



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROPUESTA DE SISTEMA DE DESINFECCIÓN PRIMARIA
CON OZONO EN LA RED DE SUMINISTRO DE AGUA
POTABLE DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA CIVIL

P R E S E N T A:

JENNIFER MONROY CANALES



DIRECTORA DE TESIS:
DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA

MÉXICO, D.F.

AGOSTO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/014/15

Señorita
JENNIFER MONROY CANALES
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"PROPUESTA DE SISTEMA DE DESINFECCIÓN PRIMARIA CON OZONO EN LA RED DE SUMINISTRO DE AGUA POTABLE DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM"

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. MARCO TEÓRICO
- III. CÁLCULO DEL FLUJO DE AGUA A TRATAR PARA LA SELECCIÓN DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN CON OZONO EN LÍNEA
- IV. REVISIÓN HIDRÁULICA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN Y PROPUESTA DE MODIFICACIONES PARA LA INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO CON OZONO
- V. COSTOS, MANTENIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO PARA LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE DESINFECCIÓN CON OZONO
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 20 de marzo del 2015.
EL PRESIDENTE


M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar.

A decorative border made of black ink, featuring elegant, swirling floral and vine motifs. It frames the text on the page, with a prominent knot-like design in the top right and bottom left corners.

Para:

Mi mamá, Pilar Canales, de quien he recibido mucho amor y que siempre ha estado pendiente de mí, por su fortaleza, inteligencia y enseñanzas que han sido fundamentales en mi vida.

Mi papá, Angel Monroy, que siempre me dio todo y solo ha querido lo mejor para mí, por amarme, por sus valiosos consejos, por compartir su experiencia conmigo y por apoyarme económicamente mientras tuvo la posibilidad.

Mi hermano Angel Monroy, a quien considero mi ejemplo a seguir desde que éramos pequeños, por haber aceptado a su edad una gran responsabilidad y ser siempre generoso conmigo.

Mi hermano Steven Monroy, por su gran apoyo, su cariño y todos los momentos que hemos pasado juntos.

*"I have loved the stars too fondly to be fearful of the night."
~The Old Astronomer To His Pupil. Sarah Williams*



Agradecimientos:

A Dios, por permitirme llegar a este momento de mi vida.

A mi asesora, la Dra. María Teresa Orta Ledesma, por su guía, comprensión y conocimientos que han sido fundamentales para la elaboración de este trabajo, además de haberme brindado la oportunidad de participar en el proyecto.

Al Dr. Ignacio Monje Ramírez, por todos sus valiosos consejos, su paciencia y acertadas observaciones que ayudaron a desarrollar este trabajo.

A los miembros del jurado: M.I Agustín Demeneghi Colina, M.I Luis Candelas Ramírez, M.I Alba Beatriz Vázquez González y M.I Guillermo Mancilla Urrea, por aceptar ser mis sinodales, por permitirme disponer de su tiempo y por sus oportunas aportaciones que enriquecieron esta tesis.

Al equipo de trabajo de PUMAGUA, especialmente al Ing. José Daniel Rocha, Ing. Josué Hidalgo, y al Ing. Guillermo Montero del área de Balance Hidráulico. A la Secretaría Técnica del Instituto de Ingeniería, en especial al Ing. José Ramón Barajas y al Ing. Fernando Valenzuela. Por su apoyo constante y por proporcionar información de gran valor para el proyecto y para este trabajo.

A mis compañeros del Instituto de Ingeniería que participaron en el proyecto.

Índice

Índice.....	1
Introducción.....	3
1. Antecedentes	5
1.1 Ubicación y descripción del área de estudio	5
1.2 Descripción del sistema de abastecimiento de agua potable en Ciudad Universitaria	9
1.3 Situación actual de la red de distribución de agua potable en el Instituto de Ingeniería	12
2. Marco Teórico	14
2.1 Redes de distribución de agua potable	14
2.1.1 Sistemas de distribución y componentes	14
2.1.2 Problemas en las redes de distribución	21
2.1.3 Clasificación de flujo	23
2.1.4 Funcionamiento hidráulico en redes de distribución	25
2.1.5 Diseño de redes de distribución.....	26
2.1.6 Agua para consumo humano	28
2.1.7 El cloro en la potabilización	31
2.2 El ozono en el tratamiento de agua para consumo humano	34
2.2.1 Historia del ozono como desinfectante	34
2.2.2 Procesos de los sistemas de ozonización	37
2.2.3 Equipos de ozonación en línea	40
3. Cálculo del flujo de agua a tratar para la selección del sistema de desinfección con ozono en línea	43
3.1 Dotación de agua potable	43
3.2 Gasto de diseño	58
3.3 Selección del sistema de desinfección con ozono	62
4. Revisión hidráulica de la red de distribución y propuesta de modificaciones para la instalación de un sistema de tratamiento con ozono	68
4.1 Velocidades permisibles	68

4.2 Propuesta de modificación a la red actual	69
4.3 Pérdidas de energía	72
4.4 Presión en la red	77
4.5 Propuesta de bebederos	78
5. Costos, mantenimiento y descripción del proceso constructivo para la instalación del sistema de desinfección con ozono	80
5.1 Proceso constructivo para la instalación	80
5.2 Costo de inversión	83
5.3 Costos de operación y mantenimiento	87
5.4 Estimación de costo por m ³ de agua	91
6. Conclusiones	93
Bibliografía	94

Introducción

Todos comprendemos la importancia del agua en nuestras vidas; el agua potable ha sido una preocupación del hombre desde hace miles de años. Es conocido que las primeras grandes civilizaciones consideraban un sistema organizado de suministro de agua como un requisito esencial de cualquier asentamiento urbano de tamaño considerable (TRIFUNOVIC, 2006).

El abastecimiento de agua en los centros de trabajo reviste gran importancia para la vida, la salud, la higiene de los trabajadores y los diferentes procesos industriales (OPS, 1987).

Desde principios del 2008, se han venido realizando esfuerzos importantes con el fin de mejorar la calidad del agua para consumo humano en el Campus Central de la UNAM, a través de programas Institucionales (PUMAGUA, 2008) en los cuales el Instituto de Ingeniería ha sido líder y ha tenido un papel trascendental para su consolidación.

El proyecto RAM (Responsabilidad Ambiental) es uno de los 12 proyectos del Plan de Desarrollo 2008-2012 del Instituto de Ingeniería (IIUNAM). En su diseño participaron principalmente personal académico de la Subdirección de Hidráulica y Ambiental y personal de la Secretaría de Planeación y Desarrollo Académico. El objetivo del proyecto es adoptar y practicar en el Instituto de Ingeniería una cultura ecológica, con el fin de promover hábitos de consumo responsable de energía, agua y materiales de oficina, primordialmente (Gaceta del Instituto de Ingeniería UNAM, 2011).

El RAM se ha traducido, desde hace 3 años y con diverso grado de desarrollo, en una serie de campañas de concientización, programas de ahorro de energía y agua, adquisición de productos y materiales amigables, y en el manejo adecuado de los residuos sólidos y peligrosos minimizando los impactos en el ambiente (Gaceta del Instituto de Ingeniería UNAM, 2011).

La Propuesta de Suministro de Agua Potable Segura en el Instituto de Ingeniería (Primera Etapa), tiene como objetivo determinar el diseño conceptual del proceso de potabilización y la infraestructura de red requerida en el Instituto de Ingeniería para el abastecimiento seguro de agua potable considerando datos experimentales de calidad del agua, gasto de suministro y el cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana.

Tomando en cuenta que la cloración no es un método efectivo para la remoción de virus entéricos ni para algunas bacterias patógenas, en el 2009, se propuso la incorporación de la tecnología automatizada del ozono (desinfectante primario) al proceso de desinfección, con el fin de garantizar la inocuidad microbiológica del agua para consumo, mantener un efecto de cloro residual y evitar la formación de trihalometanos. Así, además se mejoran las propiedades organolépticas del agua de tal manera que los usuarios tengan confianza plena en consumir agua de los bebederos y prescindir del agua embotellada (PUMAGUA, 2010b).

Objetivos

- Determinar el gasto de diseño de un sistema de desinfección para la red de suministro de agua potable de los edificios 1 a 5, 7, 13 y Torre del Instituto de Ingeniería.

- Definir las modificaciones necesarias en la red de suministro de agua potable actual de los edificios del Instituto de Ingeniería en estudio, para garantizar el suministro de agua para consumo humano a la comunidad.

- Determinar los costos de la puesta en marcha y mantenimiento de la propuesta y describir el proceso de construcción.

1. Antecedentes

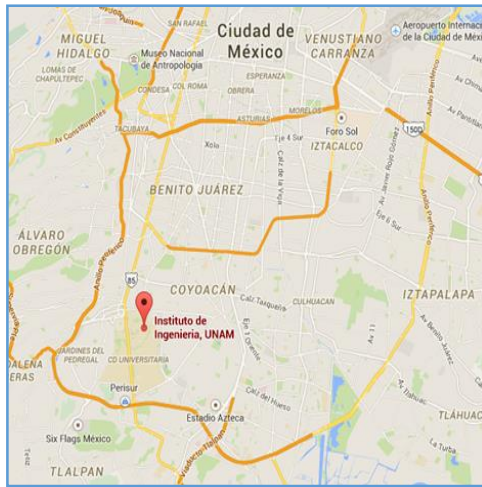
1.1 Ubicación y descripción del área de estudio

El Instituto de Ingeniería es un elemento importante de la tradición de la ingeniería nacional. Surge hace 57 años como la División de Investigación de la entonces Escuela de Ingeniería y actualmente pertenece al Subsistema de la Investigación Científica, con lo que se consolida y reconoce la investigación en ingeniería dentro de la Universidad (IIUNAM, 2012).

El Instituto de Ingeniería en México



El Instituto de Ingeniería en la Ciudad de México



El Instituto de Ingeniería en la UNAM.

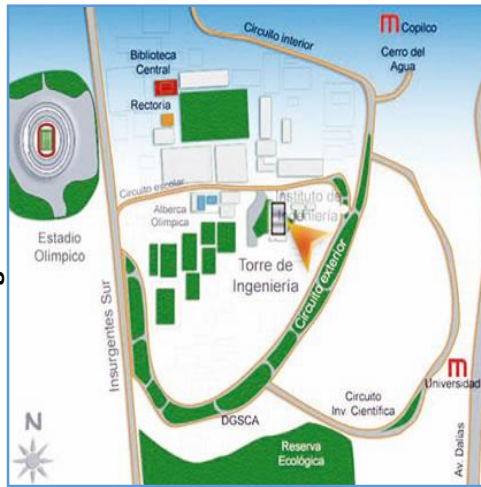


Ilustración 1. Ubicación del Instituto de Ingeniería.

La investigación en ingeniería ha contribuido en el desarrollo de proyectos y en la ejecución de las grandes obras de infraestructura del país, como presas, caminos y puentes. Ha aportado soluciones innovadoras a diversos retos en varias disciplinas de la ingeniería y ha contribuido en la preparación de reglamentos, manuales y normas de aplicación profesional; todo lo anterior acompañado de la formación de un gran número de ingenieros egresados de la UNAM (IIUNAM, 2012).

Las instalaciones del Instituto de Ingeniería objeto del presente proyecto se encuentran ubicadas dentro del Campus Central de la UNAM en Ciudad Universitaria (Ilustración 1).

Las instalaciones del Instituto de Ingeniería ocupan 14 edificios en la zona de Ciudad Universitaria, Ciudad de México, con una extensión de 26 020.54 m² construidos, entre laboratorios, aulas, cubículos, oficinas y talleres, además de la Unidad Académica de Juriquilla y la de Sisal. Para todo lo anterior, el IIUNAM invierte anualmente alrededor de 13 millones de pesos en infraestructura (IIUNAM, 2014a).

A continuación, se hace una breve descripción de los edificios considerados en este estudio.

Edificio 1 "Fernando Hiriart Balderrama"



- Es principalmente de tipo administrativo. En este desarrollan sus funciones 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 (USI).

Edificio 2



- En este desarrollan sus funciones la Subdirección de Estructuras y Geotecnia, Coordinación de Estructuras y Materiales y la Coordinación de Mecánica Aplicada.

Edificio 3 "Raúl Sandoval Landázuri"



- Este edificio alberga el Laboratorio de Estructuras y Materiales y el Laboratorio de Hidráulica.

Edificio 4 "Raúl Marsal Córdova"



- Este edificio es de uso mixto, alberga a la Coordinación de Geotecnia y el Laboratorio de Mecánica de Suelos.

Edificio 5



- Estas instalaciones son de uso mixto, dentro de este edificio laboran la Subdirección de Hidráulica y Ambiental, Coordinación de Hidráulica, Coordinación de Ingeniería Ambiental, Laboratorio de Ingeniería Ambiental.



Edificio 7 "Nabor Carrillo Flores"

- Este edificio contiene al Laboratorio de Mecánica de Rocas, Laboratorio de Enrocamientos y laboratorio de microscopía electrónica.



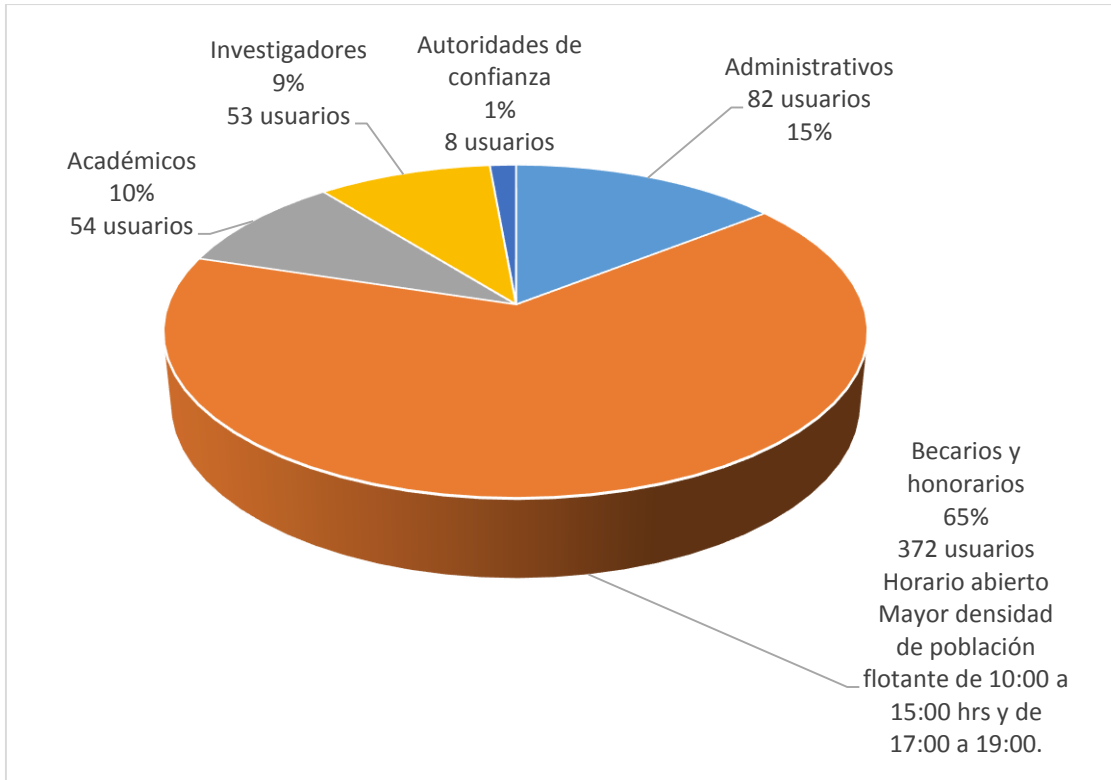
Torre de Ingeniería

- La Torre de Ingeniería es un espacio físico que ofrece albergue de calidad con servicios integrados tales como oficinas amuebladas, vigilancia, comunicaciones (voz y datos), áreas para reuniones, entre otros. Alberga a grupos de Entidades Académicas que realizan proyectos patrocinados los cuales son promovidos y administrados por las mismas Entidades y desarrollados físicamente en las instalaciones de la TI.

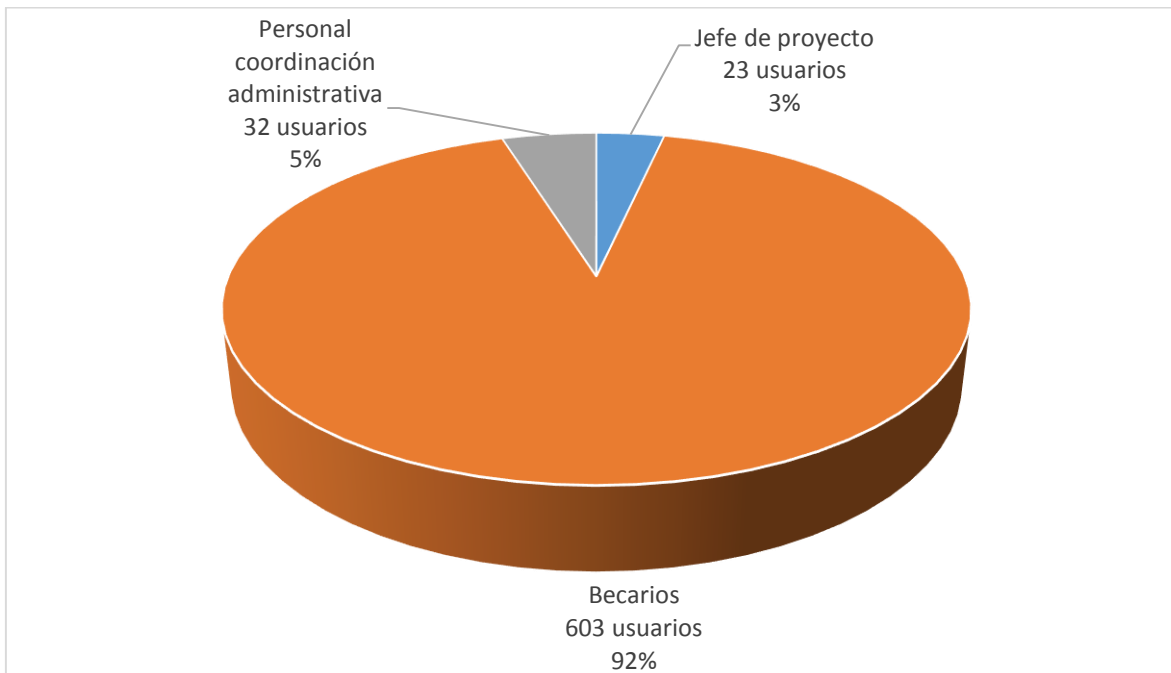
- **Edificio 13: Basamento de la Torre de Ingeniería.**

- **Café Azul y Oro**

- Cafetería concesionada que brinda servicio de alimentos.
- Horario de servicio: Lunes a viernes, en el calendario laboral de la UNAM de 9:00 a 18:00 horas. Se atienden en promedio 150 comensales y laboran 18 trabajadores.



Gráfica 1. Características de los usuarios de los Edificios 1 a 5, 7 y 13 del Instituto de Ingeniería (2010). FUENTE: Instituto de Ingeniería, 2014.



Gráfica 2. Características de los usuarios de la Torre de Ingeniería (2013). FUENTE: Torre de Ingeniería, 2014.

1.2 Descripción del sistema de abastecimiento de agua potable en Ciudad Universitaria

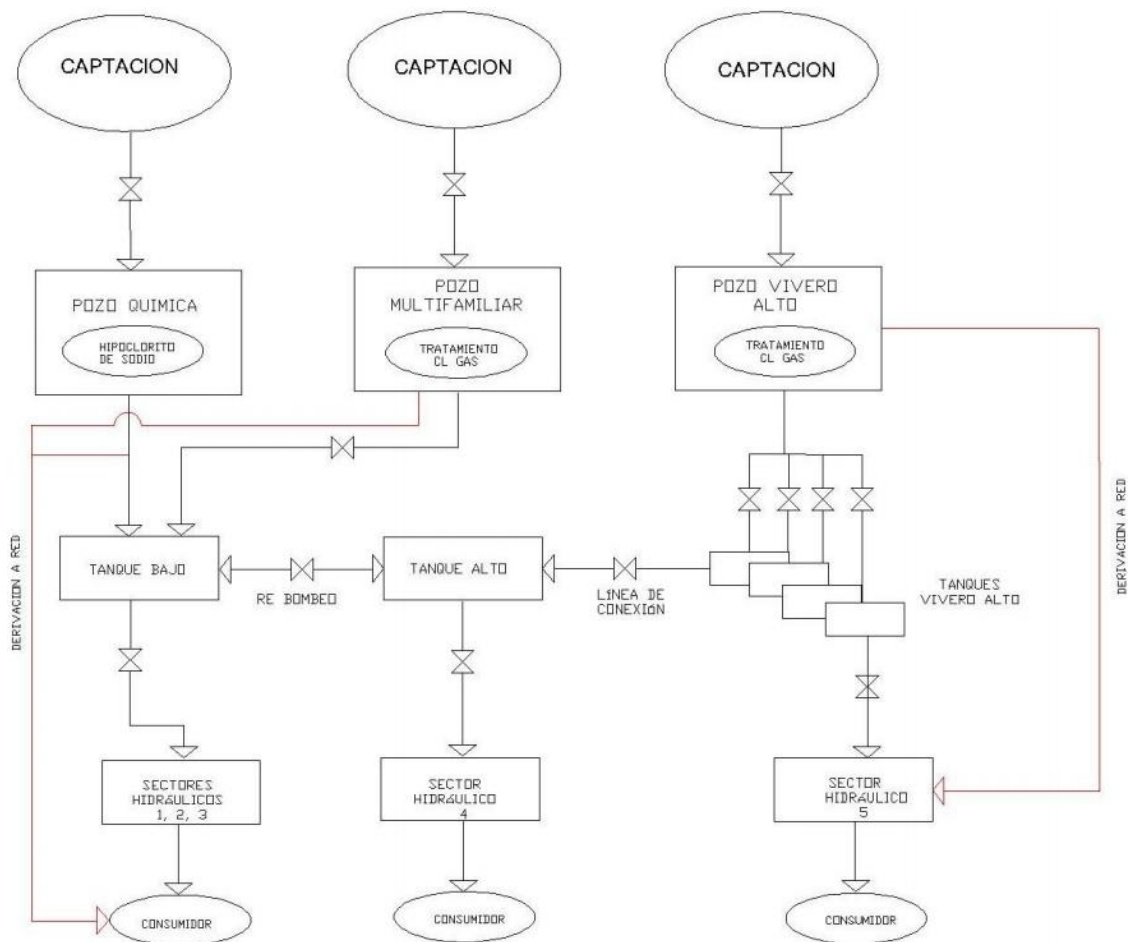


Diagrama 1. Red de distribución de agua potable en Ciudad Universitaria. FUENTE: MARINI, 2013.

