, 0.100 mg/L para los edificios de la zona 2 y por último, 0.093 mg/L para los edificios de la zona 3.

Figura 20. Zonas de la Red de Distribución de agua potable del IINGEN con comportamiento similar en la concentración residual de ozono.



Fuente: Adaptación del plano proporcionado por el grupo de Balance Hidráulico de PUMAGUA (enero 2019).

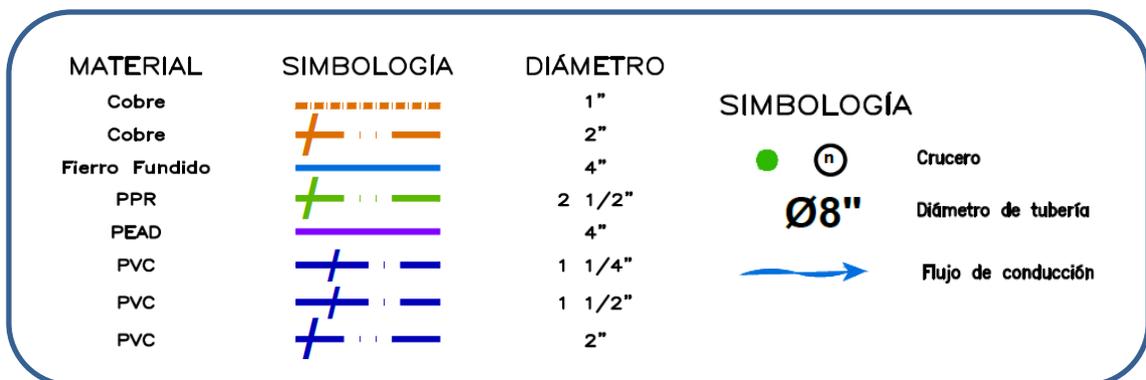
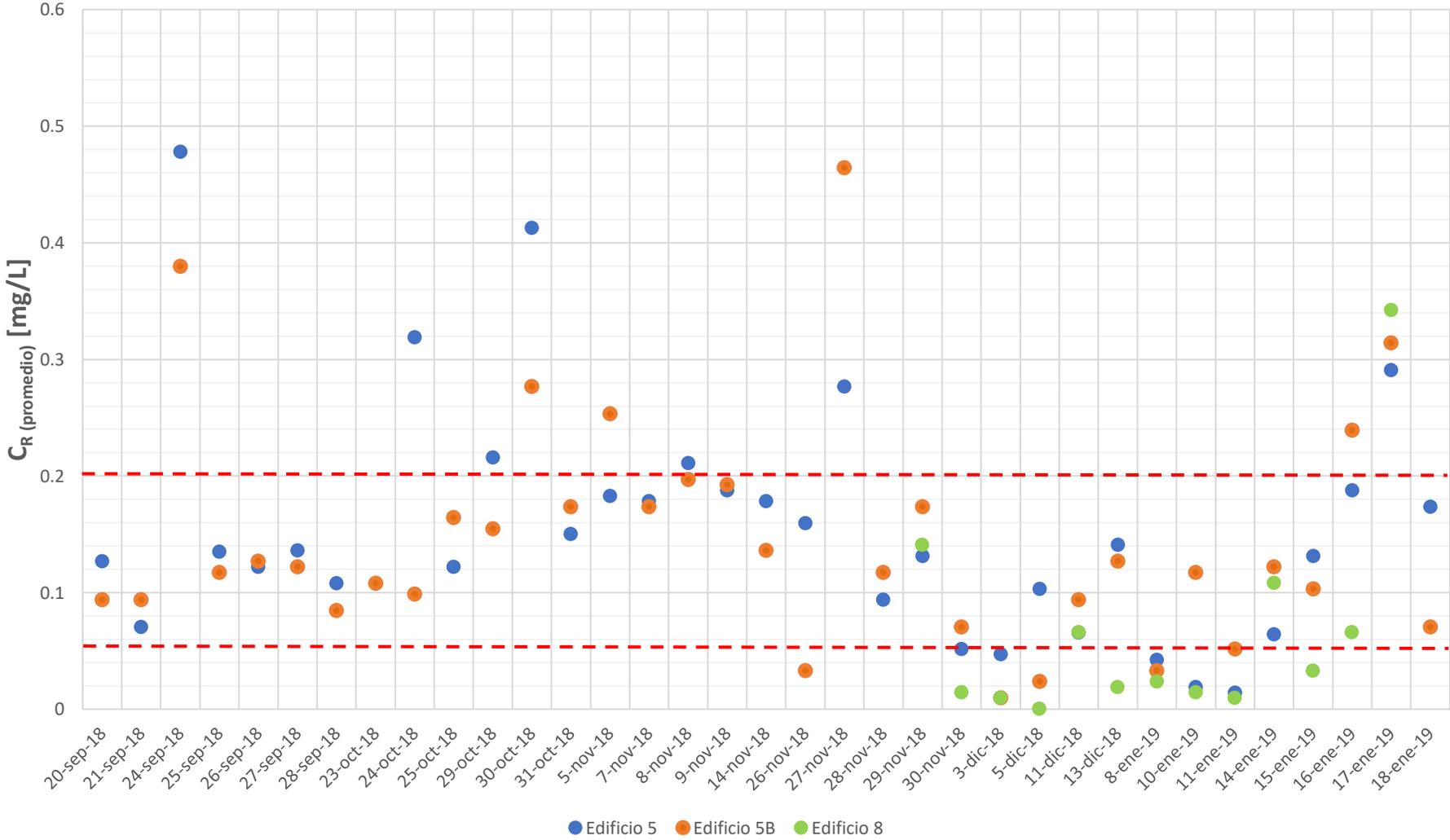
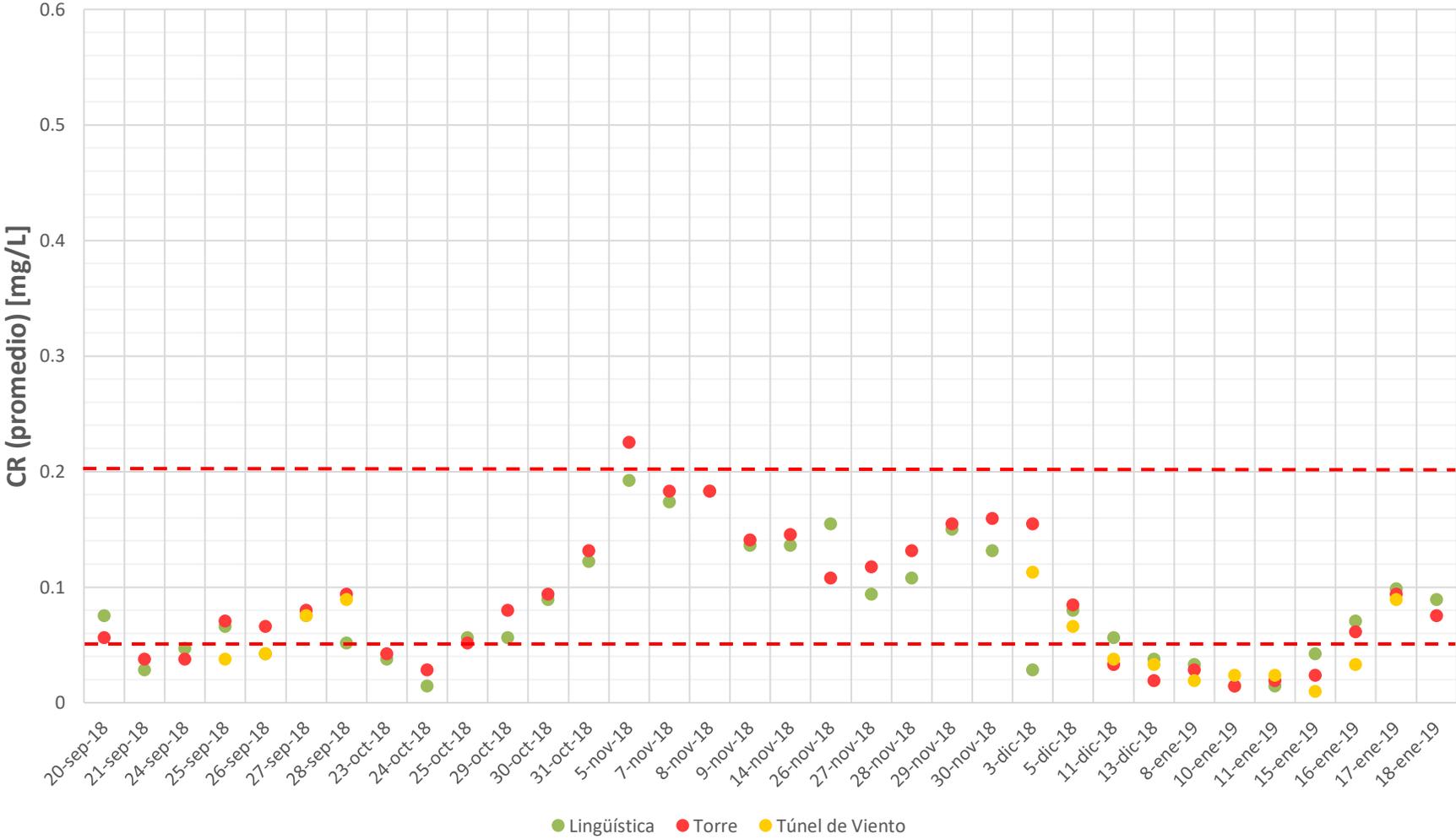


Figura 21. Comportamiento del residual de ozono para los edificios pertenecientes a la Zona 1.



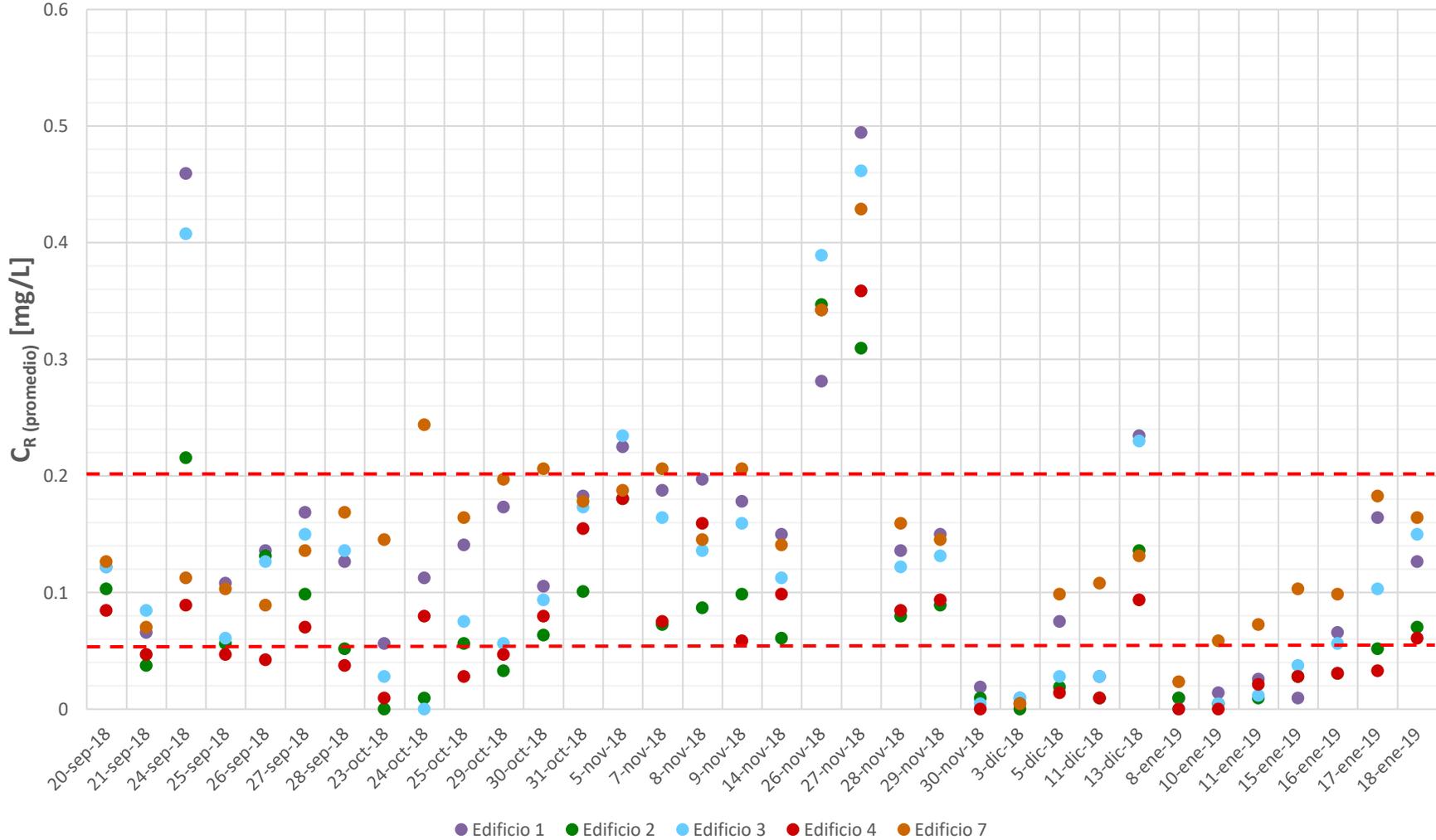
Fuente: Elaboración propia, febrero de 2019.

Figura 22. Comportamiento del residual de ozono para los edificios pertenecientes a la Zona 2.



Fuente: Elaboración propia, febrero de 2019.

Figura 23. Comportamiento del residual de ozono para los edificios pertenecientes a la Zona 3.



Fuente: Elaboración propia, febrero de 2019.

6. Simulación de los Residuales de Ozono en la Red de Distribución con EPANET

Con la finalidad de tener un mayor control de los residuales de ozono en el agua y su distribución en la red, en esta tesina se realizó un ejercicio de simulación con el programa EPANET.

6.1. Descripción básica del programa EPANET

EPANET es un programa computacional que realiza simulaciones en periodos prolongados del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de suministro a presión que difunde la Agencia Norteamericana de Medioambiente, la EPA, por sus siglas en inglés. El programa efectúa un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías, las presiones en los nodos, los niveles en los depósitos y la concentración de las especies químicas presentes en el agua, a lo largo del periodo de simulación discretizado en múltiples intervalos de tiempo (Rossman, 2001).

En otras palabras, EPANET es una herramienta de investigación para mejorar el conocimiento sobre: el avance y destino final de las diversas sustancias transportadas por el agua, el diseño de programas de muestreo, la calibración de modelos hidráulicos, el tiempo de permanencia (o envejecimiento) del agua, las reacciones que tienen lugar tanto en el seno del agua como en las paredes de las tuberías, entre otras (Rossman, 2001).

Algunas de las características principales que considera EPANET para modelizar una red se mencionan a continuación:

- No hay límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesarse
- Contempla pérdidas de carga por fricción que incluyen pérdidas menores o por accesorios.
- Permite considerar diferentes consumos en los nodos, cada uno con su propia curva de modulación o patrón de demandas.
- Admite establecer una fuente de calidad del agua que entra al sistema, es decir una concentración base.
- Permite incluir un patrón de calidad que hace variar la concentración de la fuente con el tiempo.
- Modeliza el avance y destino final de sustancias reactivas cuya concentración o bien crece en el tiempo (p. ej. los subproductos derivados de la desinfección) o bien decrece (p. ej. el cloro u ozono residual).