Fuente de abastecimiento

El agua que abastece a Ciudad Universitaria es de tres pozos que, en conjunto, tienen un gasto de extracción promedio de 100 l/s y un máximo de 170 l/s.

Los pozos Multifamiliar y Vivero Alto funcionan diariamente, mientras que el pozo de Química se mantiene como reserva (PUMAGUA, 2009).

Regularización

El sistema de distribución de agua potable consta de tres tanques de almacenamiento, con una capacidad de 12 000 m³. La cota de descarga de la línea de conducción a los tanques está a una elevación de 2 362 metros sobre el nivel del mar (PUMAGUA, 2009).

El Tanque Bajo es abastecido por el pozo de Química y su función es apoyar al Tanque Alto. 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 pequeños que se comunican entre sí (PUMAGUA, 2009).

Distribución

La red de distribución de agua potable de Ciudad Universitaria está integrada por cerca de 54 km de tubería de diversos diámetros y materiales, como lo son el acero, asbesto, fierro fundido, PVC y PEAD. (PUMAGUA, 2009).

Sectores hidráulicos

De acuerdo a los resultados de la simulación realizada por el equipo de trabajo PUMAGUA de la red de agua potable de Ciudad Universitaria, se recomendó segmentar la red en cinco sectores hidráulicos, tomando como principal criterio las presiones (y, en consecuencia, la topografía) que arrojó la simulación matemática, con datos obtenidos durante el diagnóstico (PUMAGUA, 2010a).

Medición del suministro

Para la medición del suministro o macro medición, el grupo de trabajo de PUMAGUA usa medidores de tipo electromagnético para uso en líneas presurizadas de agua limpia, que incluyen la unidad de medición, la unidad electrónica para la transducción de la señal, el despliegue de la señal, caudal, totalización de volumen y los servicios complementarios (GONZÁLEZ, 2010).

El sistema de lectura tiene las siguientes características:

Cada medidor cuenta con un datalogger que almacena los datos y una antena transmisora, en intervalo horario cada transmisor puede almacenar información hasta 2 años (GONZÁLEZ, 2010).

La última lectura es recibida y almacenada en cada receptor, los concentradores almacenan los datos de los transmisores y pueden ser recuperados cada hora con base de hasta 2,000 transmisores por concentrador, en cualquier momento los datos se mantienen disponibles con sistema al paso y móvil; la información se concentra en una central, donde se puede procesar y obtener gráficas de consumo (GONZÁLEZ, 2010).

El sistema SCADA en la UNAM (Diagrama 2) provee de toda la información que se genera en el proceso de monitoreo, tanto en la cantidad de agua como en la calidad de esta. Es un sistema basado en computadoras que permite supervisar y controlar variables de proceso a distancia, proporcionando comunicación con los dispositivos de campo (controladores autónomos) y controlando el proceso de forma automática por medio de un software especializado (PUMAGUA, 2010a).

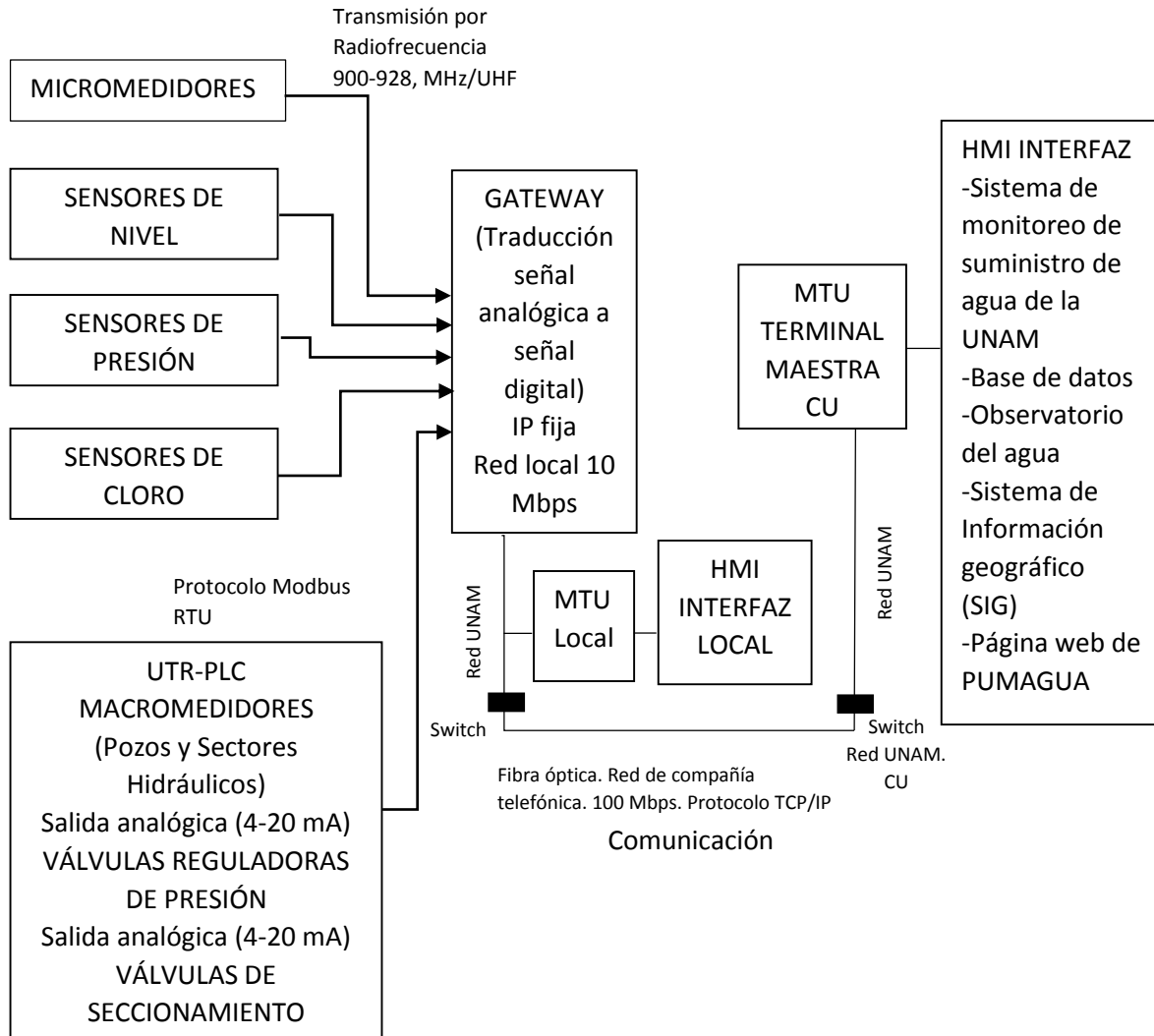


Diagrama 2. Componentes del Sistema SCADA en la UNAM. FUENTE: GONZÁLEZ, 2011.

Control de la presión y fugas de agua

A través de los medidores instalados en las entidades universitarias, el grupo de trabajo PUMAGUA monitorea los consumos de agua durante las 24 horas del día, de esta forma, los gastos nocturnos del recurso indican sobre la existencia de una posible fuga dentro de los edificios, si el consumo por las noches es constante y el caudal no disminuye, el medidor ha detectado una fuga (PUMAGUA, 2014).

1.3 Situación actual de la red de distribución de agua potable en el Instituto de Ingeniería

La red de distribución de agua potable del Instituto de Ingeniería y la Torre de Ingeniería es abastecida por el Pozo Multifamiliar y el Pozo de Química.

Los edificios 2, 3 y 4 pertenecen a lo que se conoce como el Sector Hidráulico I, mientras que los edificios 1, 5, 6, 7, 13 y la Torre de Ingeniería forman parte del Sector Hidráulico III.

El Sector Hidráulico I alberga a 39 entidades universitarias con una población estimada de 41 500 usuarios por día. De las 39 dependencias que se encuentran en este sector, se puede decir que el 40% son institutos y centros de investigación. Esta clasificación resulta importante, dada la relación que existe entre un tipo de usuario, el modo y, en consecuencia, la cantidad de agua usada por éste (PUMAGUA, 2009).

Se estima que en los meses de alta ocupación los usuarios en este sector demandan hasta 9.61 l/s de agua, mientras que en los meses de baja ocupación la demanda estimada disminuye hasta 2.3 l/s. La presión media en el sector es de 55 metros de columna de agua o 5.5 kg/cm², lo que sugiere una alta presencia de fugas visibles y no visibles tanto en la red como en el interior de las dependencias (PUMAGUA, 2009).

En el Sector Hidráulico III se estima que los usuarios demandan hasta 8.10 l/s de agua. La presión media es de 45 metros de columna de agua o 4.5 kg/cm², lo que sugiere una alta presencia de fugas en la red y en el interior de las dependencias (PUMAGUA, 2009).

De la información contenida en los planos de PUMAGUA (Ilustración 2), se observa que las tuberías actuales son de acero al carbón y de acero galvanizado, de cuatro diámetros diferentes, como se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1. Características de la tubería en la red de suministro de agua potable del Instituto de Ingeniería. FUENTE: Elaboración propia.

Material	Diámetro (")	Longitud en la red (m)
Acero al carbón	4	164.1
	6	13.5
	10	306.4
Acero galvanizado	2	44.1
	4	347.3

1. Antecedentes

- Válvula de compuerta
- Tuberías de acero de la red de distribución de agua potable actual del Instituto de Ingeniería.
- Manómetro
- 91 Número de cruceo

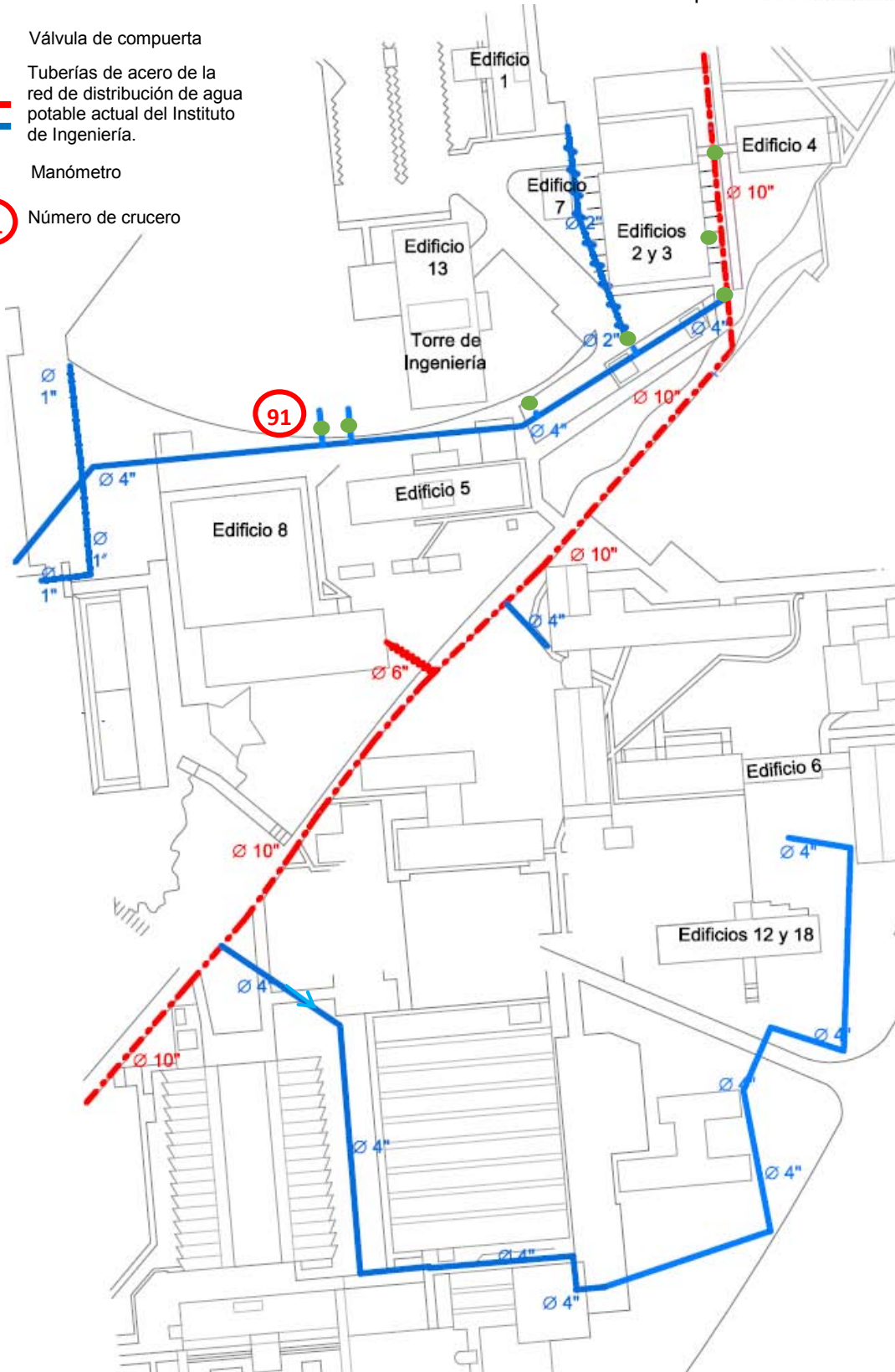


Ilustración 2. Red de distribución de agua potable actual del Instituto de Ingeniería. Adaptación del plano original proporcionado por el grupo de Balance Hidráulico de PUMAGUA (2014).

2. Marco Teórico

2.1 Redes de distribución de agua potable

En general, un sistema de suministro de agua se compone de los siguientes procesos:

- 1) Extracción de agua no tratada y transporte;
- 2) Tratamiento del agua y almacenamiento;
- 3) Transporte y distribución de agua tratada

(TRIFUNOVIC, 2006).

Una vez que se dispone de agua potable en el tanque de regularización, debe ponerse a disposición de los habitantes, distribuyéndola por toda la población por medio de la red de distribución. Un adecuado sistema de distribución debe ser capaz de proporcionar agua potable en cantidad adecuada y a la presión suficiente cuándo y dónde se requiera dentro de la zona de servicio (CÉSAR, 1990).

Transporte y distribución son técnicamente los mismos procesos en donde el agua es llevada a través de una red de tuberías, almacenada intermitentemente y bombeada si es necesario, con el objetivo de cumplir con las demandas y presión requeridas en el sistema (TRIFUNOVIC, 2006).

Los sistemas de transporte de agua se componen de líneas de transmisión primarias de capacidad alta y constante. Excepto para el caso de agua para consumo humano, estos sistemas pueden estar contruidos para llevar agua parcialmente o sin ningún tratamiento. Como parte del sistema de agua para consumo humano, las líneas de transporte no sirven directamente a los consumidores. Usualmente conecta el almacenamiento de agua tratada de una planta con algún almacenamiento central en el área de distribución (TRIFUNOVIC, 2006).

2.1.1 Sistemas de distribución y componentes

Los sistemas de distribución consisten en una red de tuberías de menor diámetro con numerosas conexiones que suministran agua directamente a los usuarios. Las variaciones de flujo en estos sistemas son mucho más marcadas que en casos de sistemas de transporte de agua. En orden de alcanzar una operación óptima, diferentes tipos de reservorios, estaciones de bombeo, torres de agua, así como

varios accesorios (válvulas, hidrantes, equipos de medición, etc.) pueden ser instalados en el sistema (TRIFUNOVIC, 2006).

Sistema ramificado

El sistema ramificado (Figura 1) consiste en una tubería principal o arteria maestra de la que se derivan arterias secundarias, de las que a su vez parten otras de tercero o cuarto órdenes, cada vez menores y en forma análoga a los nervios de una hoja (HERNÁNDEZ, 1990).

La tubería principal se instala en la zona de mayor consumo, disminuyendo de diámetro a medida que se aleja de la fuente o del tanque de regularización, de esta tubería parten otras de menor diámetro llamadas secundarias o de relleno para completar la red. Las tuberías principales se calcularán con el gasto acumulado que les corresponda a partir del gasto máximo horario (RODRÍGUEZ, 2001).

Aunque estos sistemas son simples de diseñar y construir, no son favorecidos en la actualidad por las siguientes razones:

- 1) En los extremos finales de las ramas se pueden presentar crecimientos bacterianos y sedimentación debido a estancamiento;
- 2) Es difícil que se mantenga una dosis de cloro residual en los extremos muertos de la tubería;
- 3) La presión en los puntos terminales de las ramas puede llegar a ser indeseablemente baja conforme se hacen ampliaciones a la red (CÉSAR, 1990).

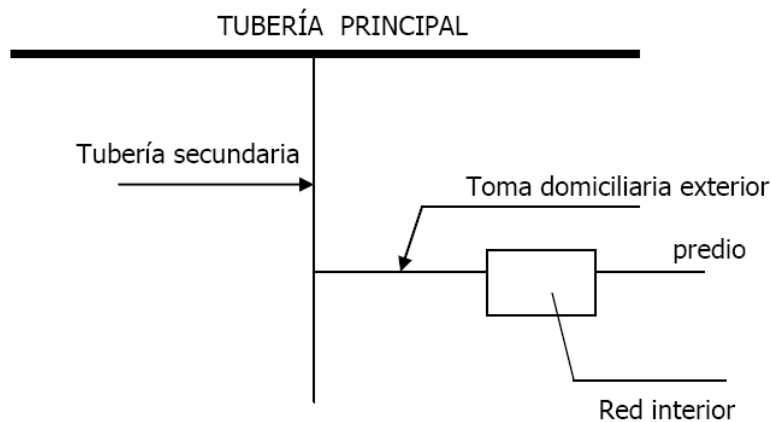


Figura 1. Sistema ramificado. FUENTE: RODRÍGUEZ, 2001.

Por eso hoy en día, teniendo en cuenta las garantías de servicio exigidas en las instalaciones urbanas, no es aconsejable este sistema más que en caso de poblados rurales con caseríos muy diseminados (HERNÁNDEZ, 1990).

Sistema en malla

En el sistema de red articulada (Figura 2), los ramales de la red anterior se unen y el agua puede llegar a un punto determinado de ellos por varios caminos (HERNÁNDEZ, 1990). El rango distintivo del sistema en malla, es que todas las tuberías están interconectadas y no hay terminales o extremos muertos (CÉSAR, 1990).

En estos sistemas, el agua puede alcanzar un punto dado desde varias direcciones, superando todas las dificultades del sistema ramificado, discutido previamente. La desventaja es que el diseño de estos sistemas es algo más complicado (CÉSAR, 1990).

En estas redes existe un problema de indeterminación de sentido de circulación del agua, pero tienen la ventaja de que en caso de avería el agua llega al resto de la red por otras tuberías, no faltando más que el trozo averiado que se puede aislar por medio de llaves, emplazadas de modo a formar pequeños polígonos cerrados independientes. Las dimensiones de los tramos aislados dependen de la importancia de la población y de los efectos de la carencia de suministro en los mismos (HERNÁNDEZ, 1990).

Las tuberías principales se calcularán de acuerdo con los gastos acumulados que les corresponda a partir del gasto máximo horario (RODRÍGUEZ, 2001).

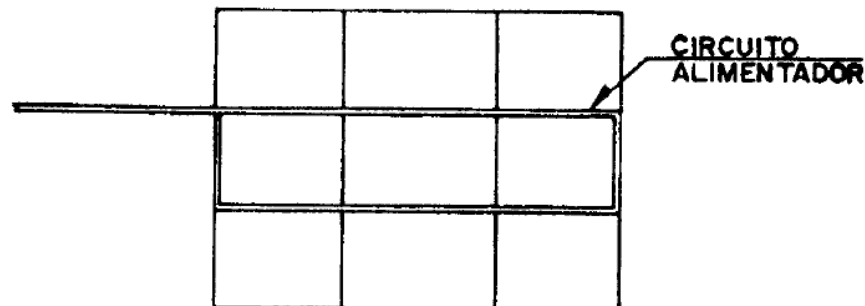


Figura 2. Sistema en malla. FUENTE: CÉSAR, 1990.

Sistema combinado

De acuerdo con las características de la zona, en algunos casos se hacen ampliaciones a la red de distribución en malla con ramas abiertas, resultando un sistema combinado (3). Este tipo de sistema, tiene la ventaja de permitir el uso de alimentadores en circuito que suministran agua a un área desde más de una dirección (CÉSAR, 1990).

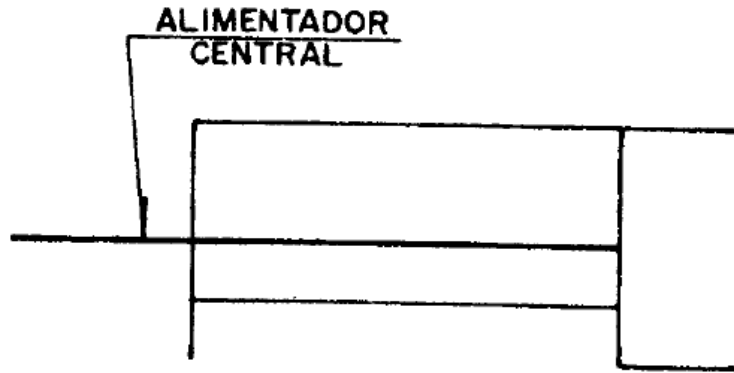


Figura 3. Sistema combinado. FUENTE: CÉSAR, 1990.