Gracias a todas estas características, EPANET puede modelizar la concentración del ozono residual que llega a los edificios del Instituto de Ingeniería que son abastecidos del agua ozonizada.

6.2. Modelo hidráulico de la red de distribución

Para evaluar la concentración del ozono residual en el agua de la red, EPANET requiere que sea alimentado con información hidráulica para efectuar la calibración del modelo, entre la cual se encuentra:

- Longitud, diámetro, trayectoria y rugosidad absoluta de las tuberías
- Cota de los nodos
- Curva de modulación (o patrón de demandas) y demanda base de los nodos, es decir, los edificios.
- En el caso de tenerlo, un archivo con datos de calibración de distinta índole (demanda, altura, presión, calidad, caudal o velocidad).

Las cotas de cada nodo se tomaron del plano topográfico proporcionado por el grupo de Balance Hidráulico de PUMAGUA.

La información acerca de la demanda base y el patrón de demandas de cada edificio, fue también proporcionada por el Grupo de Balance Hidráulico, la cual se basa en la medición de los caudales de cada edificio entre los años 2013 y 2016. No obstante, ya que no se cuentan con mediciones del caudal de los edificios 5B y 7, se realizó una estimación de la dotación de agua y su demanda con base en el gasto medio de un edificio con condiciones similares en instalaciones hidráulicas y sanitarias.

El edificio 7 posee instalaciones similares con el edificio 4, ya que ambos albergan laboratorios con capacidades similares, además de tener áreas de construcción similares entre sí. Por lo tanto, el proceso para la obtención del gasto medio del edificio 7 es el siguiente:

$$Q_{medio} = \frac{(Dotación)(Población)}{86,400}$$
$$Q_{medio E-4} = 0.0993 = \frac{(Dotación)(55)}{86,400}$$

$$Dotación = \frac{(84,400)(0.0993)}{55} = 155.99 \text{ L/hab/día}$$

$$\therefore Q_{medio E-7} = \frac{(155.99)(4)}{86,400} = 0.0072 \text{ L/s}$$

Así mismo, el cálculo para la obtención de la demanda base del edificio 5B se realizó a partir del gasto medio del edificio 2, ya que ambos edificios albergan oficinas y cubículos, además de tener áreas de construcción similares entre sí. Por lo tanto, el proceso para la obtención del gasto medio del edificio 5B es el siguiente:

$$Q_{medio} = \frac{(Dotación)(Población)}{86,400}$$

$$Q_{medio E-2} = 0.0208 = \frac{(Dotación)(60)}{86,400}$$

$$Dotación = \frac{(84,400)(0.0208)}{60} = 29.95 \text{ L/hab/día}$$

$$\therefore Q_{medio E-5B} = \frac{(29.95)(20)}{86,400} = 0.007 \text{ L/s}$$

En cuanto a los patrones de las demandas de los edificios 5B y 7, se consideraron que éstas son similares a los edificios que tienen similitud en sus instalaciones, es decir, se consideró que el patrón de demandas del edificio 2 y 5B son iguales, así como los patrones de los edificios 4 y 7.

Por otra parte, el diámetro, trayectoria y material de las tuberías que componen a la red, fue información obtenida a partir de recorridos de campo en el sitio, es decir, realizando inspecciones en los distintos registros de agua potable.

Para la obtención de la longitud de las tuberías se realizó un levantamiento con un receptor GPS que permitió posicionar geográficamente cada nodo de la red y con ello calcular la longitud de cada tubería.

En cuanto al archivo de calibración, se agregó un documento con extensión .TXT con lecturas de las presiones de los manómetros instalados a lo largo de la red de distribución, que permitieron identificar la presión a la que está sujeta cada edificio.

Figura 24. Manómetro adaptado para la medición de presiones en los edificios.



Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que además de esto, se realizaron mediciones de presiones en algunos edificios que no cuentan con un manómetro en los registros construidos previo a la entrada del agua al edificio. Estas mediciones se efectuaron con un manómetro adaptado que permite conectarlo en tarjas con llaves de nariz (ver **Figura 24**).

Para que el archivo de calibración de presiones pueda ser interpretado por EPANET, éste debe guardar cierto formato que se puede observar en la **Figura 26**.

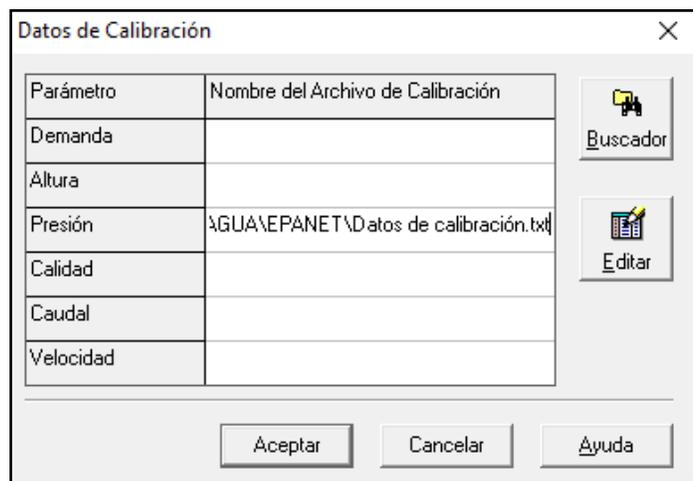
Figura 26. Formato de entrada del archivo de calibración con extensión de archivo .TXT

```

;Datos curva calibración en puntos
de la red. Red del IINGEN.
;Location      Time      Value
;-----
E-1           12:37      42.00
E-2           12:43      41.00
E-3           12:49      42.00
E-4           14:56      41.00
E-5           14:30      40.00
E-5B          15:00      40.00
E-7           12:15      41.00
E-8           13:00      38.00
E-13          13:28      40.00
    
```

Fuente: Elaboración propia, enero 2019.

Figura 25. Menú "Datos de Calibración" en EPANET.



Fuente: Elaboración propia, enero 2019.

La calibración de presiones se realiza mediante el menú *proyecto (project)*, se ingresa en la opción *datos de calibración (calibration data)* y se carga el archivo de calibración en el renglón correspondiente, que para este caso se realizó con presiones (ver **Figura 25**).

Habiendo ingresado toda esta información al software, se procedió a iniciar el análisis o simulación para verificar que las presiones en los nodos y las velocidades en las tuberías sean las adecuadas.

Las presiones calculadas en los edificios son muy parecidas a las presiones medidas en sitio. Esto se puede corroborar mediante el *Informe de Calibración (calibration report)* que se puede ver en la **Figura 27**. Este informe se obtiene mediante el menú *informe (report)* y se ingresa en la opción *de calibración (calibration)*.

En este *Informe de Calibración* se puede apreciar la lista de presiones medidas en sitio (observadas) y las calculadas por el software, además del coeficiente de correlación entre las presiones. Este coeficiente es igual 0.82, lo que significa que los valores calculados y medidos tienen un alto grado de relación entre sí.

El equilibrio de presiones se puede observar en la **Figura 28** que se analizó a las 3 p.m. que es la hora de mayor demanda de agua.

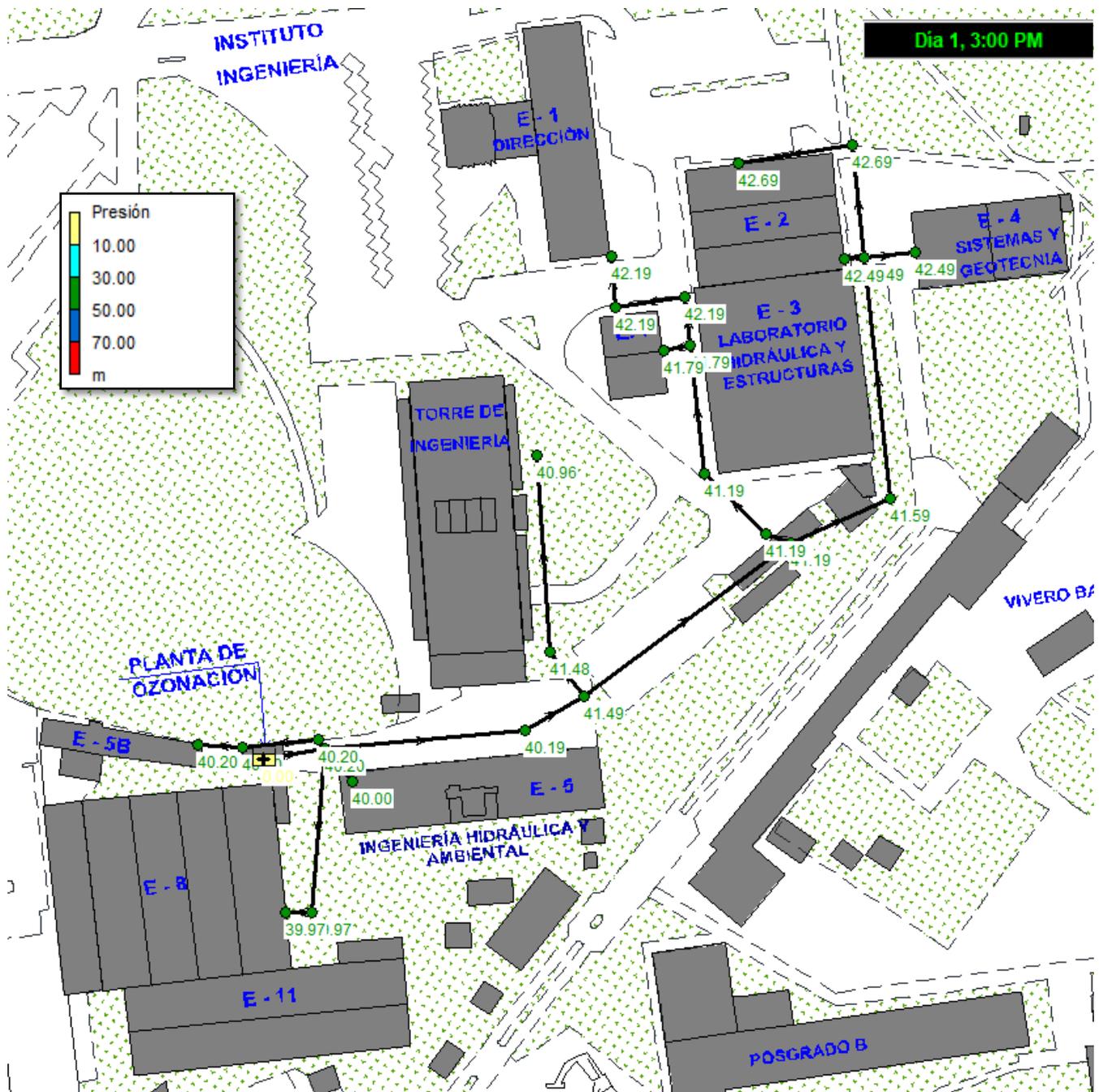
Figura 27. Estadísticas de calibración para presión.

Localización	Nº	Observ Obs	Calc Media	Media Media	RMS Error	Error Error
E-1	1	42.00	42.18	0.180	0.180	
E-2	1	41.00	42.69	1.689	1.689	
E-3	1	42.00	42.49	0.489	0.489	
E-4	1	41.00	42.49	1.490	1.490	
E-5	1	40.00	40.00	0.003	0.003	
E-5B	1	40.00	40.20	0.196	0.196	
E-7	1	41.00	41.78	0.783	0.783	
E-8	1	38.00	39.98	1.975	1.975	
E-13	1	40.00	40.96	0.965	0.965	
Sistema de Red	9	40.56	41.42	0.863	1.097	

Correlación entre los Términos: 0.820

Fuente: Elaboración propia, enero 2019.

Figura 28. Presiones en el modelo de EPANET a las 3:00 p.m.



Fuente: Elaboración propia, febrero 2019.

Por otra parte, de acuerdo con el Libro 4 *Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado* del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS), las velocidades máximas permisibles oscilan entre 5.0 y 3.0 m/s para los distintos materiales de tubería de agua que se emplean, mientras que la velocidad mínima permisible es de 0.30 m/s.

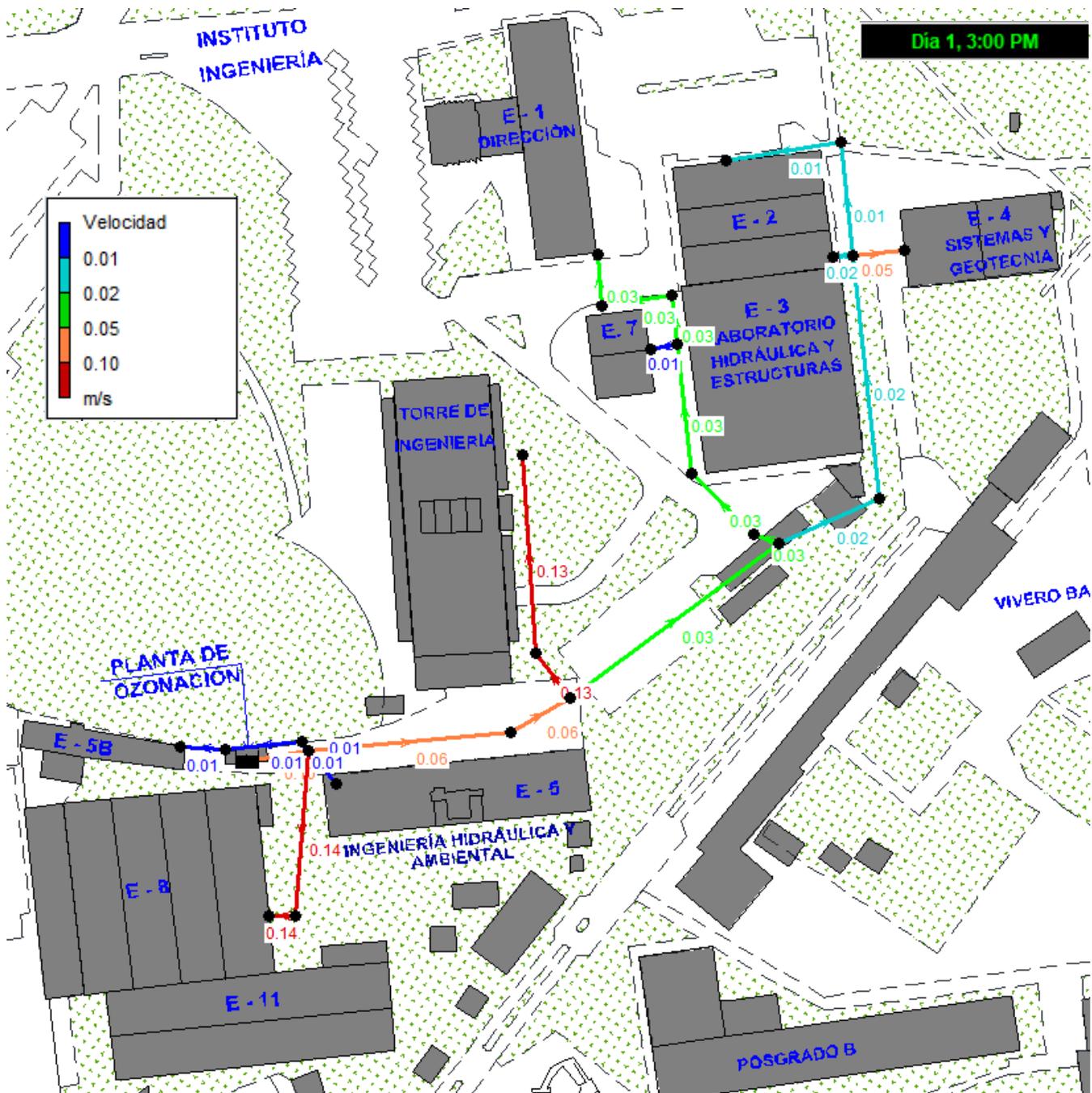
La velocidad máxima será aquella con la cual no debe ocasionarse erosión en las paredes de las tuberías, mientras que la velocidad mínima de escurrimiento se fija para evitar la precipitación de partículas de arrastre en el agua (CONAGUA, 2016, p.19).