Tanto la red de distribución de agua potable del Instituto de Ingeniería como la red de distribución de agua potable de la UNAM son sistemas combinados. Este dato será de utilidad para conocer la forma en la que opera y si es viable el sitio donde se planea colocar el equipo, además de poder elegir el método adecuado para el diseño de los elementos necesarios para la propuesta de modificaciones a la red actual.

Componentes del sistema de distribución

Tuberías

Líneas de alimentación

Son tuberías que suministran el agua a toda la red. Pueden partir del tanque de regularización, o de la fuente de abastecimiento y terminar en el sitio donde se realiza la primera derivación en la red, ya sea a tuberías principales, de relleno o la conexión directa de tomas domiciliarias (RODRÍGUEZ, 2001).

Cuando la red trabaja por gravedad, la línea de alimentación parte del tanque de regularización y termina en el lugar donde se hace la primera derivación. En esta línea fluye el total del gasto considerado, por lo tanto resulta la de diámetro mayor; esto sucede cuando se ha de proyectar un solo tanque de regularización. Cuando haya más de uno, habrá tantas líneas de alimentación como tanques se tengan, pero en todo caso, la suma de los gastos que fluye en estas líneas debe ser igual al gasto máximo horario (CÉSAR, 1990).

Cuando el sistema es por bombeo directo a la red con excedencias al tanque, las líneas de alimentación se originan en las estaciones de bombeo y terminan en la primera inserción (CÉSAR, 1990).

Tuberías primarias

En el sistema de malla, son las tuberías que forman los circuitos, localizándose a distancias entre 400 y 600 m. En el sistema ramificado es la tubería troncal de donde se hacen las derivaciones. A estas líneas están conectadas las líneas secundarias o de relleno (CÉSAR, 1990).

Tuberías secundarias o de relleno

Son las tuberías que cubren el total de la red, que se ligan a las tuberías troncales. Los diámetros de las tuberías de relleno se dan por especificaciones atendiendo a la magnitud e importancia de la localidad, y que son de 50 mm (2") de diámetro, a 60 mm (2 ½ ") de diámetro para localidades urbanas pequeñas, y de 75 mm (3") a 100 mm (4") de diámetro para localidades de importancia. Sin embargo, en todo caso deberá justificarse plenamente su empleo (RODRÍGUEZ, 2001).

Tomas domiciliarias

Es la parte de la red gracias a la cual los habitantes de la población tienen agua en su propio predio (CÉSAR, 1990).

Válvulas

Manejar una red de distribución de agua requiere diferentes tipos de equipamiento. Las válvulas son probablemente las piezas más importantes de equipamiento, ya que proveen control sobre el flujo en la red. Hay diferentes tipos de válvulas con un amplio rango de propósitos (BRIERE, 2011).

Los tipos de válvulas comúnmente usadas en la red de distribución son las de compuerta (Ilustración 3), de expulsión de aire y de retención. En general tres válvulas de compuerta se usan en las tuberías que concurren a cruces y dos válvulas en todas las té. La principal función de estas válvulas es aislar subsecciones del sistema para reparaciones y mantenimiento (CÉSAR, 1990).

En los puntos bajos de la red para desagüe y en los sitios altos se colocan válvulas de expulsión de aire; las válvulas de retención se usan para limitar el flujo del agua hacia una dirección (CÉSAR, 1990).

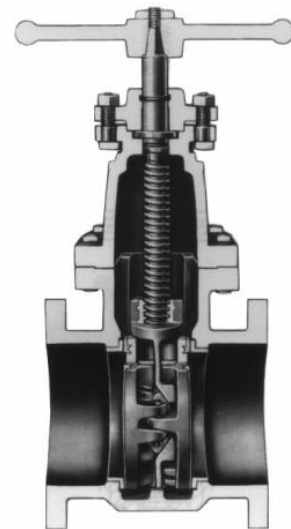


Ilustración 3. Válvula de compuerta. FUENTE: CONAGUA, 2007d.

Piezas especiales



Ilustración 4. Conexiones de hierro maleable galvanizadas. Recuperado de: http://www.tuberiasyconexiones.com/conexiones_de_hierro_conexiones_de_fierro_fundido.html

Son aquellos accesorios de la tubería que permiten formar cambios de dirección, ramificaciones e intersecciones, así como conexiones (Ilustración 4) incluso entre tuberías de diferentes materiales y diámetros.

También permiten la inserción de válvulas y la conexión con estaciones de bombeo y otras instalaciones hidráulicas (CONAGUA, 2007d).

Los principales accesorios de una red de distribución son:

- a) Piezas de hierro fundido con bridas: Cruces, te, codos de 11, 25, 22.5, 45 y 90 grados, reducciones, extremidades, carretes (largo y corto), y tapas ciegas, han sido las que se han usado con más frecuencia. En el mercado se encuentran disponibles en diámetros que varían de 50 a 900 mm, y resisten presiones de 10.5 kg/cm^2 (RODRÍGUEZ, 2001).
- b) Piezas de hierro fundido con extremos lisos para tubos de asbesto-cemento: Los extremos de estas piezas están diseñadas de manera que pueden unirse fácilmente a los extremos maquinados de los tubos empleando coples y empaques normales de la tubería de asbesto-cemento, con lo que en comparación con el tipo usual de piezas de brida se requieren menos piezas por cruce, y sus uniones son más flexibles (RODRÍGUEZ, 2001).

Uniones

El sistema de unión empleado en las tuberías de acero puede ser: coples, soldadura (Figura 4), o ranuras con junta mecánica moldeadas o talladas (CONAGUA, 2007d).

Las tuberías se instalan sobre la superficie o enterradas, dependiendo de la topografía, clase de tubería y tipo de terreno. Para obtener la máxima protección de las tuberías se recomienda que éstas se instalen en zanja (CONAGUA, 2007a).

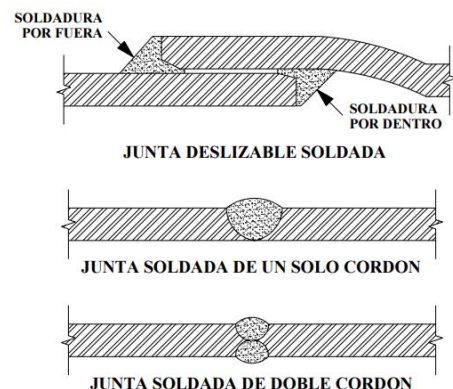


Figura 4. Uniones por soldadura. FUENTE: CONAGUA, 2007d

Bombas



Ilustración 5. Bomba centrífuga comercial.
Recuperada de:
<http://www.rotoplas.com/productos/abastecimiento/bomba-centrifuga.html>

Las bombas se utilizan para impulsar líquidos a través de sistemas de tuberías. Es común que se clasifiquen las bombas como de desplazamiento positivo o cinéticas (MATAIX, 2006).

Las bombas cinéticas agregan energía al fluido cuando lo aceleran con la rotación de un impulsor. El fluido se lleva al centro del impulsor y después es lanzado hacia fuera por las aspas. Al salir del impulsor, el fluido pasa por una voluta en forma de espiral, donde baja en forma gradual y ocasiona que parte de la energía cinéticas se convierta en presión de fluido (MATAIX, 2006).

La gran mayoría de los sistemas de distribución y líneas de conducción de agua potable incorporan bombas en sus instalaciones para trasladar el agua a través del sistema o mantener presiones requeridas (Ilustración 5). En las redes de distribución su aplicación específica permite Incrementar la presión para servir áreas de servicio ascendentes (booster) (CONAGUA, 2007d).

Hidroneumáticos

Un grupo de presión, o hidroneumático, está compuesto básicamente por un tanque hermético que contiene aire y agua, suministrada ésta última por una o más bombas (Figura 5). Al ser comprimido el aire transmite la presión al agua que, de este modo, puede llegar a todos los puntos de una instalación hidráulica (ZAMORA, 2012).

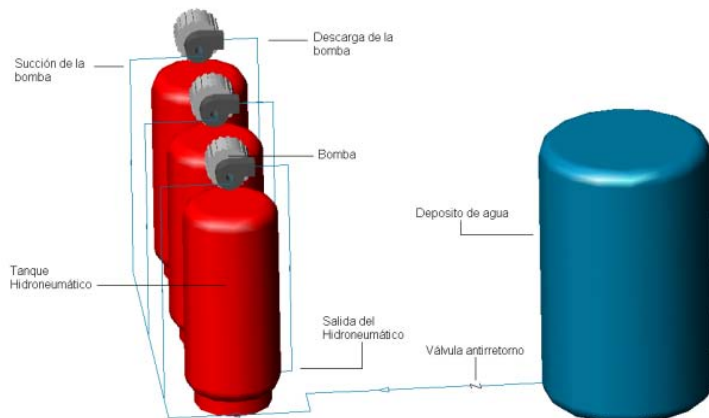


Figura 5. Tanques hidroneumáticos. FUENTE: ZAMORA, 2012.

En realidad la bomba, comandada por un presostato, podría suministrar directamente el agua a la presión requerida sin necesidad del tanque pero para ello tendría que arrancar tal número de veces que los contactores eléctricos tendrían muy corta vida, además el consumo de energía sería elevado ya que el arranque es el momento de mayor consumo de energía eléctrica (ZAMORA, 2012).

2.1.2 Problemas en las redes de distribución

Corrosión

Uno de los principales problemas que se presentan en las instalaciones hidráulicas es el de la corrosión en los materiales metálicos, produciéndose perforaciones y obstrucciones de las líneas de agua (Ilustración 6) (DE SOUSA, 2010). La corrosión se refiere al ataque químico por un agente corrosivo (suelos, aguas, aire) a los componentes del sistema degradándolos, y puede deberse al agua conducida o a las condiciones exteriores del ambiente (CONAGUA, 2007d).



Ilustración 6. Corrosión. FUENTE: EPA, 2014.
Recuperado de:
<http://www.epa.gov/awi/publications.html>

Los productos de la corrosión y la acumulación de sedimentos en los sistemas de distribución pueden proteger a los microorganismos de los desinfectantes. Estos organismos pueden reproducirse y causar problemas tales como mal sabor y olor, limos y corrosión adicional, lo cual trae como consecuencia que el agua que llega al consumidor no esté apta para su consumo. Los problemas de la calidad del agua asociados con la acumulación de sedimentos incluyen el aumento de la demanda de desinfectante, crecimiento microbiano, incremento de la turbidez en el agua, entre otros (DE SOUSA, 2010).



Ilustración 7. Fuga en tubería. FUENTE: Alliance for Water Efficiency, 2010. Recuperada de:
http://www.allianceforwaterefficiency.org/Water_Loss_Control_-_What_Can_Be_Done.aspx

Falta de capacidad de conducción

Se manifiesta como presiones y gastos insuficientes y puede deberse a la falta de mantenimiento y control de válvulas, tuberías de diámetro insuficiente, falta de capacidad en tanques de regulación, capacidad de bombeo insuficiente, bloqueos o fallas en las tuberías. Todos estos factores pueden analizarse con un programa de redes calibrado (CONAGUA, 2007).

Fugas

Las fugas de agua potable en las redes de distribución (Ilustración 7) producen desperdicio de agua, reducen la eficiencia de las redes y generan una pérdida económica a los organismos operadores del sistema de distribución de este tipo de líquido (FUENTES, 2011).

Se puede establecer que se deben a corrosión, material pobre de junteo, fallas en la tubería, falta de atraques, procedimientos erróneos de conexión (CONAGUA, 2007d).

Fracturas

Una fractura es causada por agentes ajenos a la tubería, tales como contactos con otras estructuras, construcciones, sobrecargas (golpe de ariete), cargas excesivas, procedimientos de instalación erróneos o actividad sísmica (CONAGUA, 2007d).

Calidad deficiente del agua



*Ilustración 8. Coliformes fecales. FUENTE SEMARNAT, 2012.
Recuperado de:
http://app1.semarnat.gob.mx/playas/nuevo/analisis_tecnico_02.shtml*

Entre sus causas se encuentran infiltraciones, conexiones cruzadas con sistemas de aguas residuales y deficiencias en la calidad del agua inyectada al sistema (CONAGUA, 2007d).

Los sistemas de almacenamiento y distribución de agua potable constituyen un ambiente propicio para

el desarrollo bacteriano (Ilustración 8); el flujo de agua favorece el transporte de nutrientes y bacterias, mientras que las paredes de las tuberías y las partículas presentes en el agua pueden servir de superficie de crecimiento para las bacterias (KNOBELSDORF, 1997).

El crecimiento bacteriano en los sistemas de almacenamiento y distribución de agua potable produce un deterioro de la calidad del agua, alterando su sabor y olor, aumentado su turbiedad e incluso llegando a afectar su conformidad con las normas microbiológicas de calidad. Además, la película bacteriana formada en las paredes de las tuberías puede reducir la capacidad hidráulica de las mismas, acelerar su corrosión y hacer más difícil el mantenimiento de una concentración residual de desinfectante (KNOBELSDORF, 1997).

Pérdidas de agua

Pueden ser causadas por conexiones ilegales, imprecisiones en los medidores, fugas o fracturas (CONAGUA, 2007d).

Solución de problemas

En la solución de problemas se determinan las acciones necesarias a evitar o corregir los problemas presentados anteriormente. Entre las posibles soluciones se encuentran:

- *Operación mejorada:* Calibración de medidores, establecimiento de presiones de operación en válvulas reguladoras de presión, operación periódica de válvulas, cambios en la estrategia de operación de bombas, telemetría en puntos clave, uso de mapas (baja presión, calidad deficiente del agua, etc.) y la posibilidad de sobreponerlos, uso de un programa de redes calibrado y una base de datos con características de análisis, mantenimiento de registros (incluyendo su revisión, interpretación y condensación en gráficas globales y resúmenes), etc.
- *Mantenimiento preventivo (rutinario):* Limpieza, prueba y adecuación de los componentes del sistema para que operen con máxima eficiencia evitando fugas (válvulas, bombas, tanques, y tuberías), inhibición de la corrosión, desagüe en puntos clave, etc.
- *Mantenimiento correctivo:* Reparación de componentes dañados, detección y reparación de fugas y fracturas, etc.
- *Adiciones:* Instalación de medidores, construcción de anclajes, instalación de válvulas de admisión-expulsión de aire y desagües, cloración en puntos apropiados (evita crecimientos bacterianos), etc.
- *Mejoras:* Reemplazos de tuberías por otras de mayor diámetro o instalación de tuberías paralelas, cierre de circuitos, construcción de almacenamientos adicionales, instalación de estaciones de bombeo adicionales (o bombas de mayor potencia), divisiones en zonas de presión, control de transitorios (válvulas de cierre lento en instalaciones de bombeo, etc.), mejoramiento de procedimientos constructivos, etcétera (CONAGUA, 2007d).

2.1.3 Clasificación de flujo

Existen diferentes criterios para clasificar un flujo. Este puede ser permanente o no permanente; uniforme o no uniforme; tridimensional, bidimensional o unidimensional; laminar o turbulento; incompresible o compresible; rotacional o irrotacional; etcétera. Aunque no son los únicos, sí son los flujos más importantes que clasifica la ingeniería (SOTELO, 1997).

Flujo laminar

La clasificación de los flujos en laminar y turbulento es un resultado propiamente de la viscosidad del fluido; y no habría distinción entre ambos en ausencia de la misma. El flujo laminar (Figura 6) se caracteriza porque el movimiento de las partículas se produce siguiendo trayectorias separadas perfectamente definidas

(no necesariamente paralelas) sin existir mezcla macroscópica o intercambio transversal entre ellas (SOTELO, 1997).

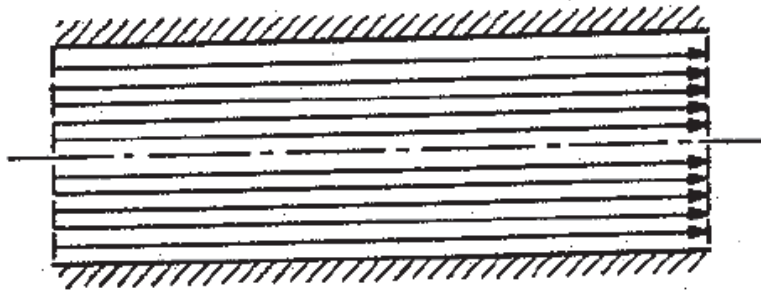


Figura 6. Esquema del flujo laminar. FUENTE: SOTELO, 1997.

Las bajas velocidades del flujo son frecuentes en las redes de distribución, debido a muchos factores, entre los cuales destacan la variación de la demanda dentro del día, el requerimiento de un diámetro mínimo en el diseño, y el sobredimensionamiento de la red que a veces se practica con vistas a cubrir demandas futuras (TZATCHKOV, 2014).

Hansen- Rodríguez (1997), reporta que en un 66% de las tuberías de la red se tienen velocidades muy bajas que tienden a un flujo laminar. Es importante entonces considerar la dispersión en la modelación del transporte de contaminantes en las redes de distribución (TZATCHKOV, 2014).

Flujo turbulento.

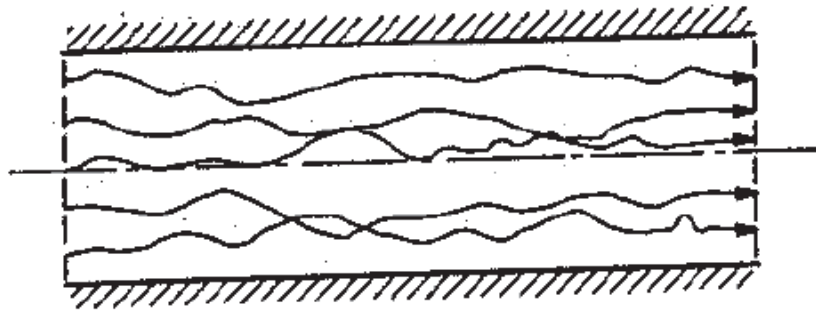


Figura 7. Esquema del flujo turbulento. FUENTE: SOTELO, 1997.

En un flujo turbulento (Figura 7), las partículas se mueven sobre trayectorias completamente erráticas, sin seguir un orden establecido. Existen pequeñas componentes de la velocidad en direcciones transversales a la del movimiento general, las cuales no son constantes sino que fluctúan con el tiempo, de acuerdo con una ley aleatoria, aun cuando el flujo general sea permanente (SOTELO, 1997).

2.1.4 Funcionamiento hidráulico en redes de distribución

El enfoque moderno de la descripción del funcionamiento hidráulico de una red de distribución se basa en análisis estáticos (en un tiempo determinado, usualmente el crítico), dinámicos (en intervalos de tiempo, usualmente de una hora durante un día), de optimación, y de pérdidas o fugas. Tales análisis, realizados generalmente en computadoras, son de gran utilidad durante el proyecto de redes nuevas de distribución, revisiones de redes existentes e incluso de ampliaciones o adecuaciones de redes existentes. (FRANCO, 2006)

Régimen permanente (Análisis estático)

El flujo es permanente si las características en un punto permanecen constantes para cualquier instante; o bien, si las variaciones en ellas son muy pequeñas con respecto a sus valores medios y estos no varían con el tiempo (SOTELO, 1997).

El flujo permanente tiene lugar cuando, en un punto cualquiera, la velocidad de las sucesivas partículas que ocupan ese punto en los sucesivos instantes es la misma. Por tanto, la velocidad es constante respecto del tiempo o bien $\delta V/\delta t=0$, pero puede variar de un punto a otro, es decir, ser variable respecto de las coordenadas espaciales. Este supuesto da por sentado que las otras variables o magnitudes del fluido y del flujo no varían con el tiempo o $\delta p/\delta t=0$, $\delta Q/\delta t=0$, etcétera (Giles *et al.* 1994).

El flujo permanente es más simple de analizar que el no permanente por la complejidad que adiciona el tiempo como variable independiente. Sin embargo, en la práctica el flujo permanente es la excepción más que la regla; no obstante, muchos problemas se pueden estudiar suponiendo que el flujo es permanente, aun cuando existan pequeñas fluctuaciones de velocidad o de otras características con el tiempo, siempre que el valor medio de cualquier característica permanezca constante sobre un intervalo razonable (SOTELO, 1997).

Una red de distribución real no trabaja con flujo permanente, dado que las demandas de agua por parte de los usuarios varían dependiendo de diversos factores entre los que predominan: el número de usuarios, la hora del día, la época del año y el clima de la localidad (FRANCO, 2006).

Aunque existe incertidumbre en el volumen de agua demandado en un cierto instante, se pueden utilizar ciertos criterios para determinar el gasto que pudiera demandarse en la hora y en el día de mayor demanda para una localidad específica en un punto particular de la red. A dicho gasto se le llama “gasto máximo horario”, aunque se acepta que es en el día de máxima demanda (FRANCO, 2006).

La revisión de la red considerando flujo permanente con el gasto máximo horario representa el analizar la red durante un período crítico de funcionamiento, y se

considera que si la red opera satisfactoriamente durante dicho período, es decir, abasteciendo a los usuarios en cantidad y presión suficientes, operará correctamente en general. Para análisis más completos, suelen determinarse los gastos que se requiere conducir por las tuberías bajo condiciones de emergencia (falla de una tubería, incendios, etc.) u otros períodos críticos (FRANCO, 2006).

Régimen no permanente (Análisis dinámico)

Si las características en un punto determinado varían de un instante a otro, el flujo es no permanente (SOTELO, 1997).

En una red de agua potable la demanda varía durante el día, y con ello los niveles en los tanques y la operación de las bombas. Debido a que las variaciones del flujo en la red son lentas, normalmente no es necesario considerar la inercia del flujo y el flujo no permanente puede simularse como una secuencia de estados de flujo permanente con demanda diferente en cada estado (Tzatchkov e Izurieta, 1996).