Al realizar la simulación de la red de distribución, se puede apreciar que en todo el tiempo de simulación (24 horas), incluso en la hora de mayor demanda (3 p.m.) la velocidad permanece por debajo de 0.15 m/s (ver **Figura 29**).

No obstante, se sabe de antemano que en el agua que circula a través de la red de distribución del Instituto de Ingeniería, no fluyen, o bien fluye una mínima cantidad de partículas suspendidas debido al origen del agua (agua subterránea) y el proceso de potabilización que se lleva a cabo en el sistema de ozonización.

Por esta razón, aunque hidráulicamente las presiones cumplan y las velocidades no, el modelo es válido para realizar una simulación de los residuales de ozono en los distintos edificios que son abastecidos de agua ozonizada.

Figura 29. Velocidades en el modelo de EPANET a las 3 p.m.



Fuente: Elaboración propia, febrero 2019.

6.3. Modelo de los residuales de ozono

EPANET cuenta con una herramienta que es capaz de modelizar la evolución de las concentraciones de cualquier sustancia que ingresa a la red de agua potable; la única restricción es que es aplicable a compuestos con cinética de orden cero y de orden uno.

Para la modelación de las concentraciones residuales en la red, se debe ingresar en el software el valor de la constante de degradación de la sustancia, el nombre de ésta, el orden de reacción y la dosis inicial.

En el caso del ozono, la ecuación de primer orden se estimó poniendo una muestra de agua tomada del dren del sensor en un frasco de vidrio cerrado, y analizando la concentración residual del agua en intervalos de 10 minutos, durante un tiempo de permanencia de 50 minutos.

Una vez que se tienen medidas las concentraciones a lo largo del tiempo, se hace un gráfica del logaritmo del cociente de la concentración medida entre la concentración inicial del ozono transferido al agua problema en función del tiempo de reacción. Se ajusta una ecuación de regresión lineal a los puntos arriba de un minuto de tiempo de reacción (no se toma en cuenta la concentración antes del primer minuto de reacción ya que la descomposición del ozono en este tiempo se comporta de manera acelerada por cuestiones de mezclado y reacciones iniciales entre el ozono y el agua) de la siguiente forma:

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = k(t) + b$$

Donde:

C_t : concentración residual del ozono medida al tiempo t (mg/L)

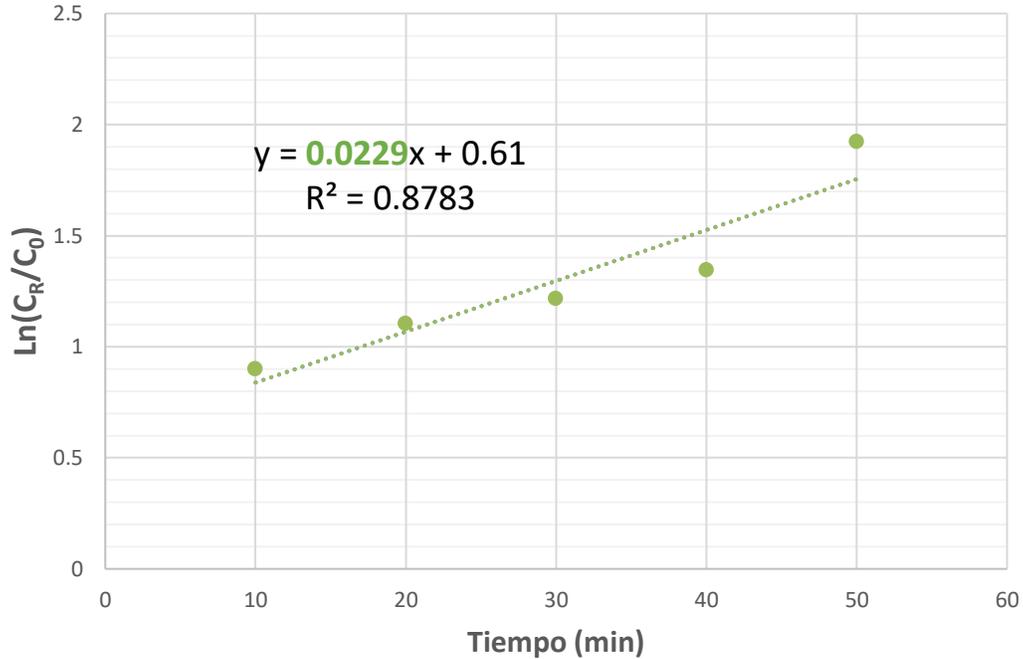
C_0 : concentración residual del ozono medida al tiempo cero (mg/L)

t : tiempo de reacción (min)

k : pendiente de la ecuación de regresión y constante de primer orden de descomposición de ozono (min^{-1})

b : ordena al origen

Figura 30. Gráfica de la ecuación de primer orden del ozono



Fuente: Elaboración propia, marzo 2019.

Tabla 7. Datos para estimar la constante de descomposición.

Cr (ppm)	Tiempo (min)	Ln (C_R/C_0)
0.253	0	0.000
0.103	10	0.899
0.084	20	1.103
0.075	30	1.216
0.066	40	1.344
0.037	50	1.922

Fuente: Elaboración propia, marzo 2019.

Como se puede observar, los datos experimentales se ajustan a la ecuación con una alta correlación (0.87), entonces se puede suponer que la descomposición del ozono es de primer orden con respecto a la concentración inicial.

Por otra parte, Nava R. y Olivares G. (2011), calcularon la constante de descomposición del ozono para el agua proveniente del pozo "multifamiliar" que es igual a -0.0635 min^{-1} . Con este valor

puede validarse el resultado obtenido ya que la constante de descomposición encontrada para esta tesis, se calculó para el agua clorada que llega al sistema de ozonización y que ya cubrió su demanda de ozono, por lo que la constante de esta tesis es menor a la calculada para el pozo multifamiliar.

Para ingresar en el programa el valor de la constante de degradación y el orden de reacción, se realiza mediante la ventana llamada "visor", se ingresa en la pestaña de opciones y se selecciona opción de *calidad*.

Propiedad	Valor
Orden Reacción Flujo	1
Orden Reacción Pared	Cero
Coef. Global Flujo	-0.0229
Coef. Global Pared	0
Concentración Límite	0
Coef. Correlación Pared	0

Propiedad	Valor
Parámetro	Ozono
Unidades Densidad	mg/L
Difusividad Relativa	0
Nudo Procedencia	Planta
Tolerancia de Calidad	0.01

Posteriormente, en la misma pestaña de opciones, se selecciona la opción de *reacciones*, se ingresa el nombre del compuesto (ozono) y se establece el nodo de procedencia que es el embalse que nombramos "Planta".

En lo que respecta a la dosis inicial, se optó por utilizar el "editor de fuentes de calidad", que es un cuadro emergente utilizado para describir la calidad de la fuente del caudal en un nodo específico.

EPANET describe una "fuente de calidad del agua" como un nodo por el que entra al sistema la calidad de un caudal externo. Pudiendo ser una planta de tratamiento, un pozo de cabecera o una intrusión contaminante no deseada.

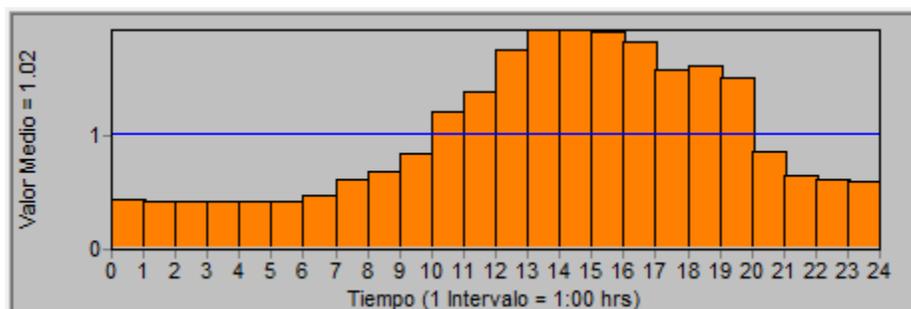
Con esta fuente de calidad se puede hacer variar una fuente de calidad asignándole un patrón de tiempos, similar a un patrón de demandas. EPANET puede modelizar los siguientes tipos de fuentes:

- Una **fuerza de concentración** fija la concentración de cualquier caudal entrante a la red, como el caudal de un depósito o de una demanda negativa situada en un nodo.
- Una **fuerza de aporte másico** añade una masa fija de caudal entrante al nodo desde otro punto de la red.
- Un **aporte a caudales entrantes** añade una concentración fija resultante de la mezcla de todos los caudales entrantes al nodo desde cualquier punto de la red.
- Una **concentración fija a la salida** fija la concentración de cualquier caudal que deja el nodo (mientras la concentración de todos los caudales entrantes al nodo está por debajo de este primero)

Para modelizar las variaciones de las concentraciones residuales de ozono en los edificios, se estableció una fuente de calidad en el embalse del tipo **fuerza de concentración**, en la que se asignó una concentración de 0.07 mg/L como calidad de fuente y que puede modificarse para fines de análisis.

Así mismo, el patrón de tiempo que se asignó se calculó basados en el caudal neto entrante que registra el embalse del modelo, es decir el sistema de ozonización. Se corrió el análisis del modelo, se registraron los caudales netos entrantes en las diferentes horas del día para obtener el gasto medio y se calcularon los coeficientes de variación horaria para construir el patrón de tiempo, similar a un patrón de demandas.

Figura 31. Patrón de tiempo para el sistema de ozonización.



Fuente: Elaboración propia, febrero 2019.

Para ingresar la calidad de la fuente y el establecer el patrón de tiempo se realiza a través del embalse, dando clic derecho sobre él e ingresando los datos correspondientes en el editor de fuente.

Propiedad	Valor
*ID Embalse	Planta
Coordenada-X	2713.21
Coordenada-Y	7698.22
Descripción	
Etiqueta	
*Altura Total	2322
Patrón de Altura	
Calidad Inicial	
Fuente de Calidad	0.07
Caudal Neto Entrante	-0.18
Cota	2322.00
Presión	0.00
Calidad	0.00

Editor de Fuente en el Nudo Planta [X]

Calidad de Fuente:

Patrón de Tiempo:

Source Type:

- Concentración
- Aporte Másico
- Concentración fija a la salida
- Aporte a caudales entrantes

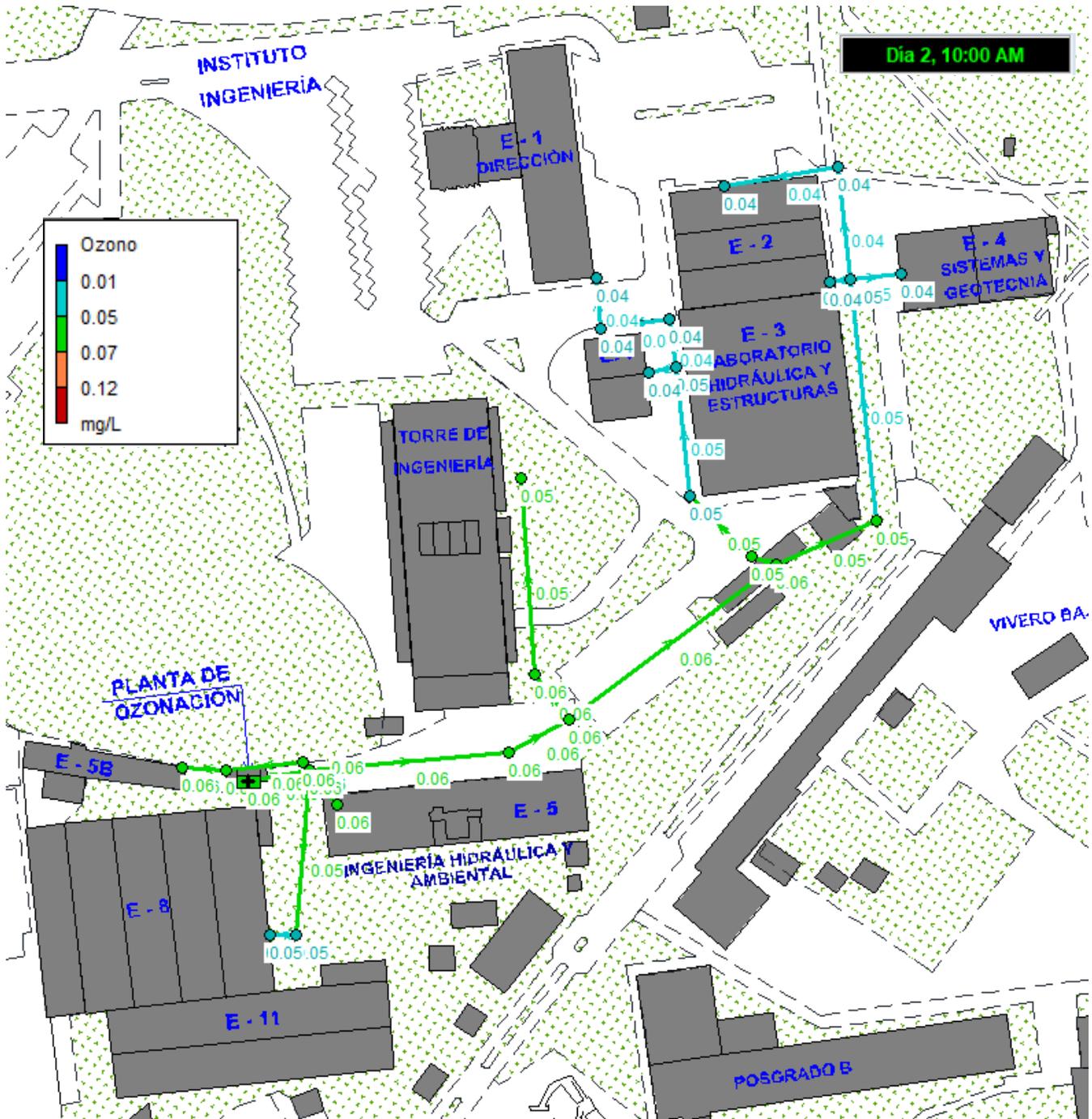
6.4. Resultados y su análisis

Para ejecutar la simulación del modelo de EPANET, se eligió un periodo de análisis de 2 días discretizado en intervalos de tiempo de 1 hora y se optó por modelizar la concentración residual de ozono tanto en los nodos (edificios), como en las líneas de distribución (tuberías). Cabe destacar que se eligió el periodo de 2 días para comenzar el análisis a las 24:00 horas, ya que a las 0:00 horas la red de distribución se encuentra sin flujo de agua y por lo tanto sin un estado estable de concentración de ozono.

A continuación, se muestran capturas de pantalla de la interfaz de la modelización en EPANET, acompañada de curvas de evolución generadas con el mismo software que permiten representar el progreso de una magnitud con el tiempo, es decir, representar la evolución del ozono en los edificios con el tiempo para el análisis de éste.