El periodo de tiempo a analizar se divide en intervalos. Para el inicio de cada intervalo se encuentra una solución de flujo permanente. Esta solución da los gastos que entran y salen de los tanques, que se utilizan para calcular los niveles de agua para el siguiente momento de tiempo. Se obtiene al final una serie de soluciones de flujo permanente que representa la operación de la red en el periodo analizado (Tzatchkov e Izurieta, 1996).

En las redes de tuberías los gastos de demanda son variables a lo largo del día, a ello se debe que cambien los niveles piezométricos y gastos en sus tuberías. Para el estudio de estos cambios se debe tomar en cuenta al tiempo en las ecuaciones de flujo de agua, dando lugar a las llamadas redes dinámicas. Las redes dinámicas permiten simular el flujo en las tuberías. A partir de sus resultados se determina la posibilidad de cumplir con los gastos de demanda, se revisa su comportamiento hidráulico y el tamaño de los tanques, se establecen políticas de operación, etcétera (CONAGUA, 2007d).

2.1.5 Diseño de redes de distribución

El diseño hidráulico se refiere a la selección de los diámetros de las tuberías que forman la red para conducir el fluido hasta los sitios de demanda de modo que se cumpla con restricciones de presión (CONAGUA, 2007d).

Red ramificada

El cálculo de los tramos por el método ramificado puede hacerse determinando en primer lugar el consumo de l/s por metro lineal de tubería, según el número de habitantes a servir por ella, a partir de la ecuación 2.1:

$$Q = \frac{N \cdot D}{3600 h \cdot L} \dots (2.1)$$

Siendo:

- Q Caudal del ramal, en l/s/m
- N Número de habitantes a servir
- D Dotación, en l/h/día
- h Horas de consumo
- L Longitud del ramal, en m

En las arterias que han de abastecer zonas de ampliación se calculará el caudal con la ecuación 2.2:

$$Q = \frac{S \cdot d \cdot D}{3600 h} \dots (2.2)$$

Donde:

- Q Caudal de la arteria, en l/h/día
- S Superficie de la futura ampliación
- D Densidad de la población previsible

(HERNÁNDEZ, 1990).

Red en malla

Cuando la red es mallada, a efectos de cálculo, se considerará la red como ramificada en primera aproximación, para más tarde comprobar el cálculo por cierre de mallas aplicando el método de Hardy-Cross (HERNÁNDEZ, 1990).

El método de Hardy-Cross se basa en dos leyes:

- 1) La suma de los caudales que entran en un nudo de la red es igual a la suma de los caudales que salen.
- 2) Existirá un punto P, en el que las pérdidas de carga por un camino es igual a las pérdidas por el otro camino. O bien, considerando signo a las pérdidas, la suma de pérdidas en una malla cerrada es cero (HERNÁNDEZ, 1990).

El primer paso, al aplicar el método de Hardy-Cross a una red de tuberías, es el de asignar un caudal a cada una de las tuberías de la red. Mediante estos caudales supuestos se calculan las pérdidas de carga en cada tubería; para esto se utiliza generalmente la fórmula de Hazen-Williams (Giles *et al.* 1994).

A continuación se calcula la suma algebraica de las pérdidas de carga en cada lazo de la red de tuberías. (El flujo en el sentido de las agujas de un reloj suele considerarse positivo, produciendo pérdidas de carga positivas; el flujo de sentido contrario a las agujas de un reloj se considera negativo y produce pérdidas de carga negativas). De acuerdo con el segundo principio dado en el apartado de tuberías en paralelo –la pérdida de carga entre dos nudos ha de ser la misma para cada una de las ramas que unan los nudos–, la suma algebraica de las pérdidas de carga a lo largo de cada lazo será cero si los caudales supuestos son los correctos. De aquí, si la suma algebraica de las pérdidas de carga para cada uno de los lazos de la red se anula, los caudales supuestos inicialmente son los correctos y el problema está resuelto (Giles *et al.* 1994).

Sin embargo, la probabilidad de que los caudales supuestos en la primera aproximación sean los correctos es prácticamente nula. Por tanto, el siguiente paso consiste en calcular la corrección de los caudales en cada uno de los lazos de la red, mediante la ecuación 2.3:

$$\Delta = -\frac{\sum(LH)}{n \sum(LH/Q_0)} \dots (2.3)$$

Donde:

Δ	Corrección del caudal de uno de los lazos
$\sum(LH)$	Suma algebraica de las pérdidas de cargas para cada uno de los tramos de tubería que forman el lazo
n	Valor de un coeficiente que depende de la fórmula utilizada para calcular los caudales ($n=1,85$ para la fórmula de Hazen-Williams)
$\sum(LH/Q_0)$	Suma de cada una de las pérdidas de carga dividida por el caudal para cada tramo de tubería del lazo (Giles <i>et al.</i> 1994).

El paso final es aplicar las correcciones de los caudales (una para cada lazo) para ajustar los caudales inicialmente supuestos para cada una de las tuberías, y repetir entero el proceso para corregir de nuevo los caudales. El método se repite hasta que las correcciones (valores de Δ) son nulos o despreciables (Giles *et al.* 1994).

2.1.6 Agua para consumo humano

La norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano- Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”, define el agua para uso y consumo humano como aquella que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos al ser humano.

Las enfermedades relacionadas con la contaminación del agua de consumo tienen una gran repercusión en la salud de las personas. Las medidas destinadas a mejorar la calidad del agua de consumo proporcionan beneficios significativos para la salud. El agua es esencial para la vida y todas las personas deben disponer de un suministro satisfactorio (suficiente, inocuo y accesible). La mejora del acceso al agua potable puede proporcionar beneficios tangibles para la salud. Debe realizarse el máximo esfuerzo para lograr que la inocuidad del agua de consumo sea la mayor posible (OMS, 2006).

Todo sitio de trabajo debe contar con abastecimiento de agua potable, fresca y en cantidad suficiente para las necesidades de bebida, higiene personal, limpieza de pisos, lavado y cocción de alimentos, así como utensilios y locales donde se preparen. Cuando el sistema público de abastecimiento no se encuentra en condiciones de prestar un servicio adecuado, en cantidad o calidad, el establecimiento industrial debe utilizar un sistema particular de abastecimiento, que cumpla con las normas de tratamiento y calidad reglamentarias (IMSS, 1987).

Desinfección

La desinfección es el principal mecanismo para la desactivación o destrucción de organismos patógenos con el fin de prevenir la dispersión de enfermedades transmitidas a través del agua, tanto a los usuarios aguas abajo como al ambiente (EPA, 1999a).

Constituye una barrera eficaz para numerosos patógenos (especialmente las bacterias) durante el tratamiento del agua de consumo y debe utilizarse tanto en aguas superficiales como en aguas subterráneas expuestas a la contaminación fecal. La destrucción de microorganismos patógenos es una operación fundamental que muy frecuentemente se realiza mediante productos químicos reactivos como el cloro (OMS, 2006).

La desinfección residual se utiliza como protección parcial contra la contaminación con concentraciones bajas de microorganismos y su proliferación en el sistema de distribución (OMS, 2006).

El uso de productos químicos desinfectantes en el tratamiento del agua genera habitualmente subproductos. No obstante, los riesgos para la salud que ocasionan estos subproductos son extremadamente pequeños en comparación con los asociados a una desinfección insuficiente, y es importante que el intento de controlar la concentración de estos subproductos no limite la eficacia de la desinfección (OMS, 2006).

El intento de controlar los subproductos de la desinfección (SPD) no debe poner en peligro la desinfección. Puede medirse y controlarse fácilmente la concentración de algunos desinfectantes del agua de consumo, como el cloro, y se recomienda realizar análisis frecuentes si se practica la cloración del agua. (OMS, 2006)

En la etapa de selección de la técnica y el sistema de desinfección se deben tener en cuenta sus características y contrastarlas con las características de la planta, el lugar y la comunidad. Es un buen procedimiento tratar de complementar las mejores condiciones de la técnica y del sistema de desinfección con las de la fuente, lugar, sistema, población y sus características culturales, pero también debe reconocerse que no existe el desinfectante o la técnica que sea igualmente ideal o perfecto, como se puede apreciar en la Tabla 2 (Solsona y Méndez, 2002).

Todas y cada una de ellas pueden sufrir objeciones: que no aniquilan todos los microorganismos, que no sirven para eliminar quistes o parásitos, que no dejan residual en la red, que dependen de productos químicos que no se producen en la comunidad, que producen subproductos de la desinfección, que son más o menos complicadas, más o menos caras o más o menos difíciles de operar (Solsona y Méndez, 2002).

Tabla 2. Ventajas y limitaciones de los sistemas de desinfección primaria. FUENTE: Adaptada de EPA, 2011

Proceso	Ventajas	Limitaciones
Cloración	Su capacidad de desinfección es bien conocida. La tecnología de dosificación está bien establecida.	Los subproductos de la cloración y los problemas de sabor y olor pueden afectar su aceptabilidad. Ineficaz contra <i>Cryptosporidium</i> .
Cloraminción	No hay problemas significativos con respecto a los subproductos de desinfección. Generalmente presenta menos problemas con el sabor y olor en comparación con el cloro.	Comparado con la cloración, es considerablemente menos efectivo. Usualmente no se emplea como desinfectante primario.
Ozono	Es un fuerte oxidante y un desinfectante altamente efectivo comparado con el cloro. Tiene beneficios respecto a la oxidación de microcontaminantes orgánicos (plaguicidas, componentes del sabor y olor).	Los subproductos bromados y el incremento de carbono orgánico asimilable (COA) puede impactar en el recrecimiento en redes de distribución. Equipamiento complejo, de alto consumo energético y de mayor costo en comparación con la cloración. El residual no es lo suficientemente duradero para la distribución.
Dióxido de cloro	Comparado con el cloro puede ser más efectivo a pH elevado, tiene menores problemas de sabor, olor y subproductos.	Como oxidante es más débil que el ozono o que el cloro. La dosis está considerablemente limitada debido a los subproductos inorgánicos (clorato y clorito)
Radiación ultravioleta	Generalmente es altamente efectivo contra protozoarios, bacterias, la mayoría de virus y particularmente para <i>Cryptosporidium</i> . No hay implicaciones significativas en la generación de subproductos.	Menor efectividad contra virus en comparación con el cloro. No genera residual para distribución.

2.1.7 El cloro en la potabilización

Una de las características que hacen tan popular el empleo de cloro se debe a que es un procedimiento económico comparado con otros desinfectantes. Algunos de sus derivados son los hipocloritos de calcio y de sodio que poseen gran poder destructivo sobre los microorganismos presentes en el agua (CONAGUA, 2007c).

El uso de cloro y sus compuestos está ampliamente difundido por las características que se describirán a continuación:

- Alto poder desinfectante: El cloro produce una acción sostenida de desinfección residual.
- Bajo costo: El cloro se presenta a la venta en diferentes formulaciones y presentaciones, relativamente económicas y sencillas de aplicar en el agua.
- Fácil medición: El desinfectante residual del cloro puede medirse fácilmente y ayuda a proteger el agua contra la recontaminación microbiana. Para la cuantificación de cloro residual libre y cloro residual total existen diversos métodos como son: yodométricos, amperométricos y colorimétricos.
- Amplio espectro germicida: Se ha demostrado que reduce los niveles de microorganismos en el agua para uso y consumo humano, particularmente los niveles de organismos que causan enfermedades como: *Vibrio cholerae*, *Salmonella Typha* y otras salmoneras, *Shigella*, entre otras.
- Control de características organolépticas del agua (sabor y olor): La cloración de agua para uso y consumo humano reduce el sabor y olor mediante la oxidación de algunos compuestos que se encuentran presentes de manera natural en el agua como: secreciones de algas y materiales que resultan de la descomposición de materiales. Lo anterior se tiene cuando las concentraciones son adecuadas, sin embargo cuando se presenta sobredosis, se presenta sabor y olor.
- Control químico: Durante el tratamiento, el cloro destruye el ácido sulfhídrico y extrae amoníaco y otros compuestos nitrogenados que dan un sabor desagradable (CONAGUA, 2007c).

Existen problemas en redes que interfieren o desmejoran la desinfección con cloro y se analizan como sigue:

- Cuando el abastecimiento es directo los problemas surgen con la distribución discontinua; la calidad del agua se deteriora debido a la presencia de puntos muertos en las redes, sólo se ven afectados algunos sectores, la turbiedad aumenta y el cloro residual generalmente tiende a cero; además de la existencia de tuberías muy antiguas.
- Cuando el abastecimiento es por almacenamiento, además de la problemática anterior, puede existir un almacenamiento prolongado sin recloración, fallas en el control operacional del almacenamiento (Diagrama 3).
- Con respecto a la distribución de las aguas subterráneas, existen problemas debido a cloradores paralizados ya sea por falta de mantenimiento adecuado, falta de electricidad o falta de stock de cilindros de cloro, condiciones higiénico sanitarias de las casetas de rebombeo ya sea por mala ubicación de las mismas (cercanas a una acequia, infiltraciones por regadío cercano con aguas residuales, o existencia de pozos sépticos en los alrededores) o condiciones que permiten la contaminación por falta de mantenimiento de las mismas (existencia de sumideros, grietas o huecos que permiten la percolación de agua y consiguiente contaminación del subsuelo) (LAZCANO, 2008).

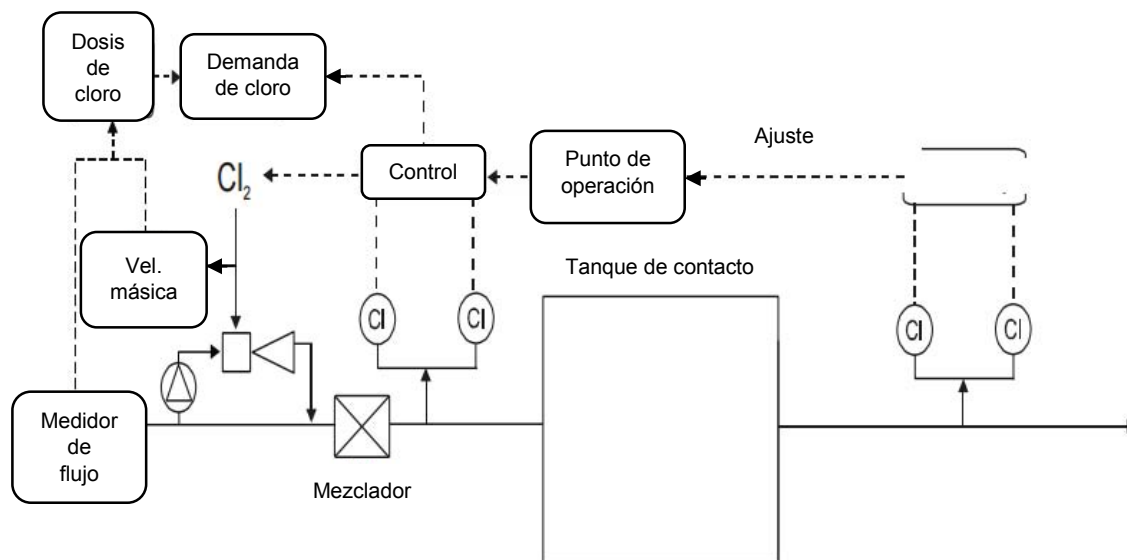


Diagrama 3. Esquema que muestra el control automático de la dosis de cloro, anterior al tanque de contacto.

FUENTE: EPA, 2011

El agua para uso y consumo humano en la UNAM cumple en la mayor parte de los parámetros establecidos en la normatividad nacional (a excepción del cloro

residual) después de la desinfección con hipoclorito de sodio (Diagrama 4) del sistema de almacenamiento y red de distribución (PUMAGUA, 2015).

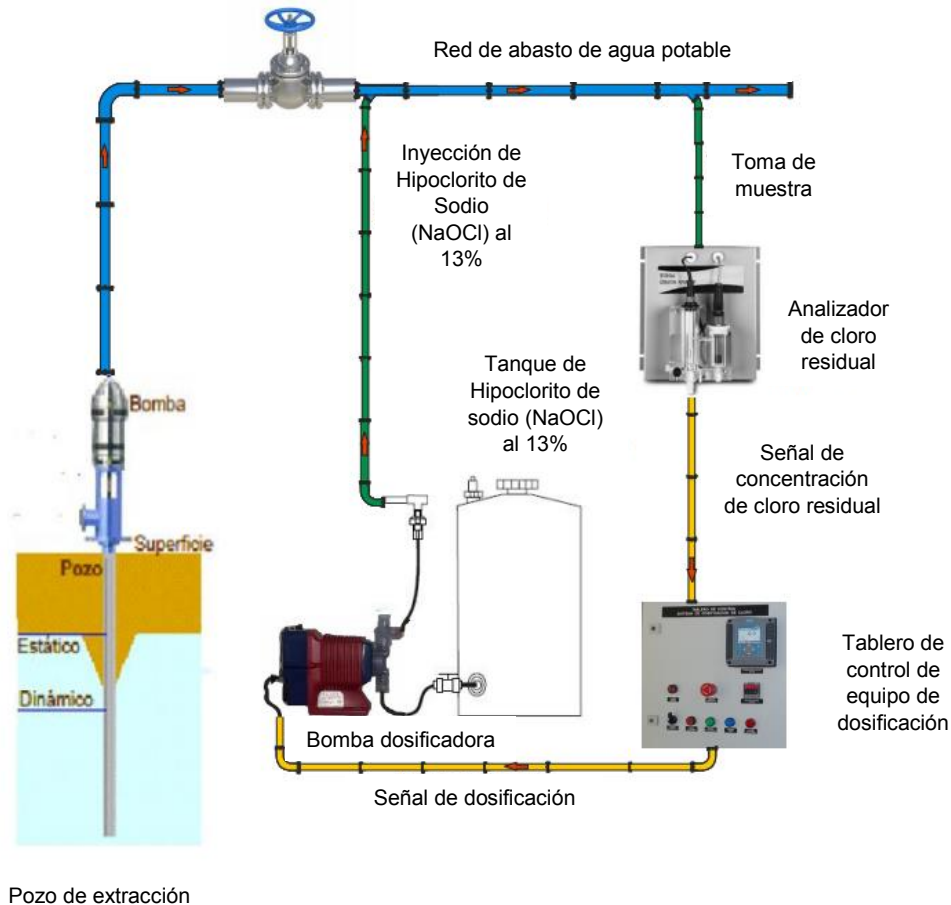


Diagrama 4. Sistema de desinfección en pozo de extracción de Ciudad Universitaria, utilizando NaOCl al 13% como desinfectante. FUENTE: PUMAGUA, 2015.

Subproductos de la desinfección con cloro: trihalometanos

Un inconveniente del cloro es su capacidad de reaccionar con materia orgánica natural y producir trihalometanos y otros subproductos de la desinfección halogenados. Los trihalometanos (THM) y los ácidos haloacéticos son los subproductos de la desinfección más comunes y cuyas concentraciones son mayores en el agua de consumo (OMS, 2006).

Los trihalometanos se forman en el agua de consumo principalmente como consecuencia de la cloración de la materia orgánica presente de forma natural en los sistemas de abastecimiento de agua bruta. La tasa y el grado de formación de trihalometanos aumentan en función de la concentración de cloro y de ácidos húmicos, la temperatura, el pH y la concentración de ion bromuro (OMS, 2006).

El cloroformo es el trihalometano más común y el principal subproducto de la desinfección presente en el agua de consumo clorada. En presencia de bromuros,

se forman preferentemente trihalometanos bromados y las concentraciones de cloroformo disminuyen proporcionalmente (OMS, 2006).

Las pruebas de la genotoxicidad del cloroformo, en su conjunto, han resultado negativas. El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer ha clasificado el cloroformo como posiblemente cancerígeno para el ser humano (Grupo 2B), basándose en la escasez de pruebas de su capacidad cancerígena en el ser humano y en la existencia de pruebas suficientes de su capacidad cancerígena en animales de experimentación (OMS, 2006).

El bromodiclorometano es también un trihalometano subproducto de la desinfección con cloro. El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer ha clasificado el bromodiclorometano en el Grupo 2B (posiblemente cancerígeno para el ser humano). La exposición al BDCM también se ha relacionado con un posible aumento de los efectos sobre la función reproductora (mayor riesgo de aborto espontáneo o mortinatalidad) (OMS, 2006).

2.2 El ozono en el tratamiento de agua para consumo humano

2.2.1 Historia del ozono como desinfectante

La capacidad del ozono para desinfectar agua contaminada fue reconocida en 1886 por el francés de Meritens. Años más tarde, la firma alemana Siemens & Halske, construyó la primera planta piloto en Martinikenfelde, Alemania, donde se demostró la efectividad del ozono como desinfectante contra bacterias (Langlais *et al.* 1991).

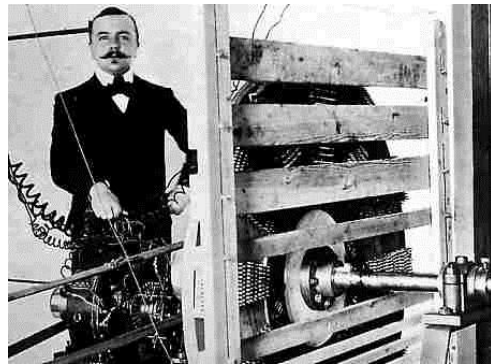


Ilustración 9. Marius Paul Otto. Recuperado de: <http://www.lenntech.com/library/ozone/history/ozone-history.htm>

En 1897, el químico francés Marius Paul Otto (Ilustración 9) creó la primera compañía especializada en la manufactura e instalación del equipo de ozono, que en 1919 se registra como Compagnie Générale de l'Ozone, asociando la aplicación de ozono con el tratamiento de agua para consumo humano. La primera aplicación a gran escala se llevó a cabo en Oudshoorn (Países Bajos), y hacia 1914 se registra un rápido crecimiento de instalaciones. No obstante, dicho crecimiento se vio disminuido durante la primera guerra mundial por el descubrimiento de gases de bajo costo como cloro y su uso como agente desinfectante (Langlais *et al.* 1991).