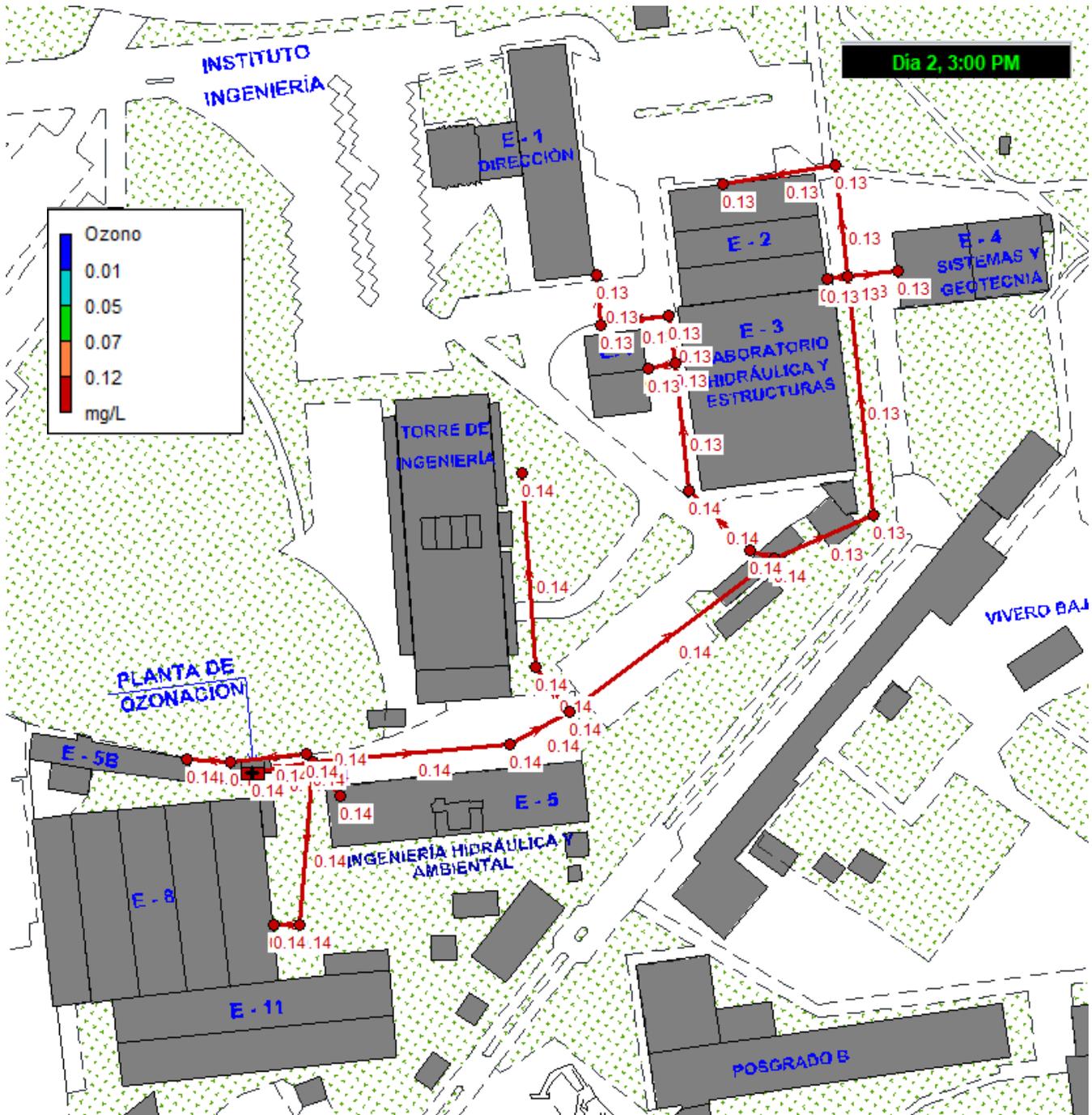
Para obtener dichos gráficos en EPANET, se da clic en la pestaña de *informe*, se selecciona la opción de *gráficos*, después se elige la *curva de evolución* como tipo de gráfico, la magnitud a graficar (ozono), y por último, se añaden a la lista de nudos los edificios a representar.

Figura 32. Concentración residual del ozono en el modelo de EPANET a las 10:00 AM



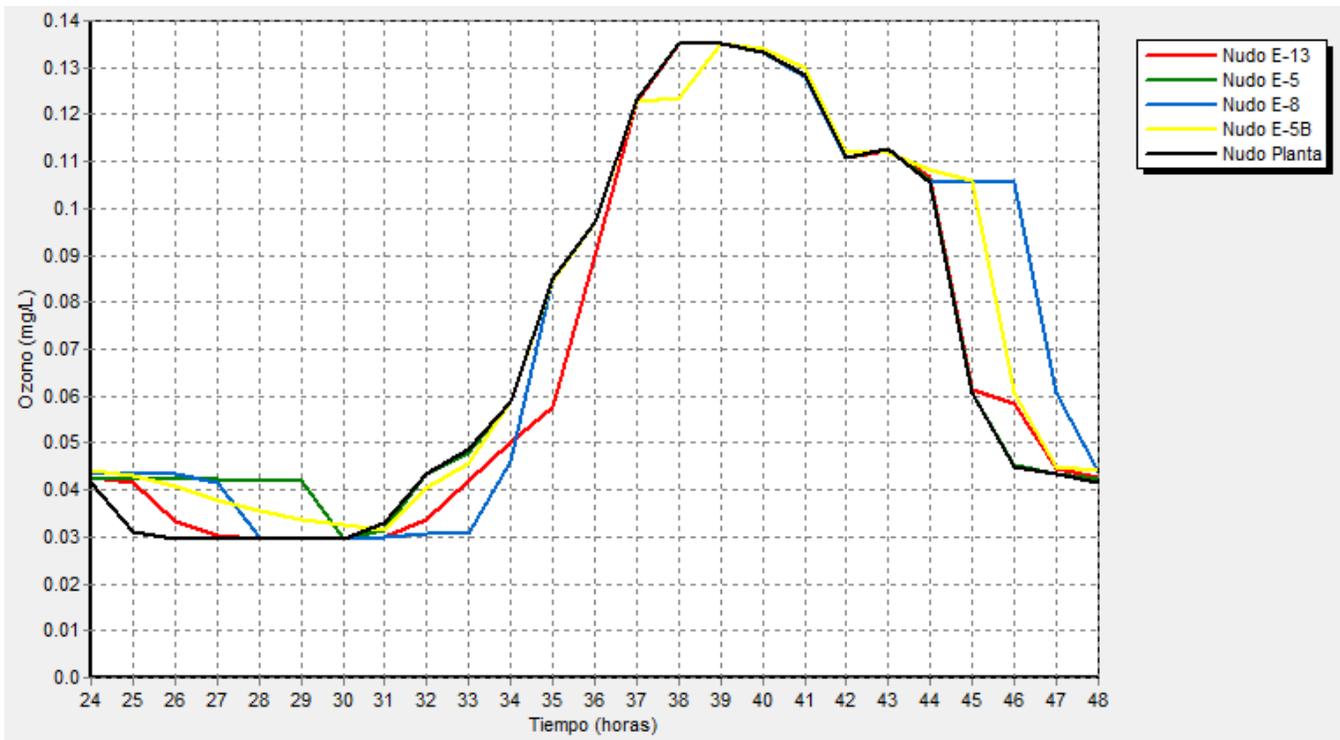
Fuente: Elaboración propia, marzo de 2019.

Figura 33. Concentración residual del ozono en el modelo de EPANET a las 3:00 PM



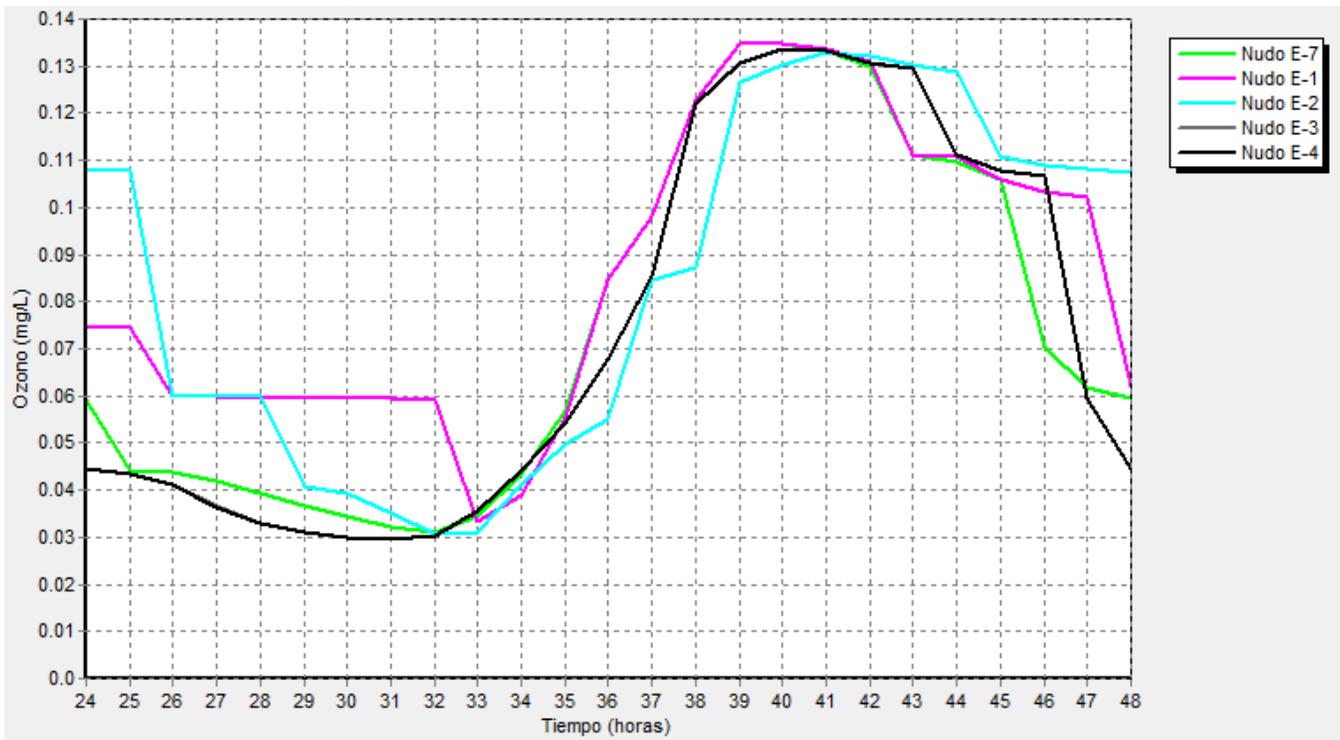
Fuente: Elaboración propia, marzo de 2019.

Figura 35. Curva de evolución del ozono residual en Zona 1



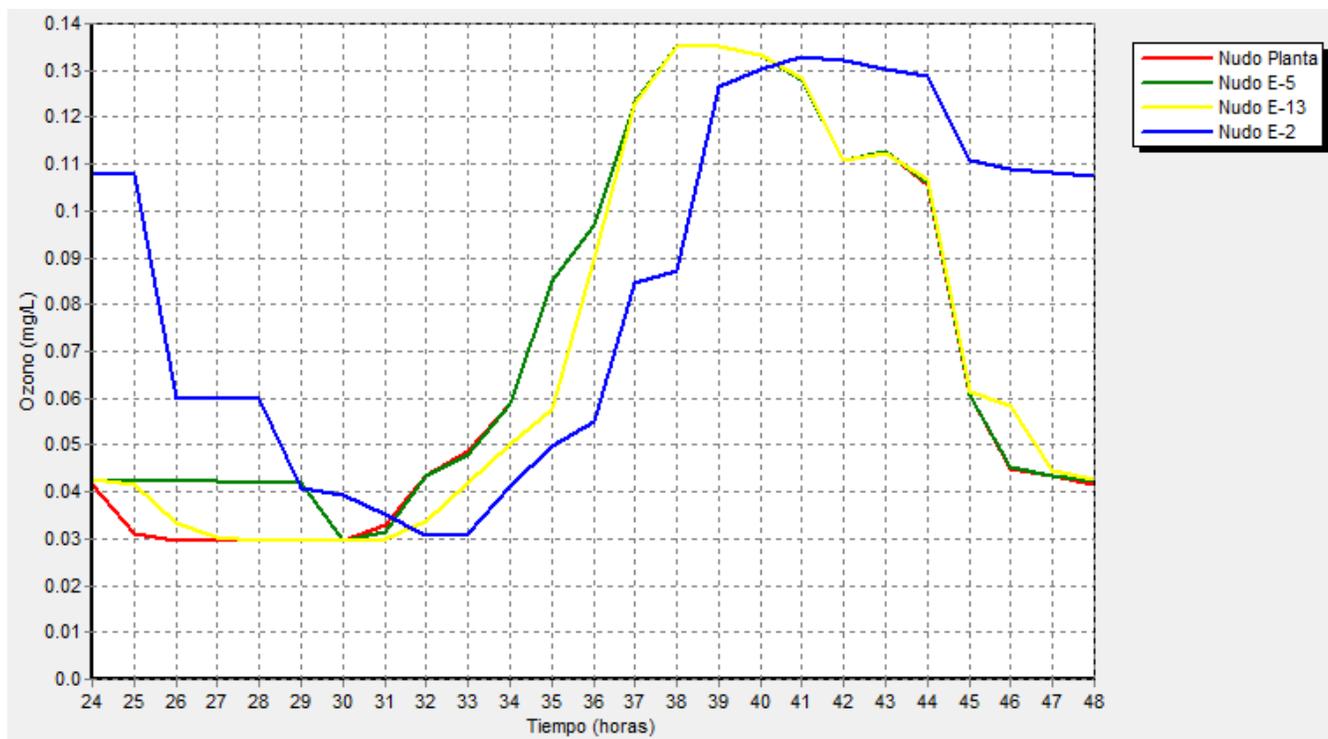
Fuente: Elaboración propia, abril 2019.

Figura 36. Curva de evolución del ozono residual en Zona 2



Fuente: Elaboración propia, abril 2019.

Figura 37. Curva de evolución del ozono residual en Zona 1 y 2



Fuente: Elaboración propia, abril de 2019.

Al analizar las curvas de evolución producto de la modelización de las concentraciones de ozono, se puede observar lo siguiente:

- + La **Figura 35** y **Figura 36** ilustran la similitud de la concentración de ozono entre diversos edificios a lo largo de todo el periodo de simulación. Estos edificios forman parte de las tres zonas con comportamiento similar que se analizó en el capítulo 6.

Estas zonas de comportamiento similar se atribuyen a dos aspectos importantes: 1) la distancia que guardan los edificios con respecto al sistema de ozonización y, 2) al número de personas que trabajan en cada edificio, es decir, al consumo de agua que tiene cada edificio.

- Los edificios de la zona 1 (5, 5B y 8) guardan un comportamiento similar debido a su gran cercanía con el sistema de ozonización, siendo estos los edificios con mayor concentración residual.
- El basamento de la torre y ésta misma (zona 2) guardan un comportamiento casi igualitario que se atribuye a la homogenización que existe en su calidad del agua,

ya que ésta se deposita en una cisterna para después distribuirse. Estas instalaciones tienen una concentración residual menor a los edificios de la zona 1.