Este crecimiento en el uso del ozono disminuyó en la primera parte del siglo cuando la investigación en gases venenosos realizada durante la primera guerra

mundial condujo al desarrollo de cloro a bajo costo. En muchas partes del mundo, esto estimuló el uso de cloro como desinfectante y contuvo la propagación del uso de ozono (Langlais *et al.* 1991).

Todas estas plantas de primera generación, la mayoría de las cuales estaban ubicadas en Francia, usaban ozono como desinfectante. Adicionalmente, se dieron cuenta muy pronto de las mejoras en sabor y olor que acompañaban a la desinfección de agua con ozono (Langlais *et al.* 1991).

En países como Francia y Estados Unidos gran parte de plantas las plantas de potabilización utilizan ozono como agente desinfectante entre otras aplicaciones tales como mejoras en sabor y color del agua, remoción de hierro y manganeso, remoción de microcontaminantes, como ayuda de en la coagulación, algas y remoción de subproductos de desinfección.

El ozono es un gas inestable de color azul y olor picante característico cuya fórmula molecular es O_3 . Es uno de los oxidantes más fuertes que es usado como desinfectante, es poco soluble en agua y se mantiene en solución durante algunos minutos después de su aplicación.

La ozonización se considera la tecnología de mayor eficiencia para eliminar prácticamente todo tipo de patógenos incluyendo parásitos como huevos de helminto. Es efectivo a bajas dosis y tiempos cortos de exposición, a diferencia del cloro, el ozono ataca la membrana celular de bacterias provocando la ruptura de la misma. Es altamente efectivo con virus y es recomendado sobre todo en aguas con alto nivel de contaminación. Dentro de las principales limitantes que tiene para su aplicación en su elevado costo además de requerir de personal especializado para la operación de los sistemas de ozonización. El consumo de energía eléctrica es de alrededor de 30 kW/h por kilo de ozono (CONAGUA, 2007b).

El ozono puede ser aplicado como pretratamiento (pre-ozonación), tratamiento intermedio (oxidación) o tratamiento final (desinfección). En el primer caso se usa para remover hierro y manganeso, para oxidar la materia orgánica precursora de formación de subproductos de desinfección con cloro, y mejora de la coagulación-floculación. Como etapa intermedia para la remoción de microcontaminantes y como etapa final como desinfectante.

Uno de los factores que ha contribuido al incremento del empleo del ozono en la potabilización ha sido la determinación de la toxicidad del cloroformo y otros THM (trihalometanos) a mediados de los años setenta, así como la comprobación de su formación por la cloración de aguas con presencia de materia orgánica (Lawrence y Capelli, 1977 en Bataller *et al.* 2010). En 1979 la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) estableció como nivel máximo 100 μg de THM totales por litro de agua, lo cual implicó la búsqueda de alternativas para

su control. En la década de los ochenta se incrementaron las investigaciones al respecto; destaca la aplicación del ozono como etapa de pre-ozonización en la planta potabilizadora de Los Angeles (Duane y Georgeson, 1987 en Bataller *et al.* 2010).

La escasez y deterioro creciente de fuentes de agua a nivel mundial ha obligado al empleo de fuentes de abasto de menor calidad, y consecuentemente el uso de métodos de desinfección cada vez más efectivos que para garantizar la calidad del agua y evitar riesgos a la salud. El ozono es capaz de inactivar patógenos resistentes al cloro, como *Giardia* y *Cryptosporidium*, sin generar compuestos tóxicos (Roustan *et al.* 1991, Zhou y Smith 1994). Aunado a lo anterior, la oxidación de compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en agua ha permitido reducir los costos de inversión y operación de otras etapas del proceso de potabilización (Bohme 1999, Rice 1999 en Bataller *et al.* 2010).

Otro aspecto ha sido el desarrollo de la tecnología de generación de ozono. Cada vez se dispone de equipos generadores de ozono más eficientes que permiten alcanzar concentraciones en el gas de 10 a 15 % en peso. Son equipos más compactos, consumen menos energía y con mayor grado de automatización, lo cual ha permitido producir ozono en condiciones de competencia con el cloro y otros agentes desinfectantes (Ozonek *et al.* 1997, Motret *et al.* 1998, Bohme 1999, Larocque 1999, Rakness 2007, en Bataller *et al.* 2010).

Las plantas potabilizadoras que emplean ozono aumentaron en EUA y Canadá a partir de la regulación de THM de la USEPA (Rice 1999). En Europa se ha observado la misma tendencia; sin embargo, hay que destacar que –a diferencia de Norteamérica– un mayor número de plantas emplean la ozonización desde principios del pasado siglo, fundamentalmente Francia, que en 1961 ya contaba con 500 instalaciones (Larocque 1999, Rice 1999 en Bataller *et al.* 2010). A nivel mundial, la mayoría de las instalaciones con ozonación son utilizadas para el tratamiento de agua potable. Actualmente, en Estados Unidos existen 250 plantas que incluyen nuevas y modificadas para adicionar este proceso. En 1997 había 604 en Alemania y en Bélgica, hoy en día, se considera que la ozonación es indispensable, por lo que se está incluyendo en todas las instalaciones existentes. En países en vías de desarrollo, el incremento ha sido más discreto: México y Argentina disponen de plantas potabilizadoras con empleo del ozono (León, 2002). En México, el ozono se ha comenzado a aplicar como oxidante en plantas pequeñas de potabilización con problemas de alta contaminación orgánica y de color (CONAGUA, 2007b).

Desactivación logarítmica

De acuerdo a la USEPA, el principal objetivo de la ozonación en un gran número de plantas de tratamiento es alcanzar la desactivación logarítmica de virus, *Giardia* y *Cryptosporidium* a niveles por debajo de lo establecido por los estándares de

calidad. Para la elección de los criterios de desinfección, existen diferentes estándares de calidad internacional para la operación de sistemas de ozonización. La USEPA establece que para agua de consumo humano se deben de alcanzar remociones de 3-log y 4-log para *Giardia* y virus respectivamente. Además, es necesario alcanzar para *Cryptosporidium* una desactivación 2-log en los casos en los que se encuentra una concentración mayor a 1.0 quistes/l o una desactivación 1-log para sistemas con una concentración menor a esta (Nava y Olivares, 2011).

La desactivación logarítmica se utiliza comúnmente para reportar la eficiencia de desinfección en los procesos de tratamiento de agua. Una desactivación 1-log representa una remoción del 90% de los patógenos presentes, una desactivación 2-log representa una remoción del 99% y así sucesivamente. La relación entre porcentaje de remoción y desactivación log se puede calcular con la ecuación 2.4:

$$\%d = \left(1 - \frac{1}{10^x}\right) \cdot 100 \quad \dots (2.4)$$

Donde:

%d Porcentaje de remoción

x Desactivación logarítmica del microorganismo

(Nava y Olivares, 2011)

Cabe mencionar que los sistemas de tratamiento previos a la(s) etapas de desinfección pueden alcanzar una remoción log de tal manera que la remoción requerida por los sistemas de desinfección sea menor a la establecida por la USEPA. Por otra parte, los estándares de la Unión Europea establecen que es necesario mantener una concentración residual de ozono de 0.4 mg/l a lo largo de un tiempo de contacto de 4 minutos para asegurar una desinfección adecuada del agua (Nava y Olivares, 2011).

2.2.2 Procesos de los sistemas de ozonización

Los sistemas de ozonización constan de cinco componentes básicos (Diagrama 5): la unidad de preparación de gas (que puede ser tanto aire u oxígeno puro); el generador de ozono, la fuente de energía eléctrica, el contactor y la unidad para la eliminación del gas sobrante. En la mayoría de los casos, además de ozono se añade un desinfectante secundario para asegurar un residual duradero en el sistema de distribución (Solsona y Méndez, 2002).

Concentrador de oxígeno

El propósito del dispositivo de preparación de gas es secar y enfriar el gas que contiene oxígeno. Los generadores del tipo descarga de corona utilizan aire seco

u oxígeno puro como fuente de oxígeno que se va a convertir en ozono (Solsona y Méndez, 2002).

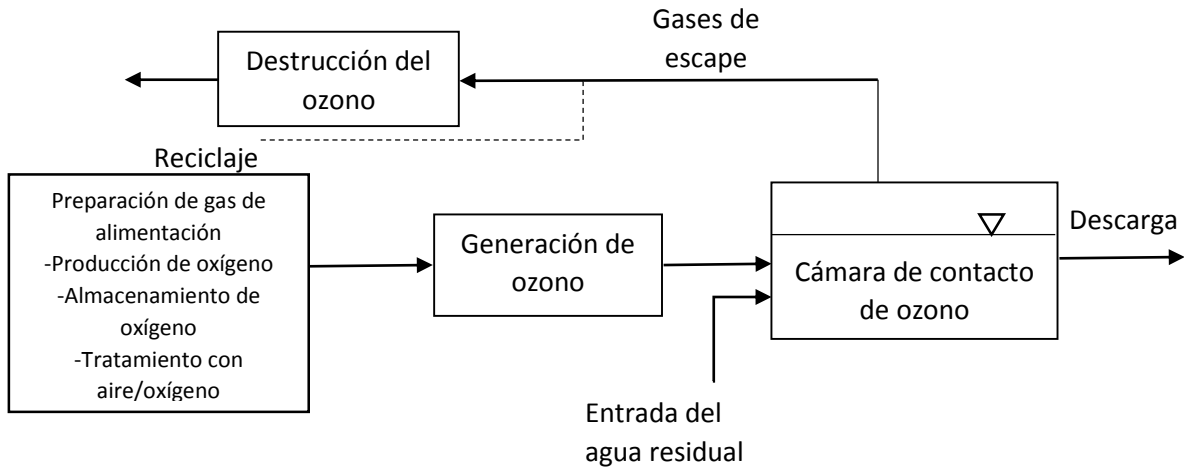


Diagrama 5. Proceso de ozonización. FUENTE: EPA, 1999a

Este equipo elimina el nitrógeno y la humedad de la corriente de aire y distribuye un 90 por ciento o más de corriente de oxígeno seco al generador de ozono para mayores concentraciones de ozono. (SWANCARRA, 2008).

Cuando se utiliza aire, es vital secarlo hasta un punto de condensación de $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$, a fin de maximizar el rendimiento del ozono y reducir al mínimo la formación de óxidos de nitrógeno, que aceleran la corrosión de los electrodos. El aire también se debe enfriar porque el ozono se vuelve a descomponer rápidamente en oxígeno a temperaturas superiores a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Solsona y Méndez, 2002).

Generador de ozono

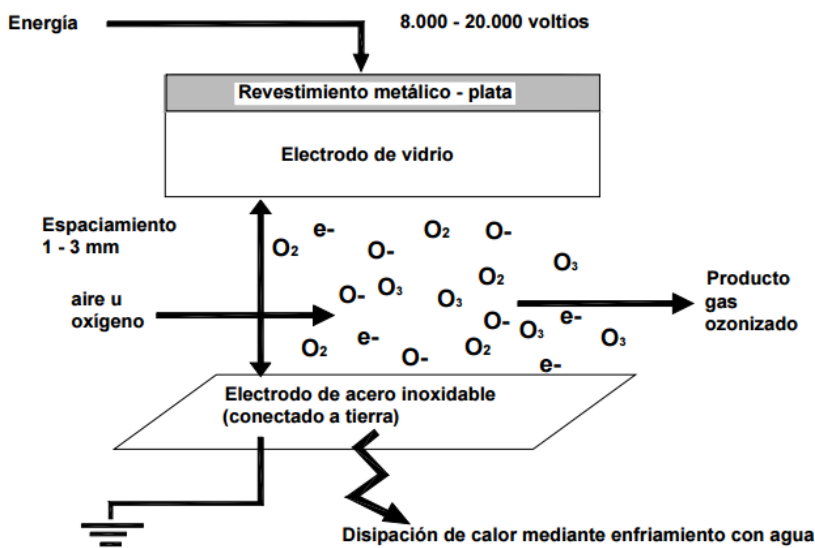


Figura 8. Generador dieléctrico de ozono. FUENTE: Solsona y Méndez, 2002.

La generación de ozono es un proceso de equilibrio en donde las condiciones para la generación también involucran esquemas de reacción para la destrucción (LANGLAIS *et al.* 1991).

Una descarga eléctrica silenciosa, descrita frecuentemente como descarga de corona, se mantiene entre dos electrodos separados por un dieléctrico (es

muy común que sea vidrio, algunas veces un material cerámico) y un espacio con aire aplicando un alto voltaje a través de los electrodos (Figura 8) (LANGLAIS *et al.* 1991).

Se recomienda una buena unidad de descarga de corona de alta frecuencia. Estas unidades son capaces de producir concentraciones de ozono en la corriente de aire de cuatro a seis por ciento por peso. El ozono es creado mientras la corriente de oxígeno viaja a través de la celda dieléctrica de descarga de corona del generador de ozono (LANGLAIS *et al.* 1991).

La carga eléctrica apropiada con la frecuencia correcta creará una concentración de ozono de alta calidad. Generalmente los generadores son clasificados en gramos por hora o libras de O₃ por día, lo cual le permite a un diseñador especificar el generador correcto para una aplicación (SWANCARRA, 2008).

Contactores

El ozono, que siempre está a una relativamente baja concentración en el gas portador, debe ser transferido de la fase gas a la fase líquida para realizar sus funciones en el tratamiento del agua (LANGLAIS *et al.* 1991)

Las unidades de contacto o disolución para proveer ozono para distintas aplicaciones de la ozonación, variarán en términos del tipo, diseño, condiciones de operación, las funciones específicas del ozono en los puntos de aplicación, y el diseño de las cámaras de contacto. En algunos casos el tipo de generador de ozono dictará el tipo de contactor (LANGLAIS *et al.* 1991).

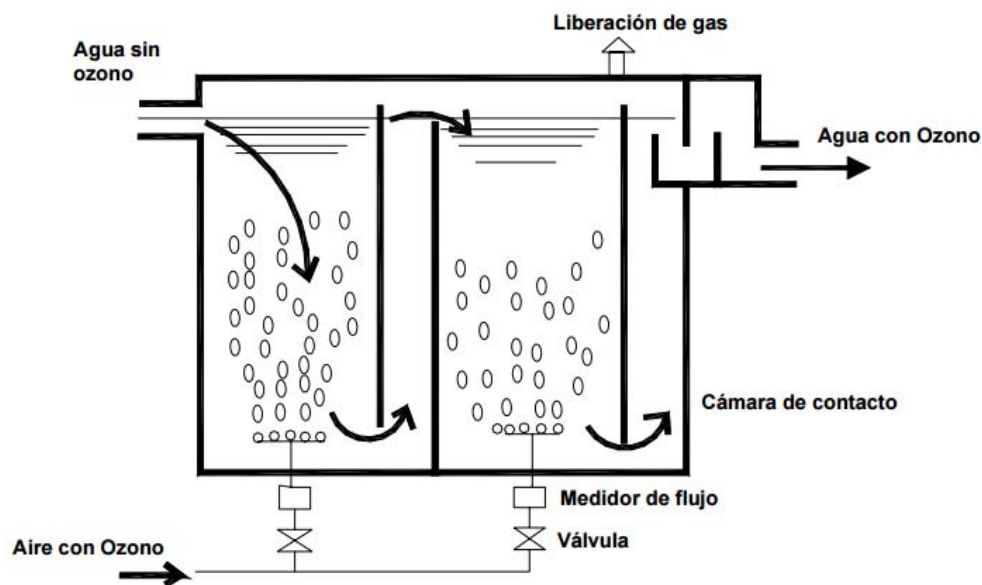


Figura 9. Contactor de cámaras separadas con deflectores y difusores. FUENTE: Solsona y Méndez, 2002.

Un tanque de contacto (Figura 9) de tamaño adecuado es necesario para permitir más gas en la solución. Además permite un tiempo de contacto adecuado para el agua con el ozono para oxidar los contaminantes, o para desinfectar el agua y soltar todo exceso de gas que no entró en la solución (SWANCARRA, 2008).

Dstrucción del ozono sobrante

El personal, equipo, componentes estructurales, y el ambiente en general debe estar protegido de la exposición a altos niveles de ozono. Incluso cuando los gases de escape del contactor sean reinyectados en una cámara de contacto aguas arriba, los gases de escape de esta pueden contener concentraciones que exceden por mucho la concentración máxima permisible de ozono para una jornada de 8 horas de trabajo (LANGLAIS *et al.* 1991).

Con frecuencia, el gas sobrante de ozono se hace recircular a un proceso unitario anterior para mejorar la oxidación o floculación con objeto de utilizarlo al máximo. A pesar de la recirculación, generalmente quedará ozono (sobrante) en el escape de los gases, que se debe destruir o diluir suficientemente por razones de seguridad. En las plantas pequeñas de tratamiento de agua, la dilución con aire puede ser factible, pero en las plantas grandes se utiliza uno de los tres métodos siguientes para destruir el ozono sobrante: 1) descomposición térmica mediante la elevación de la temperatura a más de 300 °C; 2) descomposición catalítica por pasaje a través de metales u óxidos de metal, y 3) la absorción en carbón activado granular húmedo (Solsona y Méndez, 2002).

2.2.3 Equipos de ozonación en línea

El método de contacto por inyección es comúnmente usado en Europa, Canadá y Estados Unidos (EPA, 1999b). El ozono es inyectado en un flujo de agua bajo presión negativa, que es generada en una sección Venturi, jalando el ozono al flujo de agua (Figura 10A). En muchos casos, una parte del flujo total (flujo lateral) es bombeado a una presión mayor para incrementar el vacío disponible para la inyección de ozono. Después de que el ozono es inyectado en el flujo lateral, este es combinado con el resto del flujo total bajo una gran turbulencia para aumentar la dispersión del ozono en el agua (Figura 10B) (EPA, 1999b).

Inyector Venturi

Un inyector de tipo Venturi, bueno y del tamaño apropiado es absolutamente necesario para asegurar la formación de pequeñas burbujas de micro-tamaño cuando la corriente ozonizada de aire es succionada en la corriente del agua de producto. Un arreglo bien diseñado es capaz de atrapar ozono en el agua con una eficiencia del 95 por ciento o más (SWANCARRA, 2008).

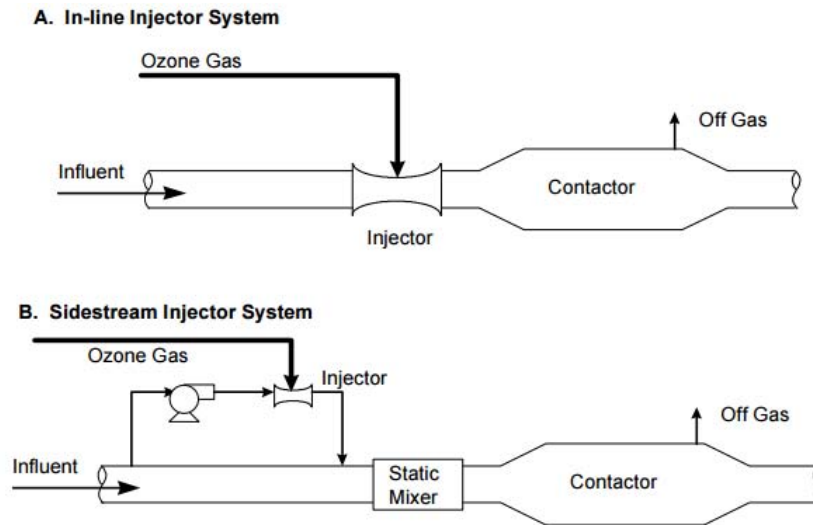


Figura 10. A. Sistema de inyección de ozono en línea y B. Ozonización de corriente lateral. FUENTE: EPA, 1999b.

Contacto atmosférico en línea

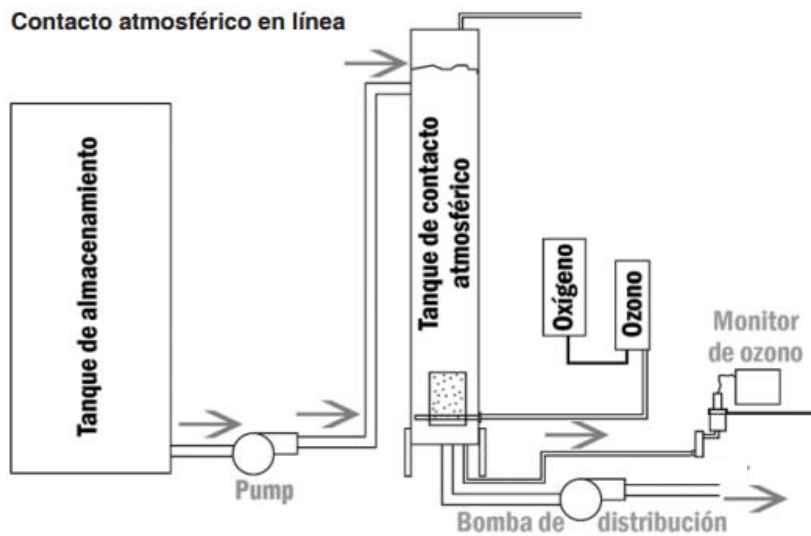


Figura 11. Contacto atmosférico en línea. FUENTE: SWANCARRA, 2008.

Este método de ozonización involucra extraer el agua de producto de los tanques de almacenamiento con una bomba y distribuir el agua a un tanque atmosférico de contacto de acero inoxidable. El ozono es luego introducido al agua ya sea a través

de inyección Venturi en línea con el flujo del agua, o burbujeando al tanque de contacto mediante un difusor. En el tanque de contacto, el agua requiere un tiempo de contacto específico con el ozono para ser tratada efectivamente (SWANCARRA, 2008).