- Los edificios 1, 2, 3, 4 y 7 (zona 3) tienen un comportamiento similar atribuible a la lejanía que existe con el sistema de ozonización, siendo éstos los edificios con menor concentración residual del sistema.
- + En contraste con las anteriores figuras, en la **Figura 37** se observa el distinto comportamiento del ozono que tiene un edificio cercano (edificio 5), uno intermedio (edificio 13), un edificio lejano (edificio 2) y la planta de ozonización para su punto de comparación.

En esta figura también se aprecia el tiempo de respuesta que presenta el edificio cercano, el intermedio y el lejano cuando la planta de ozonización presenta un cambio en la concentración residual de ozono. En tanto el edificio cercano guarda un comportamiento casi igualitario con la planta durante todo el periodo, el edificio intermedio tarda en promedio una hora en alcanzar la misma concentración que la planta y el edificio lejano tarda en promedio dos.

- + Los valores registrados de las concentraciones de ozono a lo largo de todo el periodo de simulación oscilan entre 0.03 – 0.14 mg/L, similar al rango de valores que fueron medidos en los edificios cuando la calidad de fuente o dosis inicial es de 0.07 mg/L (valor de consigna en el panel de control).
- + El comportamiento de las concentraciones residuales de ozono cambia de acuerdo con el consumo de agua que está sujeto a las horas del día. En las primeras horas del día (5:00 am), la concentración de ozono promedio en la red se encuentra en 0.03 mg/L, 4 décimas por debajo del valor de consigna; cuando la gente ya se encuentra en sus lugares de trabajo (10:00 am), la concentración promedio se encuentra en 0.06 mg/L; un par de horas antes de la hora de comida (1:00 pm), la concentración promedio es de 0.11 mg/L, ligeramente por arriba del valor de consigna; a la hora de mayor consumo de agua por ser la hora de comida (3:00 pm), la concentración promedio se encuentra en 0.135 mg/L; para cuando la gente comienza a retirarse de los edificios (6:00 pm), la concentración promedio se encuentra en 0.12 mg/L; y por último, a media noche, la concentración promedio es 0.04 mg/L.

- + El comportamiento anteriormente descrito puede establecerse como la pauta que usualmente ocurre en los días de trabajo normal debido a la gran similitud que tienen los valores de concentración medidos en laboratorio y los calculados por el software, así como los límites superior e inferior entre los cuales se comportan dichas concentraciones cuando la calidad de fuente es de 0.07 mg/L.
- + La modelización de las concentraciones de ozono puede ayudar a tomar decisiones futuras para modificar el valor de consigna con el que opera el sistema de ozonización, ya que de inmediato se pueden saber las concentraciones que se presentarán en el sistema. La finalidad de modificar el valor de consigna es para adaptarse a los cambios en el consumo de agua provocados por el incremento o decremento en la población de los edificios en tiempo de vacaciones, días festivos, etc.

7. Mantenimiento

7.1. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo o rutinario es el destinado a la conservación de los componentes del sistema mediante el monitoreo, limpieza, revisión, prueba y adecuación periódica que garanticen su buen funcionamiento y fiabilidad.

Entre las principales actividades se encuentran: la calibración del sensor de ozono (en cero y en progreso), el cambio de membrana y reemplazo de solución electrolítica; la limpieza general de la instalación, el monitoreo del residual de ozono y la revisión y registro de los parámetros de operación de los componentes del sistema.

A continuación, se explica el mantenimiento periódico que requiere cada componente del sistema de ozonización.

7.1.1 Filtros de carbón activado de cáscara de coco

El carbón activado vegetal remueve cloro a través de un proceso de oxidación de la superficie del carbón, donde el cloro libre es transformado en cloruro. La dureza y peso específico de este carbón lo hace la mejor opción para la dechloración. Es igualmente útil para la remoción de orgánicos pequeños, ya que la mayor parte de sus poros son de bajo tamaño (Manual del

Usuario del Sistema de Ozonificación). Para evitar la saturación del material filtrante se tiene establecido llevar a cabo retrolavados periódicos. Para nuestro caso, con base en la observación y la experiencia, se ha establecido retrolavar una vez por semana cada filtro.

Por otra parte, la media filtrante tiene un tiempo de vida de aproximadamente 1 año, que es el tiempo en el que se satura por completo el carbón activado. Cumplido este tiempo deberá reemplazarse la media filtrante.

7.1.2 Filtro bolsa de 1 micra

El reemplazo del medio filtrante o bolsa también está sujeto a una caída de presión en el sistema y se prevé una vida media de operación de 1 año aproximadamente.

7.1.3 Concentrador de oxígeno

Es importante realizar una limpieza semanal del filtro de partículas gruesas (ver **Figura 38**) ya que éste elimina las partículas en suspensión del aire de la habitación que son arrastradas a través del aire que ingresa en la unidad. Bastará con realizar una limpieza con agua de la llave para remover el polvo atrapado. Se debe tener cuidado de: 1) no exprimir el filtro para evitar romper sus fibras y dejar secar; y 2) volver a colocar seco el filtro después de su limpieza.

Además de lo anterior, se debe verificar que el equipo proporciona oxígeno con un flujo entre 6-8 L/min, y una presión entre 15-20 psi para la correcta operación del generador de ozono.

7.1.4 Generador de ozono

Al igual que en el concentrador de oxígeno, se deberá realizar una limpieza semanal de los 2 filtros que permiten la entrada y salida, respectivamente, de aire de enfriamiento del generador (ver **Figura 46** y **Figura 47**). Cabe mencionar que se deben tener los mismos cuidados que con el filtro del concentrador de oxígeno. El equipo de generación de ozono debe mantener una presión de operación entre 10-12 psi, evitando que supere 12 psi de presión para su adecuado desempeño.

Figura 38. Filtro de partículas gruesas del concentrador de oxígeno.



Fuente: Elaboración propia, febrero de 2019.

Por otra parte, el proveedor recomienda que se realice un mantenimiento a las 8,000 horas de servicio del equipo, es decir, a los 334 días de operación.

7.1.5 Tanque de contacto

En ciertas ocasiones la válvula de ventilación de ozono además de liberar el gas ozono que no fue transferido al agua, deja pasar una pequeña cantidad de agua que es expulsada de la tubería que conduce al destructor de ozono a través de una derivación. El agua al ser expulsada cae en un costado del tanque de contacto, provocando manchas derivadas de las sales que contiene el agua.

Por ello se deberá limpiar el tanque de contacto con algún ácido suave que remueva las manchas y algún producto especial para material de acero inoxidable que le proporcione brillo.

Se recomienda que esta tarea se realice una vez al mes.

7.1.6 Calibración del sensor de ozono disuelto

Debido a que no existen estándares de ozono, el sensor se calibra contra los resultados de un ensayo colorimétrico de laboratorio con agua del proceso, es decir, agua ozonizada.

Existen dos tipos de calibración del sensor: la calibración en cero y la calibración en progreso. La calibración en cero es necesaria porque aun cuando no hay ozono en la muestra, el sensor genera una pequeña corriente llamada residual o cero, el analizador compensa dicha corriente restándola de la corriente medida antes de convertir el resultado a un valor de ozono. Cabe mencionar que el sensor de ozono genera una corriente que es directamente proporcional a la concentración de ozono en el agua. Esta calibración se debe realizar siempre que se reemplace el sensor de ozono o la solución electrolítica.

La calibración en progreso tiene como propósito que el analizador establezca la pendiente de la curva de calibración. Esta calibración se realiza mientras el sistema de ozonización está en funcionamiento y se tiene una concentración residual de ozono en el agua.

Figura 39. Tubería que conduce al destructor de ozono y derivación para expulsar agua.



Fuente: Elaboración propia, febrero de 2019.

La curva de calibración es un método muy utilizado en química analítica para determinar la concentración de una sustancia (analito) en una disolución. El método se basa en la relación proporcional entre la concentración y una determinada señal analítica (absorbancia). Conociendo esta relación, será posible conocer la concentración en una muestra dada mediante la medida de esa señal. La relación concentración – señal se suele representar en una gráfica a la que se le conoce como curva de calibración.

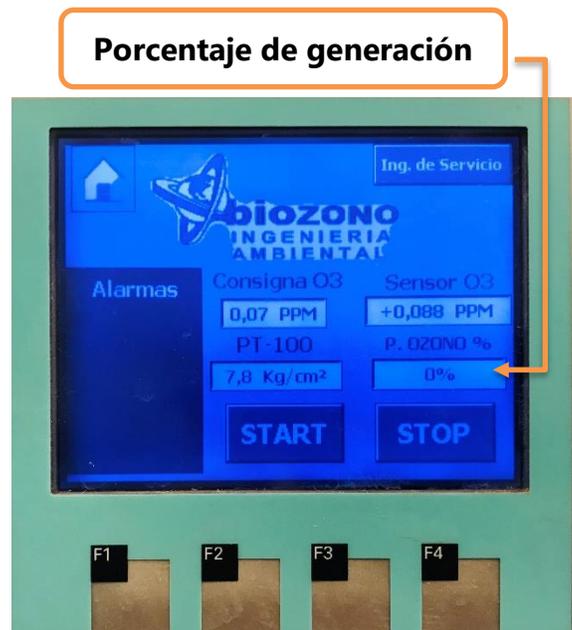
En la práctica se determinó que para realizar una calibración exitosa, la toma de muestra de agua para medir la concentración de ozono residual debe realizarse cuando la producción de ozono en fase es cero, es decir cuando en la pantalla del tablero de control marca momentáneamente 0% (ver **Figura 40**).

Lo anterior permite que la concentración de ozono en el agua sea más estable. Si la medición se realiza cuando el generador está produciendo ozono, la medición resulta más alta que la registrada en el monitor de ozono, debido al tiempo que tarda en realizar una lectura el sensor.

Habiéndose cerciorado de esto, se toma nota de la concentración de ozono disuelto registrada en el monitor y al mismo tiempo se toma una muestra de agua en el dren del sensor. Posteriormente se procede a realizar la medición de la concentración de ozono de acuerdo al procedimiento del método de índigo.

Cabe mencionar que es muy importante tomar nota de la concentración de ozono registrada en el monitor, **antes** de desconectar el desagüe del sensor y tomar la muestra, ya que, al conectar y desconectar la tubería de desagüe del sensor, se producen ligeras variaciones en la presión de dicha tubería que ocasionan fluctuaciones en la concentración de ozono registrada en el monitor.

Figura 40. Panel de control en condiciones de no generación de ozono.



Fuente: Elaboración propia, febrero de 2019.

Una vez calculada la concentración de ozono residual por el método colorimétrico se hace la corrección en el valor de la pantalla. También se deberá medir la concentración residual de ozono en por lo menos dos de los edificios que son abastecidos con agua ozonizada.

Se recomienda que la medición se realice en alguno de los edificios más cercanos al sistema de ozonización (Edificios: 5, 5B, 8 u 11) y en algún otro edificio que se encuentre lo más alejado del mismo sistema (Edificios: 1, 2, 3 o 4). Realizar la medición en uno de los edificios más cercanos y en otro de los más alejados, permitirá analizar el comportamiento general del residual de ozono en todos los edificios.

Habiendo comparado la concentración calculada (a través del método colorimétrico) en el dren del sensor y la registrada por el monitor de ozono, y determinar también la concentración del edificio más alejado y más cercano al sistema, se podrá evaluar si se realiza una calibración en progreso.

Si la concentración del edificio más cercano se encuentra por arriba de 0.2 mg/L, la concentración del edificio más alejado se encuentra por debajo de 0.03 mg/L, y/o el porcentaje de error de la concentración calculada del dren del sensor y la registrada por el monitor de ozono es mayor a 40%, deberá realizarse una calibración en progreso del sensor de ozono disuelto.

Para realizar la calibración (en cero y en progreso) del sensor se puede consultar el anexo "**Procedimiento de calibración de sonda**" o el "Manual de instrucción del monitor de ozono" en la siguiente [liga de enlace](https://www.emerson.com/documents/automation/manual-1056-dual-input-intelligent-analyzer-rosemount-en-68922.pdf) <https://www.emerson.com/documents/automation/manual-1056-dual-input-intelligent-analyzer-rosemount-en-68922.pdf>

Como se mencionó anteriormente, es importante regular el caudal del dren del sensor, ya que en la celda de flujo de éste (ver **Figura 41**) al dejar pasar un volumen de agua, la celda está sujeta a los cambios de presión existentes en la red de distribución debidos a los cambios en el consumo de agua, y, por ende, provocan ligeras intermitencias en el flujo de agua que pasa por el sensor.

Figura 41. Sensor de ozono disuelto y celda de flujo.



Fuente: Elaboración propia, febrero de 2019.

Bastará con regular el flujo una vez por semana; para ello se abrirá la válvula de aguja instalada en la derivación de la tubería que alimenta a la celda de flujo. Se ha observado con la experiencia que mantener un flujo aproximado de 0.5 L/min induce a que no existan fluctuaciones en el registro de la concentración de ozono.

Se recomienda realizar un cambio de membrana y solución electrolítica cada 3 meses. Para realizar el reemplazo de estas piezas se recomienda cerrar la válvula de paso tipo esfera para impedir que el agua corra a través de la celda de flujo y ésta se desperdicie. Esta válvula está colocada en la misma derivación hacia la celda de flujo.

El procedimiento para realizar el reemplazo de la membrana y la solución electrolítica se puede consultar en el anexo “**Reemplazo de la solución electrolítica y membrana del sensor de ozono**” o la “Guía de inicio rápido del sensor de ozono” que se encuentra en la siguiente liga de enlace <https://www.emerson.com/documents/automation/quick-start-guide-499aoz-dissolved-ozone-sensor-rosemount-en-990774.pdf>

7.2. Mantenimiento correctivo

En este tipo de mantenimiento se busca reparar componentes dañados, detectar y reparar fugas y fracturas, etc. En el manual de operación del sistema de ozonización se indica que se debe realizar una evaluación integral de posibles daños en el sistema, y si fuera necesario, restaurar el funcionamiento de algunos equipos o, en su defecto, retirarlos para su revisión.

A continuación, se muestra una lista de las posibles piezas que necesiten este tipo de mantenimiento.

Tabla 8. Piezas generales del concentrador de oxígeno Topaz Pluz.

Descripción	Cantidad (pza.)
Capacitor de Compresor	1
Ventilador	1
Horómetro	1
Rotámetro	1
Tarjeta Electrónica	1
Interruptor On/Off	1
Columnas de Intercambio de Concentración de Oxígeno	2

Fuente: Tecnoagua (Manual de operación).

Tabla 9. Piezas generales del monitor de ozono disuelto.

Descripción	Cantidad (pza.)
Sensor	1
Cable de sensor (10 pies)	1
Cable de sensor (50 pies)	1

Fuente: Tecnoagua (Manual de operación).

Tabla 10. Piezas generales del generador de ozono.

Descripción	Cantidad (pza.)
Ventilador	1

Fuente: Tecnoagua (Manual de operación)

8. Posibles Fallas de Operación y Soluciones

En este capítulo se describen algunas fallas de operación del sistema de ozonización que se presentaron durante el desarrollo de este trabajo y el procedimiento a seguir para solucionarlas.