Dos posibles métodos de ozonización del tanque de almacenamiento incluyen la circulación y el burbujeo (SWANCARRA, 2008). La circulación utiliza una pequeña bomba de circulación, un pequeño generador de ozono y un inyector Venturi para crear y atrapar gas de ozono en la corriente de agua que circula hacia el tanque. Al circular el agua, se presume que todo el tanque está expuesto por el volumen de agua que pasa a través de la bomba y el sistema Venturi (SWANCARRA, 2008).

El burbujeo utiliza un pequeño generador de ozono y una bomba de aire para crear gas de ozono y empujarlo a través de una piedra de difusión al tanque de almacenamiento. Cuando se alcanza el nivel deseado de ozono, una bomba separada distribuye agua ozonizada del tanque de almacenamiento a la operación de llenado. El tanque es ozonizado de manera continua a través de cualquier método de procesamiento por lotes que sea utilizado. Esto se hace para mantener un nivel aceptable de ozono (SWANCARRA, 2008).

Contacto de presión en línea

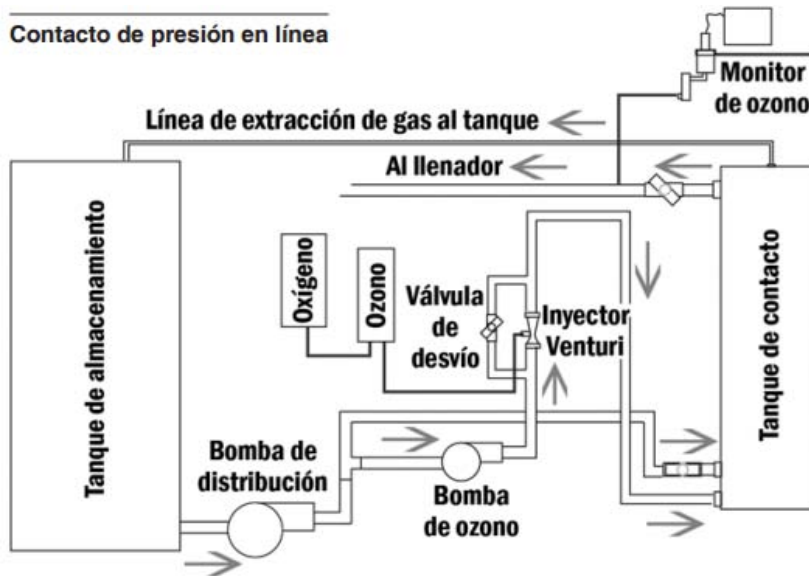


Figura 12. Contacto de presión en línea. FUENTE: SWANCARRA, 2008.

Este método de ozonización es considerado un sistema de tiempo real y puede ser manipulado en una de dos maneras (SWANCARRA, 2008).

El primer método utiliza una bomba para distribuir agua de los tanques de almacenamiento a través de un arreglo de inyección Venturi con una gran cantidad de

desvío a un tanque de contacto presurizado, y luego hacia afuera al llenador. Esto requiere una línea de retorno del llenador a los tanques de almacenamiento. Al escoger el tamaño correcto, podría no ser necesario tener una unidad de monitoreo/ control (SWANCARRA, 2008).

El segundo método utiliza dos bombas. Una bomba principal es utilizada para extraer agua de producto de los tanques de almacenamiento y para empujarla a través del tanque de contacto y hacia la llenadora. Una bomba de menor tamaño es utilizada para impulsar parte de esta agua presurizada a través del inyector Venturi para llevar la cantidad correcta de ozono a la corriente de agua. Las dos corrientes de agua se unen y se mezclan en el tanque de contacto presurizado, en su camino hacia la llenadora. Este método también se conoce como ozonización de corriente lateral (SWANCARRA, 2008).

3. Cálculo del flujo de agua a tratar para la selección del sistema de desinfección con ozono en línea

3.1 Dotación de agua potable

El consumo es la cantidad de agua directamente usada por los consumidores, que genera flujos variables en la red de distribución debido a diversos factores tales como necesidades de los usuarios, clima, capacidad de la fuente, etc. Es la parte del suministro de agua potable que generalmente utilizan los usuarios, sin considerar las pérdidas en el sistema (TRIFUNOVIC, 2006).

Se determina de acuerdo al tipo de usuarios y se clasifica en dos grupos según su uso en: doméstico y no doméstico (Diagrama 6). Se expresa en unidades de $m^3/día$ o $l/día$, o bien cuando se trata de consumo per cápita se utiliza $l/hab/día$ (CONAGUA, 2007a).

Conocer los consumos unitarios de agua, desglosados por tipos de actividad, usuario, o aparato sanitario, es fundamental para operar, equipar o dimensionar correctamente cada componente del servicio de agua (CONAGUA, 2001).

Para fines del proyecto, el consumo a considerar se ubica dentro de los subgrupos, comercial y servicios públicos. El comercial se utiliza en zonas de comercios y servicios por personas que no habitan en ellas (ejemplo: industria, agricultura, instituciones y oficinas, turismo, etc.).

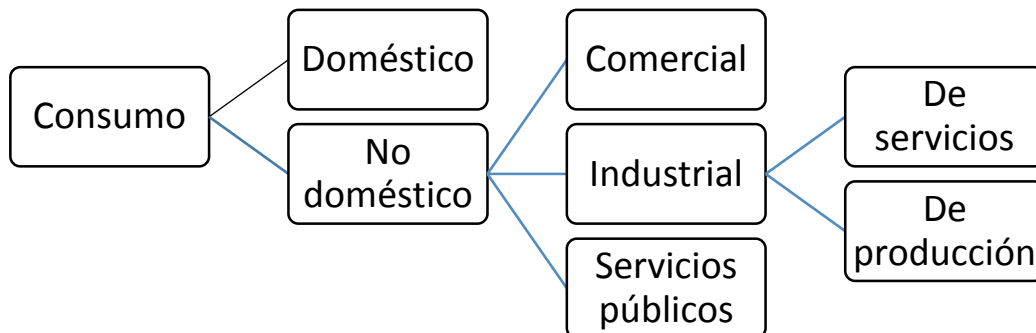


Diagrama 6. Clasificación del consumo de agua. FUENTE: CONAGUA, 2007a.

De acuerdo al tipo de actividad comercial del consumidor, se ha encontrado que los consumos varían de acuerdo a lo indicado en la Tabla 3:

Tabla 3. Consumo mínimo en comercios. FUENTE: CONAGUA, 2007a

Tipo de instalación	Consumo de agua
Oficinas (cualquier tipo)	20 l/m ² /día
Locales comerciales	6 l/m ² /día
Mercados	100 l/local/día
Baños públicos	300 l/bañista/regadera/día
Lavanderías de autoservicio	40 l/kilo de ropa seca
Clubes deportivos y servicios privados	150 l/asistente/día
Cines y teatros	6 l/asistente/día

Se siguió el procedimiento de la Tabla 4, referida a la Norma técnica NT-008-CNA-2001 “Determinación de consumos unitarios de agua potable”

Tabla 4. Catálogo de procedimientos. FUENTE: CONAGUA, 2001

Para obtener	Clave	Grado de complejidad (precisión y confiabilidad)	Equipo, material o información necesarios	Procedimiento y cuidados
Consumo por servicio institucional o comercial brindado	Csb-m	Medio (regular)	Catastro o encuesta de usuarios y prestadores de los diferentes servicios y boletas de consumo de cada actividad	Por: cama de hospital/día; alumno/día; huésped/día; cuarto hotel/día; empleado/día, cliente/día; automóvil/día, pasajero/día; etc.

Número de usuarios

Se revisaron y analizaron las estadísticas y los censos de usuarios registrados en el Instituto de Ingeniería en el periodo 2008-2013 (Tabla 5). Se siguió el procedimiento y recomendaciones de la Norma técnica NT-011-CNA-2001 “Métodos de proyección de población” (Tabla 6).

Se utilizó el método de crecimiento aritmético pues observamos en la estadística de la Tabla 5 que el número de usuarios del Instituto de Ingeniería ha crecido en los últimos años a pesar de que ya tiene tiempo consolidado y que el Instituto no ha expandido su área en Ciudad Universitaria.

La proyección de población usando el método de crecimiento aritmético es apropiada para ciudades establecidas y regiones donde el desarrollo se ha establecido (BRIÉRE, 2011).

Tabla 5. Datos estadísticos obtenidos de los Informes Anuales del IIUNAM, de 2008 a 2013.

Año	Usuarios
2008	836
2009	844
2010	920
2011	1000
2012	1014
2013	1089

Tabla 6. Situaciones típicas de estudio. FUENTE: CONAGUA, 2001.

Caso	Información disponible	Fecha inicial, horizonte, y delimitación geográfica	Otros factores (trascendencia, estructura social, migración, limitantes, etc.)
Caso C-1	No hay proyecciones de CONAPO o similares, pero sí hay censos recientes y acceso a catastros o estadísticas de organismos locales (registro civil, IFE, SEP, CFE, SSA, etc.).	Los datos base corresponden a la misma delimitación geográfica necesaria para el estudio en proceso.	Sólo se quiere el dato de población total, se considera que permanecerá el mismo índice de marginalidad y estructura socioeconómica y movimientos migratorios similares.

- Método aritmético:

El modelo aritmético se basa en un incremento de población constante para incrementos de tiempos iguales, en consecuencia, la velocidad de crecimiento es una constante obtenida a partir de la ecuación 3.1 y que se expresa como la ecuación 3.2:

$$P_n = P_2 + k_a(t_n - t_2) \quad \dots (3.1)$$

$$K_a = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} \quad \dots (3.2)$$

Donde:

- t_n Año para el cual la población es proyectada
- P_n Población proyectada
- P_2 Población conocida en el año t_2

k_a Tasa de crecimiento aritmético

Con los datos de las estadísticas se obtuvo para cada año (de 2008 a 2013) la tasa de crecimiento en todos los edificios del Instituto de Ingeniería. A continuación, se ejemplifica el cálculo para el periodo de 2008 a 2009 usando la ecuación 3.2:

Tabla 7. Número de usuarios del Instituto de Ingeniería de 2008 a 2009. FUENTE: Informes anuales del IIUNAM

Año	Usuarios
2008	836
2009	844

$$K_{a\ 2008-2009} = \frac{844 - 836}{2009 - 2008} = 8$$

Se procedió a determinar la tasa de crecimiento aritmético para los siguientes periodos de los que se tiene información, obteniendo los datos mostrados a continuación:

Tabla 8. Tasas de crecimiento anuales en el IIUNAM, usando método aritmético. FUENTE: Elaboración propia.

Periodo	Tasa de crecimiento (aritmética)
2008-2009	8
2009-2010	76
2010-2011	80
2011-2012	14
2012-2013	75

Se realizó un promedio con los resultados de la Tabla 8 para obtener una tasa de crecimiento aritmética media:

$$k_{a\ media} = \frac{8 + 76 + 80 + 14 + 75}{5} = 51$$

Además de las estadísticas obtenidas de los informes anuales del Instituto de Ingeniería, se consiguieron censos desglosados por tipo de usuario de los años 2009 y 2010 en cada edificio del IIUNAM.

Del censo de 2010 que es el más completo y actualizado que se tiene disponible, se seleccionaron los datos de los edificios de interés (Tabla 9), y a estos se les aplicó la tasa de crecimiento $K_{a\ media}=51$ para obtener una proyección del número de usuarios hasta el año 2025.

3. Cálculo del flujo de agua a tratar para la selección del sistema de desinfección con ozono en línea

Tabla 9. Registro de usuarios en los edificios 1 a 5, 7 y 13 del Instituto de Ingeniería en el año 2010. Fuente: Secretaría Técnica del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Año	Administrativos	Becarios y honorarios	Académicos	Investigadores	Autoridades de confianza	Total
2010	89	372	54	53	8	569

Con estos datos se determinó el número de usuarios proyectado usando la ecuación 3.1 de la siguiente forma:

$$P_{2015} = 569 + 51(2015 - 2010) = 824$$

Con lo que se obtiene un total de 824 usuarios para el año 2015 para los edificios 1 a 5, 7 y 13 del Instituto de Ingeniería. Se pueden observar los resultados obtenidos para el periodo 2015-2025 en la Tabla 10.

Tabla 10. Resumen de cálculo de proyección de usuarios de los Edificios 1 a 5, 7 y 13 del Instituto de Ingeniería. FUENTE: Elaboración propia.

Año	Usuarios
2010	569
2015	824
2020	1079
2025	1334

Para los usuarios de la Torre de Ingeniería se obtuvo una relación de usuarios completa del año 2013, que se trabajó de forma independiente a los datos anteriores. En la Tabla 11 se muestran los resultados del cálculo para el periodo 2015-2025.

Tabla 11. Resumen de cálculo de proyección de usuarios de la Torre de Ingeniería. FUENTE: Elaboración propia.

Año	Usuarios
2013	658
2015	760
2020	1015
2025	1270

Se realizó la suma de los usuarios de los edificios de interés del Instituto de Ingeniería y los de la Torre de Ingeniería para obtener la población de proyecto (Tabla 12) que se muestra a continuación y que representa la cantidad de personas a las que se tendrá que abastecer agua potable de forma cotidiana.

Tabla 12. Población de proyecto. FUENTE: Elaboración propia.

Año	Población
2015	1779
2020	2289
2025	2799

Cálculo de consumo

La estimación fue realizada de acuerdo al procedimiento descrito en el *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento* de la CONAGUA (2007) para casos donde existen estadísticas de consumo.

Para estimar el consumo de agua potable en los edificios del Instituto de Ingeniería, se dispone de una base de datos de lecturas automáticas proporcionadas por el grupo de Balance Hidráulico de PUMAGUA (Tabla 13 a Tabla 16).

Se ordenó primero la información de volúmenes consumidos en períodos mensuales por usuarios totales registrados. Se tomaron en cuenta 5 días laborables a la semana, y 30 días por cada mes:

Número de días laborables al mes = $30 (5)/(7) = 21.43$

Número de días laborables al mes se aproximará a 22.

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo de consumo para los edificios 1 y 7:

De acuerdo a la Tabla 13, en el mes de abril de 2009 hubo un consumo de 99.7 m³ en los Edificios 1 y 7. Se dividió este consumo entre 22 días laborables y se obtuvo que en abril de 2009 se consumieron 4.53 m³/día.

Con los datos de la relación de usuarios en los Edificios 1 y 7, se calculó el consumo per cápita de la siguiente manera:

$$\text{consumo per cápita} = \frac{4.53 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{103 \text{ usuarios}} = 44 \frac{l}{\text{usuario} \cdot \text{día}}$$

De esta forma se obtuvo el consumo per cápita mensual en el periodo 2009-2012. Se promediaron los consumos per cápita mensuales de cada año, obteniendo un consumo per cápita medio para cada año.

Posteriormente se calculó el consumo per cápita medio a partir del promedio aritmético de los consumos medios anuales de 2009 a 2012, que son de los que se tienen datos. A continuación se desarrolló el cálculo para los edificios 1 y 7:

consumo per cápita medio edif. 1 y 7 =

$$\frac{58.2 \frac{l}{\text{usuario} \cdot \text{día}} + 57.4 \frac{l}{\text{usuario} \cdot \text{día}} + 58 \frac{l}{\text{usuario} \cdot \text{día}} + 60.5 \frac{l}{\text{usuario} \cdot \text{día}}}{4}$$
$$\text{consumo medio edif. 1 y 7} = 58.5 \frac{l}{\text{usuario} \cdot \text{día}}$$

Se aplicó el mismo procedimiento para el cálculo de consumo en el resto de los edificios, y una vez obtenido el consumo per cápita medio en cada edificio, se calculó el consumo per cápita medio para todos los edificios de interés, a partir de un promedio aritmético de los consumos medios de cada edificio, con los cálculos de las Tablas 17 a 24:

consumo per cápita medio edif. 1 a 5, 7, 13 y Torre de Ingeniería =

$$\frac{58.5 + 29.6 + 41.5 + 16.8 + 15.8 + 28.9 + 17.3}{7}$$

$$\text{consumo per cápita medio edif. 1 a 5, 7, 13 y Torre de Ingeniería}$$
$$= 25 \frac{l}{\text{usuario} \cdot \text{día}}$$

De esta operación se obtiene un consumo de 25 l/usuario/día, pero se añadirá a esta cifra 2 l/usuario/día considerando que aumentará el consumo de agua para beber por la instalación de bebederos y que este valor es el recomendado diario. Con estas consideraciones, se obtiene un consumo de 27 l/usuario/día.

Se tomó en consideración la existencia de auditorios y espacios en renta para el cálculo del consumo diario en el Instituto de Ingeniería y la Torre de Ingeniería.

Se obtuvo una relación de eventos realizados en el auditorio y salas de la Torre de Ingeniería en el año 2014, obtenida de la página de internet del Instituto de Ingeniería.

El Auditorio “José Luis Sánchez Bribiesca” tiene capacidad para 127 personas y fue sede de 25 eventos en el año 2014, de los que se mantuvo ocupado 32 días.

De acuerdo a información proporcionada por el área de Balance Hidráulico de PUMAGUA, los muebles de baño instalados, tienen las siguientes características:

Taza- Fluxómetro de la marca HELVEX de 4.8 litros por descarga.

Mingitorios de 0.5 litros por descarga de la marca HELVEX.

Llaves de lavabo con descarga de 2 litros por minuto también de la marca HELVEX, mecánicas de pivote.

De acuerdo a esta información, se asumirá que cada usuario de los auditorios hará uso de las instalaciones sanitarias por lo menos una vez, por lo que se considerará un consumo de 6.8 l/asiento/día (en el caso de que se utilice la taza y los lavabos).

Además de las consideraciones anteriores, se agregó al consumo por asiento al día dos litros de agua para beber, lo que suma finalmente un consumo de 8.8 l/asiento/día.

Pérdidas físicas

Las pérdidas físicas se refieren al agua que se escapa por fugas en líneas de conducción, tanques, red de distribución y tomas domiciliarias.

Por lo que se refiere a las pérdidas físicas de agua, su valor se estima a partir de su comportamiento histórico tomando en cuenta los proyectos de mantenimiento y rehabilitación probables, así como el establecimiento de un programa de control de fugas.

En estudios de campo se ha definido que estas pérdidas se determinan a partir de muestreos de inspección y aforo (fugas en tomas domiciliarias); de medición en sectores controlados, llamados distritos hidrométricos (fugas en tuberías principales y secundarias y pérdidas en tomas clandestinas); y de verificación de un grupo de micro medidores domiciliarios (pérdidas por mala medición). Las pérdidas de agua dependen de factores tales como: la presión de trabajo, la calidad de la tubería y los accesorios, el proceso constructivo, el tipo de material, la antigüedad de los elementos del sistema y el mantenimiento preventivo y correctivo que se les practique a los elementos del sistema (CONAGUA, 2007a).

Al respecto el grupo de Balance Hidráulico de PUMAGUA proporcionó una base de datos con el registro de porcentaje de fugas detectado mensual y anualmente. De la Tabla 25 a la Tabla 30 se muestra el análisis de fugas desglosado por año, para cada edificio.

3. Cálculo del flujo de agua a tratar para la selección del sistema de desinfección con ozono en línea

Tabla 13. Registro de consumo de agua mensual en el 2009, para los edificios del Instituto de Ingeniería.
FUENTE: Balance Hidráulico, PUMAGUA (2014).

2009	Consumo (m3/mes)									
	Edificios 1 y 7	Edificio 2	Edificio 3	Edificio 4	Edificio 5	Edificio 6	Edificio 8	Edificio 11	Edificios 12 y 18	Edificio 13
Enero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
Febrero	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
Marzo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
Abril	99.7	61.6	29.1	3.6	85.3	170.1	0.0	0	41.5	0.0
Mayo	136.9	42.1	52.4	15.6	91.9	107.8	0.0	0	97.7	0.0
Junio	149.7	57.8	21.0	17.2	91.1	122.3	0.0	0	93.1	0.0
Julio	72.4	18.6	15.6	9.0	67.3	28.4	0.0	0	114.4	0.0
Agosto	162.8	29.1	25.5	17.5	91.9	43.5	3.0	0	190.3	2.5
Septiembre	94.1	28.2	39.2	17.8	88.0	35.1	40.3	0	100.8	13.0
Octubre	137.4	34.3	13.9	18.2	100.3	23.3	0.1	0	84.2	37.2
Noviembre	175.7	50.8	16.2	19.2	105.8	77.9	39.3	0	100.6	20.7
Diciembre	159.2	25.0	16.3	11.5	67.9	40.1	12.6	0	59.2	8.0

Tabla 14. Registro de consumo de agua mensual en el 2010, para los edificios del Instituto de Ingeniería.
FUENTE: Balance Hidráulico, PUMAGUA (2014).

2010	Consumo (m3)									
	Edificios 1 y 7	Edificio 2	Edificio 3	Edificio 4	Edificio 5	Edificio 6	Edificio 8	Edificio 11	Edificios 12 y 18	Edificio 13
Enero	144.4	37.9	20.1	16.3	95.0	72.3	19.3	0.0	62.9	6.3
Febrero	111.4	35.1	40.5	19.5	91.2	50.8	6.7	0.0	63.1	14.3
Marzo	180.2	81.2	35.1	24.3	96.5	144.2	15.6	0.0	88.0	11.8
Abril	198.4	67.3	29.1	22.9	84.2	153.6	9.8	0.0	86.2	11.1
Mayo	285.0	64.7	31.8	22.3	106.5	173.4	130.7	0.0	75.6	11.8
Junio	139.2	53.7	39.3	18.4	130.2	42.0	-48.8	0.0	70.7	9.0
Julio	67.2	17.9	59.2	12.1	52.4	28.2	-29.5	-122.4	35.1	6.7
Agosto	106.9	29.9	55.5	19.2	84.8	-1.6	49.2	120.4	64.0	9.2
Septiembre	111.4	25.9	47.7	19.7	83.0	37.0	25.7	358.1	50.4	13.3
Octubre	193.8	52.7	34.5	19.0	101.1	88.3	8.3	358.1	63.9	11.5
Noviembre	15.9	64.1	34.6	14.6	94.7	116.9	64.9	471.1	50.7	10.3
Diciembre	7.8	30.1	25.7	10.6	77.8	53.2	33.5	168.4	28.8	7.1

3. Cálculo del flujo de agua a tratar para la selección del sistema de desinfección con ozono en línea

Tabla 15. Registro de consumo de agua mensual en el 2011, para los edificios del Instituto de Ingeniería.
FUENTE: Balance Hidráulico, PUMAGUA (2014).