Problema	Causa Probable	Solución
1. Problemas en la producción de oxígeno		
<p>1.1 Pérdida de presión en el concentrador de oxígeno (<15 psi). Como consecuencia se ve afectado el intervalo de presión de operación del generador de ozono y el del flujo de oxígeno 10-12 psi y 6-8 L/min, respectivamente.</p>	<p>- Posible fuga en las conexiones y válvulas de presión internas del equipo. El desgaste y fallo de válvulas y conexiones suelen ser la causa principal.</p>	<p>Asegúrese de que las conexiones de la tubería de oxígeno, tanto la conexión de salida del concentrador de oxígeno, como la conexión de entrada al generador de ozono, se encuentran bien conectadas.</p> <p>Si los problemas persisten, verifique las conexiones y el estado de las válvulas internas del equipo. Apague el sistema de ozonización. Retire la carcasa del concentrador de oxígeno para su inspección y encienda manualmente el equipo a través del monitor de ozono. La mayoría de las fugas son audibles cuando el área está tranquila. Asegúrese que todas las conexiones operan correctamente. Reemplace la conexión o válvula si es necesario. Encienda el sistema de ozonización y pruebe la operación del equipo. Se recomienda contar con repuestos de conexiones y válvulas para su reemplazo.</p>
	<p>- Posible falla del compresor de aire.</p>	<p>Solicitar apoyo del personal calificado para verificar la correcta operación del compresor.</p>

Problema	Causa Probable	Solución
3. Problemas en la producción de ozono		
2.1 Déficit de la producción de ozono	- Falta de flujo del gas oxígeno de alimentación.	Ajustar el flujo del concentrador de oxígeno entre 6-8 L/min con el rotámetro instalado.
	- Presión del generador fuera de rango.	Ajustar la presión entre 10-12 psi (visible en el manómetro de entrada al generador de ozono Figura 19) con la electroválvula reguladora del gas ozono (ver Figura 17); una presión menor de 6 psi impide la producción de ozono; una presión mayor de 12 psi no es recomendable por seguridad. Esta presión está relacionada con el flujo del gas de alimentación, por lo que se debe buscar un equilibrio entre ambas condiciones de operación.
2.2 Superávit de la producción de ozono	- Falta de flujo de agua en el dren del sensor de ozono.	Abra la válvula de aguja instalada en la derivación de la tubería que alimenta a la celda de flujo y establezca un caudal aproximado de 0.5 L/min.
	- Falta de solución electrolítica (KBr) en el sensor de ozono.	Colmar o reemplazar la solución electrolítica del sensor de ozono. Seguir procedimiento indicado en el anexo Reemplazo de la solución electrolítica y membrana del sensor de ozono

Problema	Causa Probable	Solución
4. Problemas en las lecturas del sensor de ozono		
3.1 Fluctuaciones súbitas de la concentración de ozono en el monitor; lecturas positivas y negativas.	- Falta de solución electrolítica (KBr) en el sensor de ozono.	Colmar o reemplazar la solución electrolítica del sensor de ozono. Seguir procedimiento indicado en el anexo Reemplazo de la solución electrolítica y membrana del sensor de ozono.
	- Ingreso de agua en las tuberías de salida de oxígeno y entrada de ozono al generador (ver Figura 46).	Revisar el estado de las válvulas check en el inyector Venturi y a la salida del gas en el generador de ozono y/o de la electroválvula del generador de ozono. Repare o reemplace la (s) válvula (s).
3.2 Lecturas fuera del rango superior de concentración del proceso (>0.2 mg/L).	- Falta de flujo de agua en el dren del sensor de ozono.	Abra la válvula de aguja instalada en la derivación de la tubería que alimenta a la celda de flujo y establezca un caudal aproximado de 0.5 L/min.

9. Costo de Operación y Mantenimiento

Mediante un analizador de energía y calidad eléctrica Fluke 435 Serie II y su software computacional para el análisis de resultados, se midió el consumo de energía eléctrica del sistema de ozonización. La medición del consumo de energía se realizó en un periodo de 6 días y 22 horas con un intervalo de muestreo a cada 10 segundos, comenzado el lunes 10 de marzo a las 12:34 p.m. hasta el domingo 16 de marzo a las 10:26 a.m. del año en curso.

Como resultado del muestreo energético, el software computacional del analizador nos muestra una gráfica (ver **Figura 43**) donde se representa el consumo de energía instantáneo por fase y el total del sistema eléctrico, en donde este último registra un consumo de energía total de 12 Watts en 10 segundos que dura cada muestreo.

Al final del periodo de muestreo que duró aproximadamente 142 horas, el consumo de energía total fue de 604.408 kW, por lo que el sistema de ozonización consume en promedio **4.26 kWh**. Este consumo incluye el sistema de ozonización completo, es decir, los filtros de carbón activado, el concentrador de oxígeno, generador de ozono, equipo de bombeo y el tablero de control automático.

Por otra parte, el costo ponderado del kWh de acuerdo con la tarifa subsidiada que se le aplica a la UNAM es de \$2.23 (dato proporcionado por la Comisión Federal de Electricidad). Por lo tanto, los consumos y costos de operación del sistema de ozonización en distintos periodos de análisis serían los siguientes:

Tabla 11. Consumos y costos de operación del sistema de ozonización.

CONSUMO ELÉCTRICO	kWh	kWh-día	kWh-semana	kWh-mes (marzo)	kWh-año (2019)
	4.26	102.15	715.07	3,166.76	37,286.01
COSTO	\$9.49	\$227.80	\$1,594.62	\$7,061.87	\$83,147.81

Fuente: Elaboración propia, junio 2019.

Figura 42. Medición del consumo de energía eléctrica del sistema de ozonización.



Fuente: Elaboración propia, marzo 2019.

Ahora bien, el costo de mantenimiento que se realizó en el año en curso significó la cantidad de \$5,440 USD, o bien, **\$ 108,800 MXN** (si se considera un tipo de cambio de 20.00 pesos por dólar) que comprende: 1) servicio de mantenimiento a filtros de carbón activado, que incluye: el reemplazo de 14 pies cúbicos de carbón activado de cáscara de coco, el retiro del material degradado y la calibración de válvulas; 2) servicio de revisión y ajuste de generador de ozono; 3) servicio de mantenimiento al concentrador de oxígeno, que incluye: cambio de desgaste de compresor, verificación de concentración de oxígeno y cambio de glándulas de electroválvula y mofle de salida; 4) viáticos, transporte y hospedaje; 5) solución amperométrica para sensor; 6) kit membrana para sensor de ozono, y; 6) Reemplazo del sello mecánico de electroválvula, válvula check y de aguja, electroválvula y limpieza de celda de flujo, entre otras cosas.

Por lo tanto, el costo de mantenimiento y de operación del sistema de ozonización en distintos periodos de análisis serían los siguientes:

Tabla 12. Costos de mantenimiento y operación del sistema de ozonización

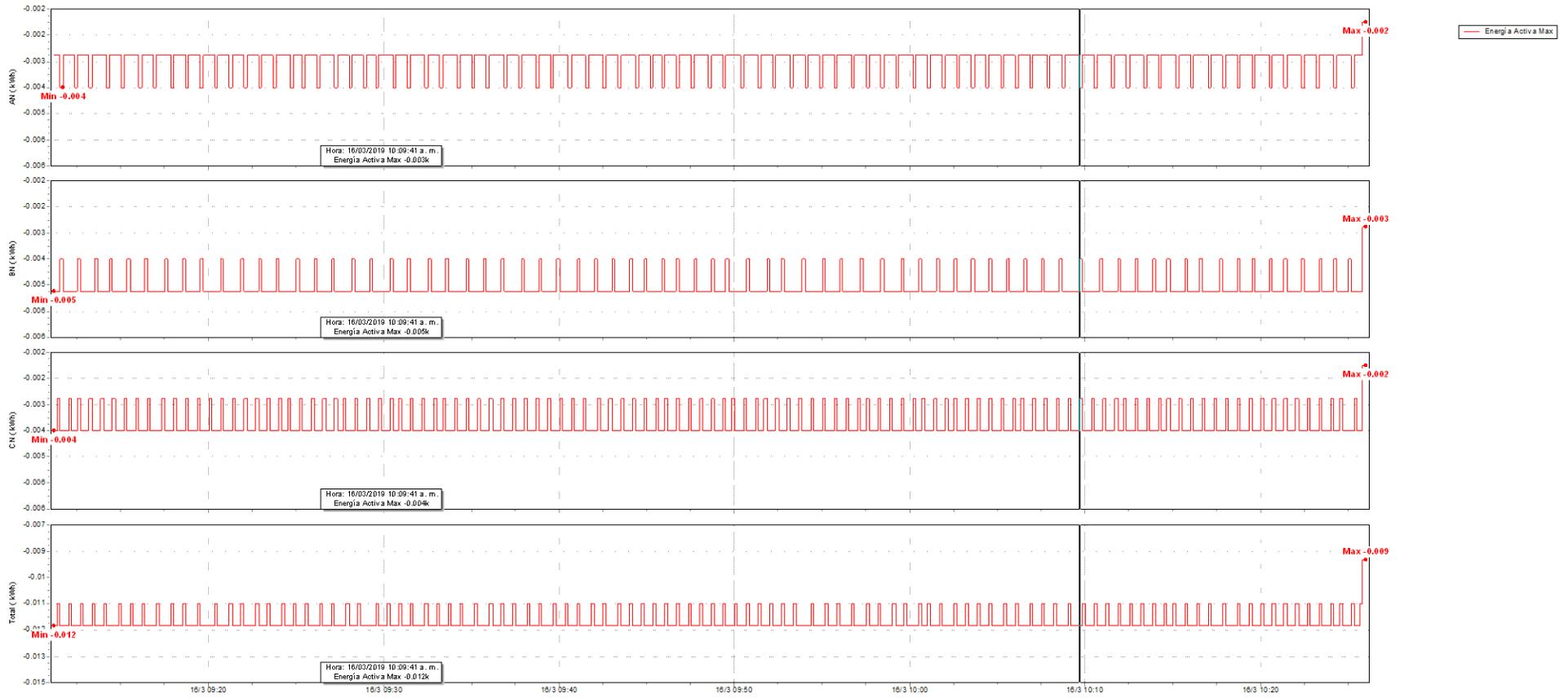
PLAZO	hora	día	semana	mes	año
COSTO DE MANTENIMIENTO	\$12.42	\$298.08	\$2,086.58	\$9,240.55	\$108,800.00
COSTO DE OPERACIÓN	\$9.49	\$227.80	\$1,594.62	\$7,061.87	\$83,147.81
TOTAL	\$21.91	\$525.88	\$3,681.19	\$16,302.42	\$191,947.81

Fuente: Elaboración propia, junio 2019.

Ahora bien, tomando en consideración el calculo que se hizo para obtener el gasto medio del sistema de ozonización al realizar el análisis del modelo hidráulico en EPANET para construir el patrón de tiempo que hace variar la fuente de calidad, se obtuvo que la planta produce 0.404 L/s, o bien, 1,454.4 L/h; con este dato y sabiendo de antemano que una hora de operación del sistema de ozonización, incluyendo su mantenimiento, cuesta \$21.91 MXN, se puede establecer que el costo por litro del agua es de \$0.015 MXN.

Por otra parte, si se considera que el Instituto de Ingeniería proveería de agua a las 1,177 personas (población total de los edificios abastecidos de agua ozonizada) con la compra de garrafones de agua de 20 litros que cuestan en promedio \$40.00, y que una persona necesita beber al menos 2 litros diarios de agua, la institución tendría un ahorro del **88.86%** comparando los \$4,720 que se gastarían al comprar 118 garrafones, contra los \$525.88 que cuesta la operación y mantenimiento del sistema de ozonización en un día.

Figura 43. Gráfica del consumo de energía por fase y total del sistema



Fuente: Analizador de energía Fluke 435 Serie II, marzo de 2019.

10. Conclusiones

Se llevó a cabo con éxito la evaluación de las condiciones operativas del sistema de ozonización en línea que suministra agua potable a diferentes edificios del Instituto de Ingeniería.

A continuación se resumen las condiciones más relevantes:

Se generó un plano arquitectónico de la instalación hidráulica actualizada que abastece a los edificios. Se realizó el inventario de los equipos instalados y se asentó la situación actual de su desempeño. Se generó información que complementa el manual de operación y mantenimiento preventivo, así como un listado de procedimientos correctivos para dar solución a problemas de rutina que se presentan durante la operación, y se generó información detallada de calibración de la sonda de ozono.

Durante un periodo de cinco meses se llevaron a cabo muestras de agua y análisis de ozono residual en nueve puntos de consumo, lo que permitió determinar experimentalmente el comportamiento de las concentraciones de ozono en los distintos edificios que son abastecidos con agua ozonizada. Los edificios más cercanos (5B, 8, 5 y 13) guardan un comportamiento casi igualitario con el sistema de ozonización, siendo estos los edificios con una concentración de ozono más alta que el resto; los edificios más lejanos (1, 2, 3, 4 y 7) tienen la concentración más baja de los edificios. Además, se asentaron gráficamente los límites superior e inferior de la concentración de ozono medidos en los distintos edificios.

Se logró construir un modelo en EPANET que permite simular y describir el comportamiento de las concentraciones residuales de ozono en el agua de la red de distribución, haciendo variar el valor de consigna (0.07 mg/L) establecido en el sistema de ozonización. Este modelo es consistente con los resultados experimentales ya que el rango de valores de la concentración de ozono en el que oscilan es el mismo (0.3 – 0.14 mg/L).

Las curvas de evolución generadas a partir del software de EPANET ratifican el comportamiento establecido experimentalmente. Las gráficas evidencian que existen zonas con un comportamiento similar con respecto a la concentración de ozono residual. Además, muestran el tiempo de respuesta que tardan los edificios en alcanzar la misma concentración de ozono que el sistema de ozonización.

Se determinó un costo anual de operación y mantenimiento del sistema de \$192,000.00 MXN, y un costo equivalente por litro de agua producido de \$0.015. Se estima que se tendría un ahorro aproximado del 89% en comparación con la compra de agua embotellada para consumo.

Recomendaciones

Para mejorar los resultados del modelo, se recomienda incrementar la información de datos de consumos de todos aquellos edificios abastecidos con agua ozonizada para determinar la demanda base y patrón de demandas, además de ampliar la red de monitoreo para analizar la concentración de ozono residual en aquellos edificios faltantes.

Dado que se encontraron velocidades de flujo de agua fuera del límite mínimo permisible, se recomienda realizar estudios más a fondo sobre este fenómeno hidráulico.

Y, por último, se recomienda realizar estudios para determinar cómo afecta el tipo de material de la tubería en las concentraciones residuales de ozono en el agua, así como en los resultados de simulación.

11. Anexos

A. Reemplazo de la solución electrolítica y membrana del sensor de ozono

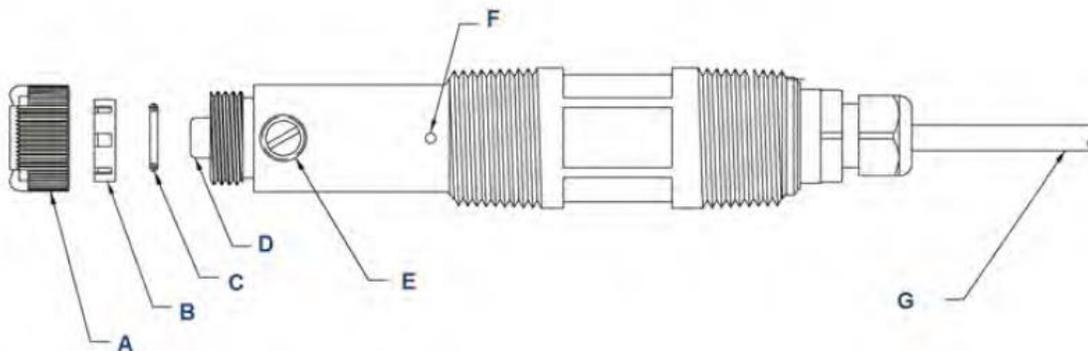
Para el procedimiento que a continuación se describe, se sugiere revisar la **Figura 44. Piezas del sensor Rosemount 499AOZ**.