2011	Consumo (m3)									
	Edificios 1 y 7	Edificio 2	Edificio 3	Edificio 4	Edificio 5	Edificio 6	Edificio 8	Edificio 11	Edificios 12 y 18	Edificio 13
Enero	12.01	42.12	25.31	12.00	84.10	112.71	36.52	280.95	51.85	6.84
Febrero	161.35	75.82	31.70	16.41	107.87	134.77	16.74	397.87	41.32	6.84
Marzo	201.59	70.01	70.71	41.03	131.53	219.70	52.01	532.90	29.14	8.35
Abril	185.79	66.55	-15.28	17.69	102.82	182.09	83.42	355.60	43.27	13.43
Mayo	228.63	92.73	38.89	18.93	127.18	94.34	33.78	806.05	28.96	0.00
Junio	255.01	62.13	51.75	18.08	113.38	247.85	25.62	940.83	33.26	0.00
Julio	61.41	18.39	45.35	8.82	45.59	22.19	35.14	367.10	51.16	6.22
Agosto	94.08	30.54	48.21	22.20	83.59	25.04	47.01	572.90	62.82	6.04
Septiembre	67.33	24.52	51.11	21.68	69.93	76.28	2.21	32.30	28.63	5.89
Octubre	-0.94	19.66	28.34	19.72	62.64	34.82	-30.54	198.00	26.79	6.12
Noviembre	140.28	55.67	61.91	28.27	102.34	94.12	23.16	616.00	42.14	3.58
Diciembre	171.69	40.95	48.88	23.26	82.13	51.60	43.57	264.70	53.09	2.85

Tabla 16. Registro de consumo de agua mensual en el 2012, para los edificios del Instituto de Ingeniería.
FUENTE: Balance Hidráulico, PUMAGUA (2014).

2012	Consumo (m3)									
	Edificios 1 y 7	Edificio 2	Edificio 3	Edificio 4	Edificio 5	Edificio 6	Edificio 8	Edificio 11	Edificios 12 y 18	Edificio 13
Enero	151.5	46.1	42.2	21.2	88.6	139.9	10.9	10.6	55.3	1.9
Febrero	247.1	92.7	49.0	20.3	108.8	57.7	14.3	12.9	49.0	4.1
Marzo	129.5	57.3	50.8	21.9	97.8	152.2	7.8	44.8	45.7	145.5
Abril	275.4	60.9	29.7	15.4	173.8	144.8	57.9	35.3	61.4	0.0
Mayo	261.7	63.3	38.8	16.3	100.4	193.7	103.9	327.9	50.0	0.0
Junio	93.3	32.8	92.9	17.7	51.9	40.7	77.3	190.0	51.4	0.0
Julio	-10.4	21.4	47.2	9.8	27.1	43.0	63.2	130.6	52.8	37.4
Agosto	100.8	34.6	51.8	16.0	65.9	26.5	12.3	444.2	78.6	13.1
Septiembre	38.4	28.8	42.1	15.1	30.7	32.8	19.2	88.5	34.3	21.0
Octubre	89.7	44.4	45.4	17.2	53.1	89.2	-14.9	482.2	47.4	37.3
Noviembre	170.7	47.9	39.4	15.0	77.8	99.2	17.7	649.0	64.5	69.9
Diciembre	96.7	31.9	20.4	9.8	94.0	48.4	31.7	181.8	51.1	44.4

3. Cálculo del flujo de agua a tratar para la selección del sistema de desinfección con ozono en línea

Tabla 17. Cálculo de consumo en Edificios 1 y 7. FUENTE: Elaboración propia.

103 usuarios	Consumo unitario (l/usuario/día)			
	Año	2009	2010	2011
Enero	0.0	63.7	5.3	66.9
Febrero	0.0	49.2	71.2	109.1
Marzo	0.0	79.5	89.0	57.1
Abril	44.0	87.6	82.0	121.5
Mayo	60.4	125.8	100.9	115.5
Junio	66.0	61.4	112.5	41.2
Julio	32.0	29.7	27.1	-4.6
Agosto	71.8	47.2	41.5	44.5
Septiembre	41.5	49.2	29.7	17.0
Octubre	60.6	85.5	-0.4	39.6
Noviembre	77.5	7.0	61.9	75.3
Diciembre	70.2	3.4	75.8	42.7
Consumo medio anual	58.2	57.4	58.0	60.5
Consumo medio	58.5	l/usuario /día		

Tabla 18. Cálculo de consumo en Edificio 2. FUENTE: Elaboración propia

70 usuarios	Consumo unitario (l/usuario/día)			
	Año	2009	2010	2011
Enero	0.0	24.6	27.4	29.9
Febrero	0.0	22.8	49.2	60.2
Marzo	0.0	52.7	45.5	37.2
Abril	40.0	43.7	43.2	39.5
Mayo	27.4	42.0	60.2	41.1
Junio	37.5	34.8	40.3	21.3
Julio	12.1	11.6	11.9	13.9
Agosto	18.9	19.4	19.8	22.5
Septiembre	18.3	16.8	15.9	18.7
Octubre	22.3	34.2	12.8	28.8
Noviembre	33.0	41.6	36.1	31.1
Diciembre	16.2	19.5	26.6	20.7
Consumo medio anual	25.1	30.3	32.4	30.4
Consumo medio	29.6	l/usuario /día		

Tabla 19. Cálculo de consumo en Edificio 3. FUENTE: Elaboración propia.

41 usuarios	Consumo unitario (l/usuario/día)			
	Año	2009	2010	2011
Enero	0.0	22.3	28.1	46.8
Febrero	0.0	44.9	35.1	54.3
Marzo	0.0	38.9	78.4	56.4
Abril	32.2	32.2	-16.9	32.9
Mayo	58.1	35.3	43.1	43.1
Junio	23.3	43.6	57.4	103.0
Julio	17.3	65.6	50.3	52.4
Agosto	28.3	61.6	53.4	57.4
Septiembre	43.5	52.8	56.7	46.7
Octubre	15.4	38.3	31.4	50.3
Noviembre	18.0	38.3	68.6	43.7
Diciembre	18.1	28.5	54.2	22.6
Consumo medio anual	28.2	41.9	45.0	50.8
Consumo medio	41.5	l/usuario /día		

Tabla 20. Cálculo de consumo en Edificio 4. FUENTE: Elaboración propia.

47 usuarios	Consumo unitario (l/usuario/día)			
	Año	2009	2010	2011
Enero	0.0	15.8	11.6	20.5
Febrero	0.0	18.9	15.9	19.7
Marzo	0.0	23.5	39.7	21.2
Abril	3.4	22.1	17.1	14.9
Mayo	15.1	21.6	18.3	15.8
Junio	16.6	17.8	17.5	17.1
Julio	8.7	11.7	8.5	9.4
Agosto	16.9	18.6	21.5	15.5
Septiembre	17.2	19.1	21.0	14.6
Octubre	17.6	18.4	19.1	16.7
Noviembre	18.6	14.1	27.3	14.5
Diciembre	11.1	10.2	22.5	9.4
Consumo medio anual	13.9	17.6	20.0	15.8
Consumo medio	16.8	l/usuario /día		

3. Cálculo del flujo de agua a tratar para la selección del sistema de desinfección con ozono en línea

Tabla 21. Cálculo de consumo en Edificio 5. FUENTE: Elaboración propia

254 usuarios	Consumo unitario (l/usuario/día)			
	Año	2009	2010	2011
Enero	0.0	17.0	15.1	15.8
Febrero	0.0	16.3	19.3	19.5
Marzo	0.0	17.3	23.5	17.5
Abril	15.3	15.1	18.4	31.1
Mayo	16.4	19.1	22.8	18.0
Junio	16.3	23.3	20.3	9.3
Julio	12.0	9.4	8.2	4.9
Agosto	16.4	15.2	15.0	11.8
Septiembre	15.7	14.9	12.5	5.5
Octubre	17.9	18.1	11.2	9.5
Noviembre	18.9	16.9	18.3	13.9
Diciembre	12.2	13.9	14.7	16.8
Consumo medio anual	15.7	16.4	16.6	14.5
Consumo medio	15.8	l/usuario /día		

Tabla 22. Cálculo de consumo en Edificio 13. FUENTE: Elaboración propia

22 usuarios	Consumo unitario (l/usuario/día)			
	Año	2009	2010	2011
Enero	0.0	13.0	14.1	3.9
Febrero	0.0	29.5	14.1	8.5
Marzo	0.0	24.4	17.3	300.6
Abril	0.0	22.9	27.7	0.0
Mayo	0.0	24.4	0.0	0.0
Junio	0.0	18.6	0.0	0.0
Julio	0.0	13.9	12.9	77.2
Agosto	5.1	19.0	12.5	27.0
Septiembre	26.8	27.4	12.2	43.3
Octubre	76.8	23.8	12.6	77.0
Noviembre	42.8	21.2	7.4	144.4
Diciembre	16.5	14.6	5.9	91.7
Consumo anual medio	18.7	21.1	11.4	64.5
Consumo medio	28.9	l/usuario /día		

Tabla 23. Cálculo de consumo en la Torre de Ingeniería. FUENTE: Elaboración propia

658 usuarios	Consumo unitario (l/usuario/día)	
	Año	2013
Enero	21.5	19.1
Febrero	20.3	17.8
Marzo	19.8	19.4
Abril	19.0	17.0
Mayo	18.0	16.3
Junio	20.8	16.5
Julio	15.1	13.0
Agosto	16.6	15.5
Septiembre	14.5	15.8
Octubre	18.3	21.5
Noviembre	18.8	18.1
Diciembre	16.8	15.5
PROMEDIO=	17.5	17.1
Consumo medio=	17.3	l/usuario /día

Tabla 24. Cálculo de consumo del Café Azul y Oro. FUENTE: Elaboración propia

	Consumo (m3/mes)
Enero	75.0
Febrero	74.0
Marzo	70.0
Abril	91.0
Mayo	89.0
Junio	82.0
Julio	35.0
Agosto	105.0
Septiembre	99.0
Octubre	113.0
Noviembre	92.0
Diciembre	50.0
Consumo medio=	81.3 m3/mes

Para fines de esta tesis, a partir de las Tablas 25 a 30, se calculó un promedio anual de fugas, considerando los edificios de interés 1 a 5, 7, y 13. A continuación, se desglosa el cálculo de porcentaje de fugas para el año 2009:

$$\%Fugas = \frac{3.0 + 0 + 34.7 + 0 + 0 + 0}{7} = 5.4\%$$

Con los datos de la columna de porcentaje de fugas de la Tabla 31, se realizó un promedio aritmético para obtener un porcentaje de fugas medio en el periodo 2009 a 2012:

$$\%Fugas = \frac{5.4 + 2.4 + 7.0 + 49.2}{4} = 16\%$$

Obteniendo como resultado un 16% de fugas.

Tabla 25. Reporte de fugas en Edificio 1 y 7. FUENTE: Balance Hidráulico de PUMAGUA, 2014.

Año	Suministro (m ³ /año)	Fugas (m ³ /año)	Consumo (m ³ /año)	Fugas (%)
2009 (abril)	1224.8	37.0	1187.8	3.0
2010	1561.7	0.0	1561.7	0.0
2011	1670.8	92.6	1578.2	5.5
2012	2215.3	571.0	1644.3	25.8

Tabla 26. Reporte de fugas en Edificio 2. FUENTE: Balance Hidráulico de PUMAGUA, 2014.

Año	Suministro (m ³ /año)	Fugas (m ³ /año)	Consumo (m ³ /año)	Fugas (%)
2009 (abril)	347.4	0	347.4	0.0
2010	560.3	0	560.3	0.0
2011	599.1	0	599.1	0.0
2012	562.0	0	562.0	0.0

Tabla 27. Reporte de fugas en Edificio 3. FUENTE: Balance Hidráulico de PUMAGUA, 2014.

Año	Suministro (m ³ /año)	Fugas (m ³ /año)	Consumo (m ³ /año)	Fugas (%)
2009 (abril)	351.4	122.1	229.3	34.7
2010	550.8	97.7	453.1	17.7
2011	702.9	216.1	486.9	30.7
2012	971.6	421.8	549.8	43.4

Tabla 28. Reporte de fugas en Edificio 4. FUENTE: Balance Hidráulico de PUMAGUA, 2014.

Año	Suministro (m ³ /año)	Fugas (m ³ /año)	Consumo (m ³ /año)	Fugas (%)
2009 (abril)	129.5	0.0	129.5	0.0
2010	218.9	0.0	218.9	0.0
2011	248.1	0.0	248.1	0.0
2012	195.6	0.0	195.6	0.0

Tabla 29. Reporte de fugas en Edificio 5. FUENTE: Balance Hidráulico de PUMAGUA, 2014.

Año	Suministro (m ³ /año)	Fugas (m ³ /año)	Consumo (m ³ /año)	Fugas (%)
2009 (abril)	789.5	0.0	789.5	0.0
2010	1097.3	0.0	1097.3	0.0
2011	1113.1	0.0	1113.1	0.0
2012	4145.0	3175.2	969.8	76.6

Tabla 30. Reporte de fugas en Edificio 13. FUENTE: Balance Hidráulico de PUMAGUA, 2014.

Año	Suministro (m ³ /año)	Fugas (m ³ /año)	Consumo (m ³ /año)	Fugas (%)
2009 (abril)	81.3	0.0	81.3	0.0
2010	122.3	0.0	122.3	0.0
2011	66.2	0.0	66.2	0.0
2012	374.5	0.0	374.5	0.0

Tabla 31. Resultado de cálculo de promedio anual de fugas para los Edificios 1, 2, 3, 4, 5, 7 y 13. FUENTE: Elaboración propia.

Año	Fugas (m ³)	Fugas (%)
2009	159.0	5.4
2010	97.7	2.4
2011	308.7	7.0
2012	4168.0	49.2

Demanda

Se define como la cantidad de agua requerida por una localidad completa, una parte de ella, sector industrial, o industria específica, para facilitar las actividades (domésticas, comerciales, industriales, turísticas, etc.) que ahí tienen lugar (CONAGUA, 2007a)

Siguiendo el procedimiento descrito por CONAGUA, en este trabajo se usó la ecuación 3.3 para estimar la demanda de agua potable a futuro:

$$Demanda = \frac{Consumo}{\left(1 - \frac{(\%)Pérdidas}{100}\right)} \dots (3.3)$$

A continuación, se desarrolló el cálculo de la demanda para los edificios 1 a 5, 7, 13 y Torre de Ingeniería para el año 2015, a partir de la ecuación 3.3:

$$Demanda = \frac{27 \frac{l}{usuario \cdot día} \cdot 1779 usuarios}{\left(1 - \frac{16\%}{100}\right)} = 47.1 \frac{m^3}{día}$$

Analizando los reportes de PUMAGUA, se observó que las fugas en el área de estudio son de baja magnitud, sumado a esto las acciones que se han tomado para el control de las pérdidas físicas en Ciudad Universitaria, los objetivos y la visión del grupo de trabajo PUMAGUA, para el cálculo de la demanda se consideró que el porcentaje de fugas disminuirá un 0.5% anual dentro de los próximos años, para llegar a un 11% de pérdidas de agua en el 2025.

Se estima que en localidades donde se tenga implementado un programa de detección y control de fugas, se puede aspirar a reducir el porcentaje de fugas entre el 1% y el 2% anualmente (CONAGUA, 2007a).

En la Tabla 32 se muestran los resultados obtenidos a partir de la ecuación 3.3 para el periodo en análisis:

Tabla 32. Resumen de cálculo de demanda de agua para los Edificios 1 a 5, 7, 13 y Torre de Ingeniería. FUENTE: Elaboración propia.

Datos	Año		
	2015	2020	2025
Número de usuarios	1584	2094	2604
Consumo de agua (m ³ /día)	42.8	56.5	70.3
Pérdidas (%)	16	13.5	11
Demanda de agua (m ³ /día)	50.9	65.4	79.0

Dotación

Se entiende por dotación la cantidad de agua que se asigna para cada habitante y que incluye el consumo de todos los servicios que realiza en un día medio anual, tomando en cuenta las pérdidas. Se expresa en litros/habitante/día. Esta dotación es una consecuencia del estudio de las necesidades de agua de una población,

quien la demanda por los usos siguientes: para saciar la sed, para el lavado de ropa, para el aseo personal, la cocina, para el aseo personal, la cocina, para el aseo de la habitación, para el riego de calles, para los baños, para usos industriales y comerciales, así como para el uso público (HERNÁNDEZ, 2001).

De acuerdo a la CONAGUA, se calcula como el cociente de la demanda entre el número de usuarios proyectado, como se muestra en la siguiente relación:

$$Dotación = \frac{Demanda}{Número\ de\ usuarios\ proyectado} \dots (3.4)$$

En la Tabla 33 se presenta un resumen de los cálculos realizados en este capítulo y la dotación obtenida utilizando la ecuación 3.4 para el periodo 2015-2025:

Tabla 33. Resumen de cálculo de dotación para los Edificios 1 a 5, 7, 13 y la Torre de Ingeniería. FUENTE: Elaboración propia.

Datos	Año		
	2015	2020	2025
Número de usuarios	1584	2094	2604
Consumo de agua (m ³ /día)	42.8	56.5	70.3
Pérdidas (%)	16	13.5	11
Demanda de agua (m ³ /día)	50.9	65.4	79.0
Dotación (l/usuario/día)	32.1	31.2	30.3

3.2 Gasto de diseño

Los gastos de diseño para el estudio y elaboración de un proyecto de abastecimiento de agua potable son:

Gasto medio diario anual

Cantidad de agua requerida por un habitante en un día cualquiera del año de consumo promedio (HERNÁNDEZ, 2001). Expresado en l/s y se calculará con la ecuación 3.5:

$$Q_m = \frac{D \cdot P}{86\ 400} \dots (3.5)$$

Donde:

- Q_m Gasto medio diario anual, en l/s
- D Dotación, en l/hab/día
- P Población, en hab

Variación de la demanda

Los requerimientos de agua para un sistema de distribución no son constantes durante el año, ni el día, sino que la demanda varía en forma diaria y horaria. Debido a la importancia de estas fluctuaciones para el abastecimiento de agua potable, es necesario obtener los gastos máximo diario y máximo horario, los cuales se determinan multiplicando el coeficiente de variación diaria por el gasto medio diario y el coeficiente de variación horaria por el gasto máximo diario respectivamente (CONAGUA, 2007a).

Para fines de este trabajo, se usarán los coeficientes de variación diaria y horaria reportados por la CONAGUA, los cuales se indican en la Tabla 34.

Tabla 34. Coeficiente de variación diaria y horaria. FUENTE: CONAGUA, 2007a

Concepto	Valor
Coeficiente de variación diaria (C_{VD})	1.40
Coeficiente de variación horaria (C_{VH})	1.55

Gasto máximo diario

El consumo medio anual sufre variaciones en más y en menos, pues hay días que por la actividad, la temperatura u otra causa, se demanda un consumo mayor que el medio anual; este consumo se estima que fluctúa entre 120% para lugares de clima uniforme y de 130% para clima variable, pero en poblaciones pequeñas llega a 200% en general, en la República Mexicana el máximo consumo se registra entre mayo y julio. Al máximo consumo diario se le llama gasto máximo diario (HERNÁNDEZ, 2001).

Se calculará afectando al gasto medio diario anual por un coeficiente de variación diaria de acuerdo con la ecuación 3.6:

$$Q_{MD} = Q_m \cdot C_{VD} \quad \dots (3.6)$$

Donde:

- Q_{MD} Gasto máximo diario, en l/s
- Q_m Gasto medio diario anual, en l/s
- C_{VD} Coeficiente de variación diaria

Gasto máximo horario

Este gasto sufre variaciones en las diferentes horas del día, por lo que en el día de mayor consumo lo que interesa es saber en qué horas de las 24 se requiere mayor gasto. Se ha observado que en las horas de mayor actividad se alcanza hasta un 150% de gasto máximo diario y el coeficiente con el que se afecta al

gasto máximo diario se llama coeficiente de variación horaria cuyo valor es de 1.5, gasto que se toma como base para el cálculo del volumen requerido para la población en la hora de máximo consumo (HERNÁNDEZ, 2001).