1. Detenga la operación del sistema de ozonización con el botón de "STOP" que se encuentra en panel de control.
2. Cierre la válvula de paso tipo esfera instalada en la derivación hacia la celda de flujo para evitar derrames.
3. Retire el sensor de ozono de la celda de flujo.
4. Desenrosque el retenedor de la membrana.
5. Remueva la membrana y el sello tipo O-Ring.
6. Sostenga el sensor sobre un recipiente con el cátodo apuntando hacia abajo.
7. Remueva el tapón de llenado de la solución electrolítica.
8. Permita que la solución electrolítica se drene.
9. Inspeccione el cátodo.
 - a. Si esta empañado, límpielo frotándolo suavemente en dirección de las vetas existentes (no use un movimiento circular) con un papel lija de carburo de silicio con un grado entre 400-600. O Bien, opte por una limpieza en un baño ultrasónico con una exposición entre 30-60 min.
 - b. Enjuague bien con agua.
10. Remueva la vieja cinta teflón del tapón de llenado de solución y envuélvala con una o dos vueltas de cinta nueva.
11. Prepare un membrana nueva.
 - a. Sostenga el borde de la membrana con la copa formada por la membrana y el soporte de ésta apuntando hacia arriba.
 - b. Llene con solución electrolítica la copa formada.
 - c. Deje a un lado la membrana llena de solución.
12. Sostenga el sensor en un ángulo de 45° con el cátodo apuntando hacia arriba.
13. Adicione la solución electrolítica hasta que el líquido se derrame.
14. Golpee el sensor suavemente para liberar posibles burbujas de aire atrapadas.
15. Añada más solución si es necesario.
16. Enrosque el tapón de llenado de la solución en el puerto. No apretar demasiado.

17. Rote el sensor para que el cátodo quede apuntando hacia arriba.
18. Coloque un nuevo sello O-Ring en la ranura alrededor del poste del cátodo.
19. Cubra los orificios en la base del vástago del cátodo con varias gotas de la solución electrolítica. Asegúrese de que los orificios permanezcan cubiertos de solución.
20. Inserte un palillo de madera con un extremo cortado y sin filo en el puerto de equalización de presión. **No utilice un palillo afilado. Perforará la vejiga y destruirá el sensor.**
21. Presione suavemente la sonda contra la vejiga varias veces para forzar el líquido a través de los orificios en la base del vástago del cátodo, siga presionando la vejiga hasta que no se vean burbujas de aire que salgan por los orificios.
22. Coloque una gota de solución en el cátodo de oro, luego coloque la membrana sobre éste y atornille el retenedor de membrana en su lugar.

Después del reemplazo de solución electrolítica es usual que tarde un par de horas en alcanzar un equilibrio la concentración de ozono y que se requiera una calibración en progreso.

Figura 44. Piezas del sensor Rosemount 499AOZ.



Fuente: (EMERSON, 2017c)

- A. Retenedor de membrana
- B. Membrana
- C. O-ring
- D. Cátodo
- E. Tapón de llenado de la solución electrolítica
- F. Puerto de equalización de presión
- G. Cable del sensor

B. Procedimiento de calibración de sonda

I. Calibración en cero.

La calibración en cero se realizará siempre que se reemplace la solución electrolítica y el sensor de ozono. El mejor estándar cero se logra utilizando agua destilada.

La calibración en cero de la sonda se realiza a través del monitor de ozono.

1. Detenga la operación del sistema de ozonización con el botón de "STOP" que se encuentra en panel de control.
2. Cierre la válvula de paso tipo esfera instalada en la derivación hacia la celda de flujo para evitar derrames.
3. Vierta en un vaso de precipitado agua destilada o embotellada. Cuide que sea agua a temperatura ambiente.
4. Retire el sensor de ozono de la celda de flujo y colóquelo en el agua.
5. Espere entre 1-2 horas hasta que la corriente del sensor haya alcanzado un valor bajo estable de concentración de ozono. Generalmente se alcanzan valores cercanos al cero (0.00 mg/L).
6. Diríjase al monitor de ozono y presione el botón de **MENU**.
7. Seleccione la opción **Calibrar** y presione ENTER.
8. Seleccione la opción **Sensor 1**, después la opción de **Ozono** y por último, y sólo cuando se haya alcanzado un valor bajo de concentración de ozono, seleccione la opción de **"Cal Cero"**.
9. Coloque el sensor de ozono en la celda de flujo.
10. Abra la válvula de aguja, y
11. Encienda el sistema de ozonización con el botón de **"START"** en el panel de control.

Después de la calibración en cero es usual que tarde un par de horas en alcanzar un equilibrio la concentración de ozono y que se requiera una calibración en progreso.

II. Calibración en progreso.

La calibración en progreso se realizará siempre que se detecten/midan valores fuera del rango de la concentración de ozono deseada (0.07 – 0.2 mg/L) en el edificio más cercano, el edificio más alejado, y/o que el porcentaje de error de la concentración calculada del dren del sensor y la registrada por el monitor de ozono sea mayor a 40%.

La calibración en progreso de la sonda se realiza a través del monitor de ozono mientras el sistema de ozonización opera, y una vez se haya obtenido la diferencia de los valores comparados entre la concentración calculada (a través del método colorimétrico) en el dren del sensor y la registrada por el monitor de ozono (ver en **Calibración del sensor de ozono disuelto**).

Intente calibrar el sensor cuando el porcentaje de generación registrado en el panel de control haya alcanzado 0%.

1. Diríjase al monitor de ozono y presione el botón de **MENU**.
2. Seleccione la opción **Calibrar** y presione ENTER.
3. Seleccione la opción **Sensor 1**, después la opción de **Ozono** y por último la opción de **"Cal en proceso"**.
4. En pantalla saldrá el mensaje *"Esperar para la lectura estable"*, aguarde unos segundos y presione ENTER cuando salga el mensaje *"Pulse ENTER si la lectura es estable"*.
5. Presione nuevamente ENTER.
6. Ingrese el valor de concentración que resulte de la suma o resta del valor actual más la diferencia calculada entre los valores comparados de la concentración calculada en el dren del sensor y la registrada por el monitor de ozono.
7. Si el valor de concentración actual cambia antes de finalizar la selección del valor resultante de la adición o diferencia, realice los cambios pertinentes para conservar la misma diferencia calculada.
8. Presione ENTER y espere al menos 15 minutos para realizar una nueva medición, y si fuera necesario, una segunda iteración del proceso.

Concluya la calibración en progreso cuando el porcentaje de error de la concentración calculada del dren del sensor y la registrada por el monitor de ozono sea menor o muy aproximado al 40%.

Ejemplo de aplicación 1 (Aumento de la concentración):

Concentración calculada en el dren del sensor de ozono (Valor Exacto)	0.18 mg/L
Concentración registrada por el monitor de ozono (Valor Aproximado)	0.08 mg/L
Porcentaje de Error	$\frac{ 0.08 - 0.18 }{0.18} \times 100 = 55.55\%$
Diferencia de los Valores	$0.18 - 0.08 = 0.1$ mg/L
Concentración registrada por el monitor de ozono al momento de realizar la calibración (Valor Actual)	0.2 mg/L
Valor de concentración a ingresar en el monitor de ozono	$0.2 + 0.1 = \mathbf{0.3}$ mg/L

Ejemplo de aplicación 2 (Descenso de la concentración):

Concentración calculada en el dren del sensor de ozono (Valor Exacto)	0.081 mg/L
Concentración registrada por el monitor de ozono (Valor Aproximado)	0.12 mg/L
Porcentaje de Error	$\frac{ 0.12 - 0.081 }{0.081} \times 100 = 48.14\%$
Diferencia de los Valores	$0.12 - 0.081 = 0.039$ mg/L
Concentración registrada por el monitor de ozono al momento de realizar la calibración (Valor Actual)	0.15 mg/L
Valor de concentración a ingresar en el monitor de ozono	$0.15 - 0.039 = \mathbf{0.111}$ mg/L

C. Método colorimétrico de índigo

4500-O₃ OZONO (RESIDUAL)* (PROPUESTA)

4500-O₃ A. Introducción

El ozono, un potente germicida, se utiliza también como oxidante para destruir

los compuestos orgánicos que producen el sabor y olor del agua potable, para destruir la materia orgánica colorante y para oxidar o reducir las sales de hierro o manganeso a óxidos insolubles.

* Aprobado por el Standard Methods Committee, 1988.

4500-O₃ B. Método colorimétrico de índigo

1. Discusión general

El método colorimétrico de índigo es cuantitativo, selectivo y simple; sustituye a los métodos basados en la medida del oxidante total. Es un método aplicable al agua de los lagos, infiltrados fluviales, aguas subterráneas que contienen manganeso y las muy duras, e incluso las residuales domésticas tratadas biológicamente.

a) *Principio:* En solución acida, el ozono decolora rápidamente el índigo. La disminución de la absorbancia es proporcional al aumento de concentración, y la proporcionalidad constante a 600 nm es $0,42 \pm 0,01/\text{cm}/\text{mg}/\text{l}$ ($\Delta\epsilon = 20.000/M\cdot\text{cm}$) comparada con la absorción ultravioleta del ozono puro de $e = 2.950/M\cdot\text{cm}$ a 258 nm¹.

b) *Interferencias:* El peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y los peróxidos orgánicos decoloran el reactivo índigo muy lentamente. H₂O₂ no interfiere si el ozono

se mide en menos de 6 horas después de añadir los reactivos. Los peróxidos orgánicos pueden reaccionar con mayor rapidez. Fe(III) no interfiere. Mn(II) no interfiere, pero es oxidado por el ozono a formas que decoloran el reactivo. Corríjase esta interferencia haciendo la medida relativa con un blanco en que se ha destruido el ozono selectivamente. Sin el procedimiento corrector, 0,1 mg/l de manganeso ozonado producen una respuesta aproximada de 0,08 mg/l de ozono aparente. El cloro también interfiere, pero puede ser enmascarado por el ácido malónico. El bromo, que puede formarse por oxidación de Br⁻, interfiere (1 mol HOBr corresponde a 0,4 moles de ozono).
c) *Concentración mínima detectable:* Para el método espectrofotométrico que utiliza cubetas termostataadas y un fotómetro de gran calidad, el método del rango bajo detectará hasta 2 µg O₃/l. El límite de detección del método visual es de 10 µg/l

2. Instrumental

a) *Fotómetro*: Espectrofotómetro o colorímetro de filtro para uso a 600 ± 5 nm.

b) *Probetas de vidrio* (para el método visual): Probetas de vidrio graduadas de 100 ml, preferiblemente con el fondo plano.

3. Reactivos

a) *Solución madre de índigo*: Añádanse alrededor de 500 ml de agua destilada y 1 ml de ácido fosfórico conc. a un matraz aforado de 1 l. Añádanse, con agitación, 770 mg de trisulfonato potásico de índigo, $C_{16}H_7N_2O_7S_3K_3$ (disponible en el comercio con una pureza aproximada del 80 al 85 por 100). Llénese hasta la señal con agua destilada. Una dilución 1:100 exhibe una absorbancia de $0,20 \pm 0,010$ cm a 600 nm. La solución madre es estable durante 4 meses aproximadamente, cuando se mantiene en la oscuridad. Deséchense cuando la absorbancia de una dilución 1:100 sea inferior a 0,16/cm.

b) *Reactivo índigo I*: Añádanse a un matraz aforado de 1 l 20 ml de solución madre de índigo, 10 g de fosfato diácido de sodio (NaH_2PO_4) y 7 ml de ácido fosfórico conc. Dilúyase hasta el aforo. Prepárese la solución de nuevo cuando su absorbancia disminuya hasta menos del 80 por 100 de su valor inicial; normalmente dura 1 semana.

c) *Reactivo índigo II*: Procédase como en el reactivo índigo I, añadiendo 100 ml de solución madre de índigo en lugar de 20 ml.

d) *Reactivo de ácido malónico*: Disuélvanse 5 g de ácido malónico en agua y dilúyase a 100 ml.

e) *Reactivo de glicerina*: Disuélvanse 7 g de glicina en agua y dilúyase a 100 ml.

4. Procedimiento

a) *Método espectrofotométrico*:

1) Rango de concentración 0,01 a 0,1 mg de O_3/l : Añádanse 10,0 ml de reactivo índigo I a dos matraces aforados de 100 ml. Llénese uno de ellos hasta el aforo con agua destilada (blanco), y otro hasta el aforo con la muestra. Añádase la muestra de modo que las zonas totalmente decoloradas se eliminen rápidamente con agitación, pero sin producir la pérdida de gas ozono. Mídase la absorbancia de las dos soluciones a 600 ± 5 nm lo antes posible, y siempre en las 4 horas siguientes. Utilícense preferentemente cubetas de 10 cm. Calcúlese la concentración de ozono a partir de la diferencia entre las absorbancias halladas para la muestra y el blanco (apartado 5a siguiente). (NOTA: Se puede tolerar un plazo máximo de 4 horas para la lectura espectrofotométrica solamente en las muestras de agua potable. En el resto de las muestras, compruébese la desviación debida al tiempo.)

2) Rango de 0,05 a 0,5 mg O_3/l : Procédase como antes utilizando 10,0 ml de reactivo índigo II en lugar del reactivo I. Preferiblemente, mídase la absorbancia en cubetas de 4 o 5 cm.

3) Concentraciones superiores a 0,3 mg O_3/l : Procédase utilizando el reactivo índigo II, pero en estas concentraciones superiores, se utilizará un menor volumen de muestra. Dilúyase la mezcla resultante a 100 ml con agua destilada. Úsese una pipeta de vidrio para dosificar la muestra, que se dejará fluir a través de un erlenmeyer durante 1 minuto, por lo menos, sin producir burbujas. Lávese la pipeta con muestra y añádase al matraz la cantidad medida, manteniendo la punta de la pipeta por debajo de la superficie.

4) Control de interferencias: En presencia de cloro, póngase 1 ml de reactivo de ácido malónico en ambos matraces antes de añadir la muestra y/o llenar has-

ta la señal. Mídase la absorbancia lo antes posible, en los 60 minutos siguientes (Br, Br₂ y HOBr son enmascarados sólo parcialmente por el ácido malónico).

En presencia de manganeso, prepárese una solución en blanco con la muestra, en la que se destruye selectivamente el ozono por adición de glicina. Pónganse 0,1 ml de reactivo de glicina en un matraz aforado de 100 ml (blanco) y 10,0 ml de reactivo índigo II en un segundo matraz (muestra). Llévase con la pipeta exactamente el mismo volumen de muestra en cada matraz. Ajustese la dosis de modo que la decoloración en el segundo matraz sea fácilmente visible, pero sin llegar al blanqueado completo (máximo 80 ml).

Asegúrese que el pH de la mezcla glicina/muestra en el matraz de blanco (antes de añadir índigo) no es inferior a 6 porque la reacción entre ozono y glicina es muy lenta a pH bajo. Tápanse los matraces y mézclase invirtiéndolos cuidadosamente. Añádanse 10,0 ml de reactivo índigo II al matraz de blanco, de 30 a 60 segundos después de añadir la muestra. Llénense ambos matraces hasta el aforo con agua exenta de ozono y mézclase bien. Mídase la absorbancia de las dos soluciones a tiempos de contacto comparables de aproximadamente 30 a 60 minutos (tras ese tiempo, los óxidos de manganeso residual siguen decolorando el índigo sólo lentamente y la desviación de la absorbancia en el blanco y la muestra llegan a ser comparables). La absorbancia reducida en el matraz de blanco se debe a los óxidos de manganeso, mientras la del matraz de muestra resulta del ozono más óxido de manganeso.

5) Calibrado: Debido a la inestabilidad del ozono, las medidas deben basarse en la pérdida constante y conocida de absorbancia del reactivo índigo ($f = 0,42 \pm \pm 0,01/\text{cm}/\text{mg O}_3/\text{l}$). Para una exactitud máxima, analícese el lote de trisulfonato

de índigo potásico (no se ha encontrado ningún lote comercial que se desvíe de $f = 0,42$) utilizando el método yodométrico.

Cuando se use un fotómetro de filtro, reajústese el factor de conversión f , comparando la sensibilidad del fotómetro con la absorbancia a 600 nm con un espectrofotómetro preciso.

b) *Método visual:*

1) Rango de concentración de 0,01 a 0,1 mg O₃/l: Añádanse 10,0 ml de reactivo índigo I a cada una de dos probetas de vidrio de 100 ml graduadas. Llénese la de referencia (blanco) hasta la señal con agua destilada, y la otra con la muestra. Añádase la muestra a la probeta de modo que se eliminen rápidamente las zonas completamente decoloradas al mezclar, pero no hay pérdida de gas. Elimínense por vertido porciones del blanco hasta que la altura del líquido dé la misma intensidad de color aparente que la muestra, cuando se miran desde arriba. Regístrese el volumen de la probeta de blanco. Las comparaciones de color se pueden realizar hasta 4 horas después de la adición de muestra.

2) Concentraciones superiores a 0,1 mg O₃/l: Procédase como antes añadiendo 30 o 45 ml de muestra y diluyendo hasta la señal.

3) Aguas que contengan manganeso: El método visual no es adecuado para estas aguas cuando la concentración de manganeso sea comparable a la del ozono, ya que la medida de la diferencia es demasiado inexacta.

5. Cálculos

a) *Método espectrofotométrico:*

$$\text{mg O}_3/\text{l} = \frac{100 \times \Delta A}{f \times b \times V}$$

donde:

ΔA = diferencia en absorbancia entre muestra y blanco,

b = recorrido de luz en la cubeta, cm,
 V = volumen de muestra, ml (normalmente 90 ml), y
 $f = 0,42$.

El factor f se basa en un factor de sensibilidad de 20.000/cm para el cambio de absorbancia (600 nm) por mol de ozono añadido por litro. Se calibró por titulación yodométrica. La absorbancia UV del ozono en agua pura puede servir como patrón secundario: el factor $f = 0,42$ corresponde a un coeficiente de absorción para ozono acuoso, $\epsilon = 2.950/M\text{-cm}$ a 258 nm.

b) *Método visual:*

$$\text{mg O}_3/\text{l} = \frac{(100 - V) \times k}{100}$$

donde:

V = volumen de solución de referencia en la probeta de blanco, ml, y

k = factor de conversión para solución madre de índigo, calibrada por un análisis espectrofotométrico del ozono. El valor es alrededor de 0,10 mg O₃/l si la dilución 1:100 da una absorbancia de 0,19/cm.

Cuando se añaden solamente 45 o 30 ml de muestra, el factor de conversión se transforma en $2k$ o $3k$, respectivamente.

6. Precisión y sesgo

a) *Método espectrofotométrico:* En ausencia de interferencias, el error relativo es inferior al 5 por 100, sin medidas especiales para la toma de muestras. En las pruebas de laboratorio se puede reducir al 1 por 100.

Dado que este método se basa en las diferencias de absorbancia entre la muestra y el blanco (ΔA), el método no es aplicable en presencia de cloro. Si el contenido de manganeso excede al de ozono, la precisión disminuye. Si la proporción de manganeso a ozono es menor que

10:1, se pueden determinar concentraciones de ozono superiores a 0,02 mg/l con un error relativo inferior al 20 por 100.

b) *Método visual:* Las determinaciones duplicadas dan una desviación media de 1 a 1,5 por 100 dentro de la pareja. Si la concentración de manganeso es comparable con la del ozono, este método no es aplicable.

7. Referencia

1. HOIGNÉ, J. & H. BADER. 1980. Bestimmung von Ozon und Chlordioxid im Wasser mit der Indigo-Methode. *Vom Wasser* 55:261.

8. Bibliografía

- THÉNARD, A. & P. THÉNARD. 1872. Mémoire sur l'action comparée de l'ozone sur le sulfate d'indigo et l'acide arsénieux. *Comptes Rend. Acad. Sci.* 75:458
- BADER, H. & J. HOIGNÉ. 1981. Determination of ozone in water by the Índigo method. *Water Res.* 15:449.
- BADER, H. & J. HOIGNÉ. 1982. Colorimetric method for the measurement of aqueous ozone based on the decolorization of Índigo derivatives. En W. J. Masschelein, ed. *Ozonization Manual for Water and Wastewater Treatment*. John Wiley & Sons, Nueva York.
- BADER, H. & J. HOIGNÉ. 1982. Determination of ozone in water by the Índigo method: A submitted standard method. *Ozone: Sci. Eng.* 4:169.
- GILBERT, E. & J. HOIGNÉ. 1983. Messung von Ozon in Wasserwerken; Vergleich der DPD- und Indigo-Methode. *GWF- Wasser/Abwasser* 124:527.
- HAAG, W. R. & J. HOIGNÉ. 1983. Ozonation of bromide-containing waters: kinetics of formation of hypobromous acid and bromate. *Environ. Sci. Technol.* 17:261.
- STRAKA, M. R., G. E. PACEY & G. GORDON. 1984. Residual ozone determination by flow injection analysis. *Anal. Chem.* 56:1973.
- STRAKA, M. R., G. GORDON & G. E. PACEY. 1985. Residual aqueous ozone determination by gas diffusion flow injection analysis. *Anal. Chem.* 57:1799.
- GORDON, G. & G. E. PACEY. 1986. An introduc-

D. Puntos de muestreo en los edificios



Edificio 1

Tarja de lavado de tasas



Edificio 5

Tarja de comedor



Edificio 2

Tarja de limpieza



Edificio 5B

Tarja junto a baños



Edificio 3

Tarja de limpieza



Edificio 7

Llave de nariz junto a estacionamiento



Edificio 4

Tarja de lavado de tasas



Edificio 8

Tarja junto a baños



**Basamento
de la Torre**

Tarja Ala Sur
(Lingüística)



**Basamento
de la Torre**

Tarja almacén

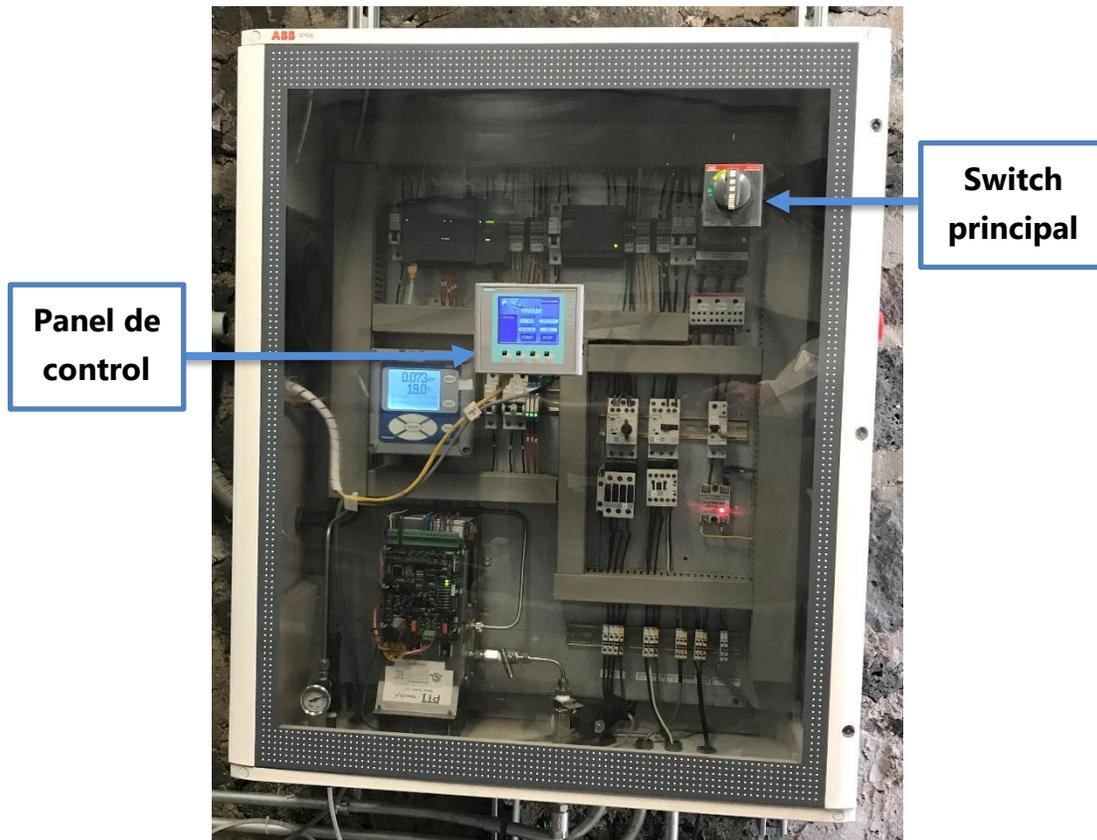


**Basamento de
la Torre**

Tarja Ala Norte
(Túnel de Viento)

E. Fotografías de componentes del sistema de ozonización.

Figura 45. Frente de Caja de Pared ABB-IP66.



Fuente: Elaboración propia, febrero de 2019.

Figura 46. Inferior de Caja de Pared ABB-IP66.



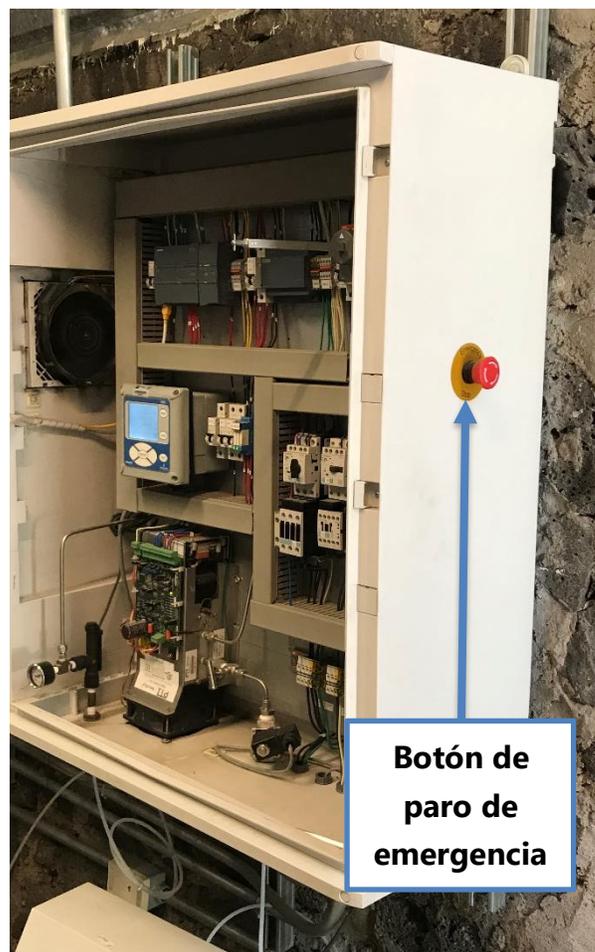
Fuente: Elaboración propia, febrero de 2019.

Figura 47. Lateral Izquierdo de Caja de Pared ABB-IP66.



Fuente: Elaboración propia, febrero de 2019.

Figura 48. Lateral Derecho de Caja de Pared ABB-IP66.



Fuente: Elaboración propia, febrero de 2019.

12. Bibliografía

- Africa.com. (2017). The Importance of Water: #WaterIsLife - Africa.com. Consultado el 24 de enero de 2019, Disponible en: <https://www.africa.com/importance-water-waterislife/>
- AirSep. (2012). *AirSep*® Corporation PSA Oxygen Generator Topaz / Topaz Plus Instruction Manual. Disponible en: [http://files.chartindustries.com/MN012-2c Topaz,Topaz-,Topaz Ultra March 2012.pdf](http://files.chartindustries.com/MN012-2c%20Topaz,Topaz-,Topaz%20Ultra%20March%202012.pdf)
- Aljac. (n.d.). *Armstrong: Automatic Air Vent Valve*. Disponible en: https://www.aljac.com/pdfs/Armstrong_Air_Eliminator.pdf
- CONAGUA. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Datos Básicos Para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado*. Disponible en: <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf>
- EMERSON. (2015). Rosemount™ 499AOZ Dissolved Ozone Sensor: Product Data Sheet. Disponible en: <https://www.bkwinstruments.co.uk/wp-content/uploads/2015/08/499AOZ.pdf>
- EMERSON. (2017a). Rosemount™ 1056: Dual-Input Intelligent Analyzer: Instruction Manual, (April). Disponible en: <https://www.emerson.com/documents/automation/manual-1056-dual-input-intelligent-analyzer-rosemount-en-68922.pdf>
- EMERSON. (2017b). Rosemount™ 499AOZ Dissolved Ozone Sensor: Product Data Sheet, (July). Disponible en: <https://www.emerson.com/documents/automation/product-data-sheet-499aoz-dissolved-ozone-sensor-rosemount-en-69276.pdf>
- EMERSON. (2017c). Rosemount™ 499AOZ Dissolves Ozone Sensor: Quick Start Guide, (July). Disponible en: <https://www.emerson.com/documents/automation/quick-start-guide-499aoz-dissolved-ozone-sensor-rosemount-en-990774.pdf>
- IINGEN. (2011). *Núm. 71 (2011): Gaceta del Instituto de Ingeniería UNAM*. Disponible en: <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/Publicaciones/GacetaElectronica/Documents/71GacetaJunio2011.pdf>
- Nava Shimada, R., & Olivares Watson, G. E. (2011). *Desinfección del Agua de Abastecimiento de Ciudad Universitaria Mediante la Tecnología de Ozono; Aspectos de Transferencia de Masa y Dimensionamiento de una Cámara de Contacto*. Disponible en: <http://132.248.9.195/ptd2012/abril/0678571/Index.html>
- PlasmaTechnics. (2018). *Plasma Block*® 2018 Catalog. Disponible en:

<https://www.plasmatechnics.com/assets/content/files/pdf-s/pti-plasma-block-catalog.pdf>

PUMAGUA. (2016). *Programa de Manejo, Uso y Reuso del Agua en la UNAM: Informe de Avances, 2016*. Disponible en:

http://www.pumagua.unam.mx/assets/pdfs/informes/2016/informe_pumagua_2016.pdf

Rocha, J. D. G. (2008). *Diagnóstico y sectorización del sistema de agua potable de Ciudad Universitaria de la UNAM, PUMAGUA*. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/566>

Rossmann, L. A. (2001). *EPANET 2 Manual del Usuario*. Disponible en: https://epanet.info/wp-content/uploads/2012/10/epanet2_manual.pdf

Solsona, F., & Méndez, J. P. (2002). *Desinfección del agua*. Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/fulltext/libro.pdf>