Se calculará afectando al gasto máximo diario por un coeficiente de variación horaria de acuerdo con la ecuación 3.7:

$$Q_{MH} = Q_{MD} \cdot C_{VH} \dots (3.7)$$

Donde:

- Q_{MH} Gasto máximo horario, en l/s
- Q_{MD} Gasto máximo diario, en l/s
- C_{VH} Coeficiente de variación horaria

Para ejemplificar se estimó el gasto máximo diario del Café Azul y Oro, que pertenece a la Torre de Ingeniería pero se calculó por separado porque tiene características diferentes a los otros espacios de este edificio, para lo cual primero se obtuvo el gasto medio diario Q_m a partir de la ecuación 3.5, usando el consumo medio de 81.3 m³/mes obtenido en la Tabla 24:

$$Q_m = \frac{81.3 \frac{m^3}{mes}}{22 \frac{día}{mes}} = 3.7 \frac{m^3}{día}$$
$$Q_m = 3.7 \frac{m^3}{día} \left(\frac{1000 l}{1 m^3} \right) \left(\frac{1 día}{86400 s} \right) = 0.04 \frac{l}{s}$$

Después, se hizo el cálculo del gasto máximo diario Q_{MD} con la ecuación 3.6, para lo cual se usó el gasto medio obtenido y el coeficiente de variación diaria de la Tabla 34:

$$Q_{MD} = 0.04 \frac{l}{s} \cdot 1.4 = 0.056 \frac{l}{s}$$

Para los auditorios y espacios en renta de mayor uso en el Instituto de Ingeniería y la Torre de Ingeniería, se calculó un gasto medio a partir del consumo de 8.8 l/asiento/día obtenido anteriormente. Por ejemplo, el cálculo del gasto para abastecer al Auditorio “José Luis Sánchez Bribiesca”, con capacidad para 127 personas cómodamente sentadas y que fue sede de 25 eventos durante el año 2014, de los cuales estuvo ocupado 32 días, se detalla a continuación:

3. Cálculo del flujo de agua a tratar para la selección del sistema de desinfección con ozono en línea

$$Q_m = 8.8 \frac{l}{\text{asiento} \cdot \text{día}} \cdot 127 \text{ asientos} = 1117.6 \frac{l}{\text{día}}$$

$$Q_m = 1117.6 \frac{l}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ s}} = 0.013 \frac{l}{s}$$

$$Q_{MD} = 0.013 \frac{l}{s} \cdot 1.4 = 0.018 \frac{l}{s}$$

De tal forma se realizó el mismo cálculo para los edificios 1 a 5, 7, 13 y Torre de Ingeniería. Se muestra el resumen de los resultados obtenidos en la Tabla 35.

Los datos usados para el cálculo del gasto máximo diario del Café Azul y Oro y el resumen del cálculo para los espacios en renta y auditorios se resumen en las Tablas 36 y 37 respectivamente.

Tabla 35. Resumen de cálculo de gasto de diseño para los edificios 1 a 5, 7, 13 y Torre de Ingeniería. FUENTE: Elaboración propia.

Datos	Año		
	2015	2020	2025
Número de usuarios	1584	2094	2604
Consumo de agua (m ³ /día)	42.8	56.5	70.3
Pérdidas (%)	16	13.5	11
Demanda de agua (m ³ /día)	50.9	65.4	79.0
Dotación (l/usuario/día)	32.1	31.2	30.3
Gasto medio diario (l/s)	0.6	0.8	0.9
Gasto máximo diario (l/s) (C _{VD} =1.4)	0.8	1.1	1.3

Tabla 36. Resumen de cálculo de gasto de diseño para el Café Azul y Oro. FUENTE: Elaboración propia.

Datos	
Consumo de agua (m ³ /día)	3.7
Pérdidas (%)	16
Demanda de agua (m ³ /día)	4.4
Dotación (l/comensal/día)	29.4
Gasto medio diario (l/s)	0.1
Gasto máximo diario (l/s) (C _{VD} =1.4)	0.1

Tabla 37. Resumen de cálculo de gasto de diseño para los auditorios y espacios en renta de mayor uso en el Instituto de Ingeniería y la Torre de Ingeniería. FUENTE: Elaboración propia.

Auditorios y espacios en renta	Capacidad	Días que estuvo en uso (2014)	Gasto medio (l/s)	Gasto máximo diario (l/s) $C_{VD}=1.4$
Auditorio "José Luis Sánchez Bribiesca"	127 asientos	32	0.013	0.02
Terraza de la Torre de Ingeniería, (con cafetería y cocina)	120 personas	5	0.012	0.02
Salón de seminarios Emilio Rosenblueth	95 asientos	34	0.0097	0.01
			$\Sigma=$	0.05

Sumando el gasto máximo diario de la Tabla 35 para el año 2025 y los gastos máximos diarios de las Tablas 36 y 37, se obtuvo el gasto máximo diario total para el diseño del sistema de desinfección:

$$Q_{MD} = 1.3 \frac{l}{s} + 0.1 \frac{l}{s} + 0.05 \frac{l}{s} = 1.45 \frac{l}{s}$$

De tal manera, se consideró un gasto máximo diario de 1.45 l/s.

3.3 Selección del sistema de desinfección con ozono

El sistema de potabilización con ozono fue diseñado tomando en consideración criterios de calidad y características operativas de la red de distribución de agua de suministro de la UNAM. En cuanto a calidad se refiere se consideraron los criterios establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 (Secretaría de Salud, Modificación del año 2000) y estándares internacionales (Langlais *et al.* 1991) respecto a la aplicación del ozono, para mejorar la calidad microbiológica y propiedades organolépticas del agua (Ilustración 10 y 11).

Respecto de las características operativas se tomó en cuenta la operación discontinua o intermitente de la red debido a horarios y calendarios de trabajo del personal y estudiantes, lo cual conlleva tener variaciones importantes en el consumo de agua y por lo tanto en el flujo a tratar.

Otro aspecto importante es la presión que se tiene en la línea, la cual es proveída por los sistemas de almacenamiento de agua que se tiene en el Campus universitario (tanques de almacenamiento), lo cual permite que el agua sea distribuida por gravedad a los edificios del Instituto.



Ilustración 10. Toma de muestras para análisis de calidad del agua en Edificios 1, 5, 7, 13 y Torre de Ingeniería: bebedero de PUMAGUA, afuera del Edificio 5. FUENTE: Elaboración propia.



Ilustración 11. Toma de muestras para análisis de calidad del agua en Edificios 2, 3 y 4: Toma de la red principal, ubicada debajo del puente que une a estos edificios. FUENTE: Elaboración propia.

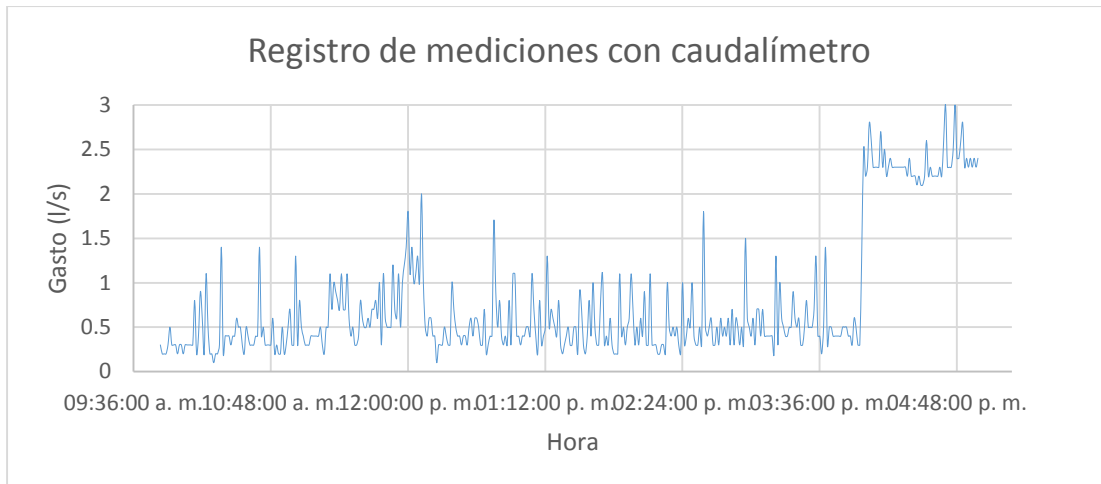
Se llevaron a cabo mediciones de flujo en el punto donde se pretende colocar el sistema de desinfección con ozono con un caudalímetro modelo GE Panametrics Transport PT878, durante dos días de 9:00 a 17:00.

Tabla 38. Gastos mínimo y máximo registrados con caudalímetro el 17 de marzo de 2015. FUENTE: Elaboración propia.

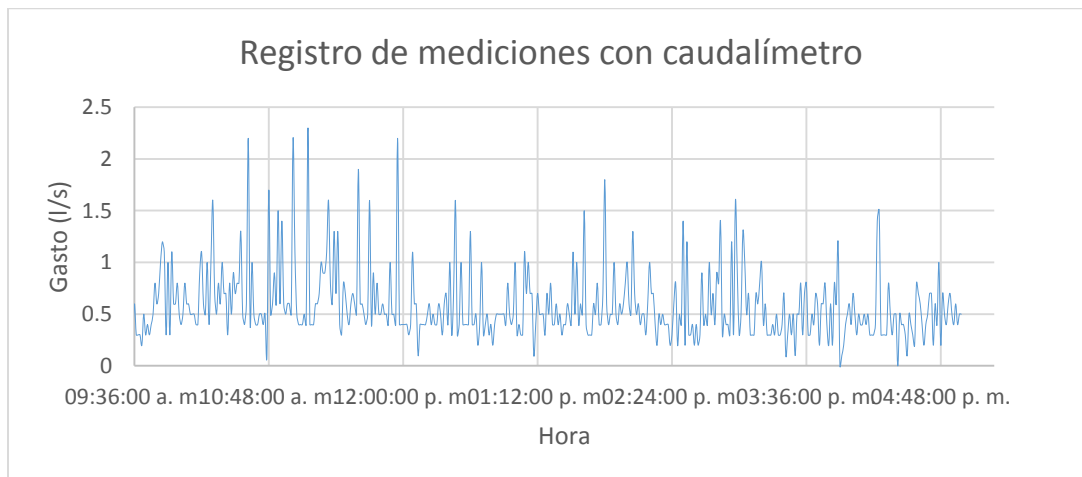
	Hora	Gasto (l/s)
Máximo	04:47:00 p. m.	3
Mínimo	12:15:00 p. m.	0.1

Tabla 39. Gastos mínimo y máximo registrados con caudalímetro el 18 de marzo de 2015. FUENTE: Elaboración propia.

	Hora	Gasto (l/s)
Máximo	11:09:00 a. m.	2.3
Mínimo	03:25:00 p. m.	0.1



Gráfica 3. Curva horaria del 17 de marzo de 2015. FUENTE: Elaboración propia.



Gráfica 4. Curva horaria del 18 de marzo de 2015. FUENTE: Elaboración propia.

Con base en lo anterior fue que se optó por proponer un sistema de potabilización con ozono en línea automatizado (Diagrama 7) el cual está compuesto por una unidad de filtración de carbón activado y un sistema de ozonización con inyección de ozono línea y tanque de contacto presurizado.

Filtración con carbón activado

La filtración en carbón activado como una etapa previa a la ozonización tiene como finalidad remover los niveles de cloro residual que contiene el agua los cuales llegan a superar ocasionalmente los niveles recomendados en la norma (1.5 mg/l) lo cual imparte al agua un sabor y olor desagradable.

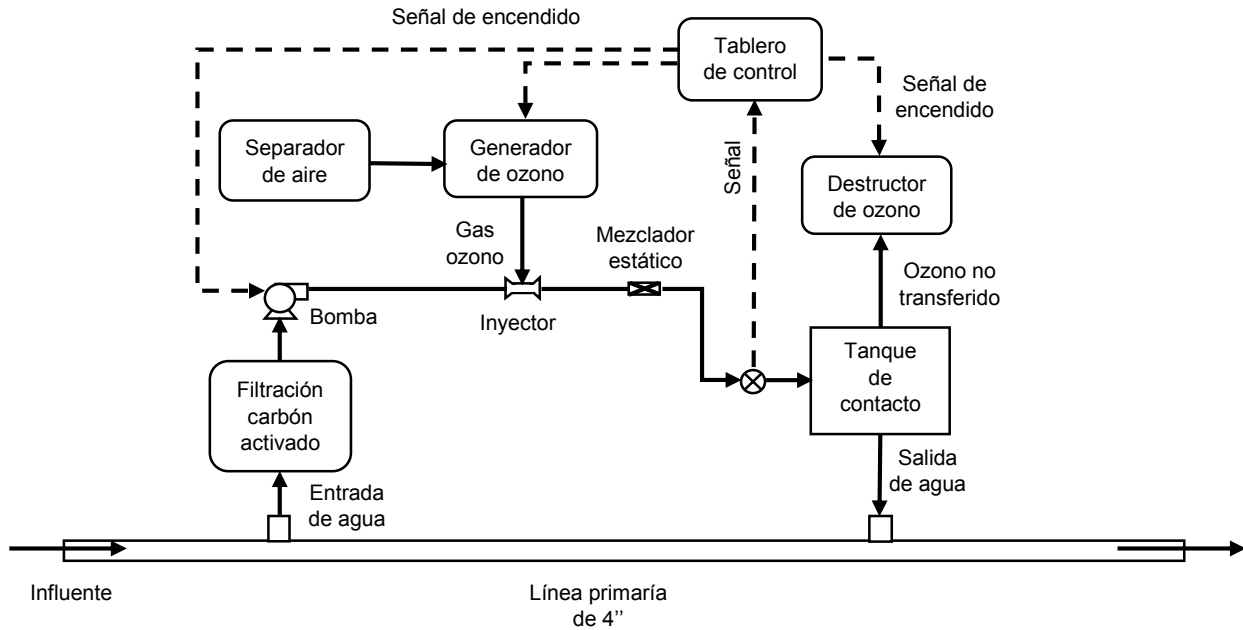


Diagrama 7. Sistema de potabilización con ozono en línea. FUENTE: Elaboración propia.

Sistema de ozonización en línea

Los componentes básicos del sistema de ozonización en línea lo componen los siguientes elementos: 1) el generador de ozono; 2) el gas de alimentación, que en este caso se propone sea aire enriquecido con oxígeno el cual será producido a partir de un separador de aire; 3) un inyector, para incorporar el ozono gas; 4) un mezclador estático, para garantizar la transferencia de la masa del ozono al agua; 5) una unidad de “destrucción” para el ozono que no se transfiere al agua; 6) monitor de ozono ambiental; y 7) un tablero o centro de control automático de la operación del sistema de ozonización.

La inyección de ozono en línea se lleva a cabo mediante inyectores tipo Venturi. Cuando la presión de la línea principal no puede ser modificada, como en el caso de la red primaria del Instituto, el inyector se instala en una derivación y se utiliza una bomba de refuerzo para crear la suficiente presión diferencial que permita la operación de dicho inyector.

Para ello se revisaron los datos históricos de presión en la línea reportados por el grupo de hidráulica de PUMAGUA, quienes reportan un valor promedio de 4 kg/cm², mismo que fue corroborado con mediciones (Tabla 40) realizadas con manómetro (Ilustración 12). Tomando en cuenta este valor de presión y el tipo de tubería instalada (acero al carbón), se procedió a calcular el inyector y la capacidad de la bomba de refuerzo siguiendo el procedimiento descrito en la página de los proveedores de inyectores Mazzei. El tamaño de la bomba resultante fue de 5 HP

para genera el diferencial de presión que se requiere para la inyección del ozono y mantener la presión en la línea en el orden de 3.5kg/cm².

Tabla 40. Calendario de lecturas de presión en el manómetro del crucero 91.
FUENTE: Elaboración propia.

Fecha	Presión medida (kg/cm ²)
26 de junio	4
27 de junio	4
30 de junio	4
2 de julio	4.05
3 de julio	3.8
4 de julio	4.1



Ilustración 12. Lectura de 4 kg/cm² en el manómetro de carátula cercano al crucero 91.
FUENTE: Elaboración propia.

Para la inyección del ozono en línea, una parte del agua del tanque de contacto presurizado será bombeada hacia el inyector para incorporar el ozono. Después del inyector se instalará un mezclador estático para garantizar la transferencia de masa del ozono al agua y posteriormente será regresada al tanque presurizado hasta alcanzar la concentración de ozono residual deseado (0.1-0.3 mgO₃/l) la cual será monitoreada mediante un medidor de potencial de oxidación (ORP).

Control de encendido del sistema de ozonización

El medidor de ORP estará conectado a un tablero de control, el cual mandará la señal para el arranque de la bomba, el generador y el destructor de ozono. El funcionamiento del sistema de ozonización será en forma automática por medio de un controlador lógico programable (PLC).

El tanque de contacto presurizado, además de garantizar un tiempo de contacto del agua con el ozono, tiene la función de mantener un volumen de agua tratada para su abastecimiento y de permitir el adecuado control de encendido del sistema de ozonización.

Tanque de contacto

Se procedió a calcular el volumen del tanque de contacto a partir de la ecuación 3.8:

$$TRH = \frac{V}{Q} \dots (3.8)$$

Donde:

- TRH Tiempo de retención hidráulico, en s
- Q Gasto, en l/s
- V Volumen, en l

$$V = TRH \cdot Q \quad \dots (3.9)$$

Para obtener el residual de ozono deseado, se requiere un tiempo de retención hidráulico mínimo de 4 minutos. Sin embargo, se calculó un tanque de contacto para un tiempo de retención hidráulica de 30 minutos, debido a que se necesita un mayor volumen para permitir el adecuado control de encendido del sistema de ozonización, además de garantizar una reserva de agua potabilizada de por lo menos media hora para abastecer al Instituto de Ingeniería. A partir de la ecuación 3.9 se tiene que:

$$V = 30 \text{ min} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \cdot 1.45 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 2610 \text{ l}$$

Que para fines prácticos, se usó para el dimensionamiento del tanque de contacto, un volumen de 2700 l.

Generador de ozono

La producción requerida de ozono puede ser calculada mediante la ecuación 3.10:

$$P = D \cdot C \quad \dots (3.10)$$

Donde

- P Producción requerida de ozono, en g/h
- D Dosificación de ozono, en g/l
- C Capacidad de desinfección del sistema, en l/h

$$P = 0.2 \frac{\text{mg}_{O_3}}{\text{l}} \cdot 1.45 \frac{\text{l}}{\text{s}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 1040 \frac{\text{mg}_{O_3}}{\text{h}} = 1.04 \frac{\text{g}_{O_3}}{\text{h}}$$

El inyector trabaja con un porcentaje de transferencia de ozono que se suministra al agua a potabilizar de 90 a 100%, por lo que se recalculó la producción de ozono requerida realmente como se muestra a continuación:

$$P = 1.04 \frac{\text{g}_{O_3}}{\text{h}} \cdot 1.1 = 1.14 \frac{\text{g}_{O_3}}{\text{h}}$$

Por lo que se requiere una producción de $1.14 \frac{\text{g}_{O_3}}{\text{h}}$ para un caudal de 1.45 l/s y 90% de porcentaje de transferencia.

4. Revisión hidráulica de la red de distribución y propuesta de modificaciones para la instalación de un sistema de tratamiento con ozono

La revisión hidráulica consiste en determinar los gastos que circulan en las tuberías y los niveles piezométricos (cargas de presión) en varios puntos de la red. Para ello se requiere de la información siguiente: características físicas de las tuberías, conexiones entre tuberías, gastos de demanda, elevaciones de los tanques reguladores, etc. (CONAGUA, 2007d)

4.1 Velocidades permisibles

En cuanto a la velocidad de flujo en la red, para diseño se recomienda partir de valores comprendidos entre 1.2 y 1.8 m/s, los cuales se ajustarán en cada caso particular (CÉSAR, 1990).

Las velocidades permisibles del líquido en un conducto están gobernadas por las características del material que está hecho y la magnitud de los fenómenos transitorios. Existen límites tanto inferiores como superiores, la velocidad mínima de escurrimiento se fija para evitar la precipitación de partículas que arrastra el agua. La velocidad máxima es aquella con la cual no debe ocasionarse erosión en las paredes de las tuberías. En la Tabla 41 se presentan valores de estas velocidades para diferentes materiales de tubería (CONAGUA, 2007a). Estos datos fueron necesarios para el cálculo del diámetro de las tuberías para las modificaciones que sea necesario realizar a la red actual del Instituto de Ingeniería.

Para el caso en estudio, se propuso usar tubería de acero al carbón debido a que las concentraciones de ozono que se añadirán al agua que circulará por la red no deteriorarán este material, además de que soportará las altas presiones de trabajo en la red de distribución los días de baja demanda y por ser el material predominante en la red de distribución actual del Instituto de Ingeniería.

Tabla 41. Velocidades máxima y mínima permisibles en tuberías. FUENTE: CONAGUA, 2007a.

Material de la tubería	Velocidad (m/s)	
	Máxima	Mínima
Concreto simple hasta 45 cm de diámetro	3.00	0.30
Concreto reforzado de 60 cm de diámetro o mayores	3.50	0.30
Concreto presforzado	3.50	0.30
Acero con revestimiento	5.00	0.30
Acero sin revestimiento	5.00	0.30
Acero galvanizado	5.00	0.30
Asbesto cemento	5.00	0.30
Fierro fundido	5.00	0.30
Hierro dúctil	5.00	0.30
Polietileno de alta densidad	5.00	0.30
PVC (Policloruro de vinilo)	5.00	0.30

4.2 Propuesta de modificación a la red actual

Se propuso que el sistema de desinfección con ozono sea instalado en un punto cercano al cruce 91 (de acuerdo a la notación que se ocupa en los planos de la red de suministro de agua potable en Ciudad Universitaria, ver Ilustración 2).

Trazo de la red

Manteniendo el sentido del flujo y la operación actuales en la red, se podría abastecer de agua tratada con ozono a los edificios 1, 5, 7, 13 y la Torre de Ingeniería.

Para aprovechar al máximo los beneficios del sistema de desinfección en línea, se propuso hacer una modificación a la red actual, en la que se instalará una ramificación que derive de la línea de 2 pulgadas que abastece a los edificios 1 y 7 del Instituto de Ingeniería, con lo que se podrá suministrar agua tratada con ozono a los usuarios de los Edificios 2, 3 y 4 (Ilustración 14). De los planos de las instalaciones de la red de agua potable del Instituto de Ingeniería, se obtuvo que se requiere de 61.5 m de tubería de acero al carbón para la modificación propuesta.

Cálculo del diámetro de la tubería

Los diámetros de los tramos nuevos de la red deben seleccionarse de forma tal que se cumplan las siguientes condiciones:

- En todos los nudos de la red primaria la presión debe ser mayor que la mínima requerida y menor que la máxima admisible.
- Las velocidades en las tuberías deben ser menores que las velocidades máximas permisibles. Las velocidades normales en redes están entre 0.60 y 1.50 m/s.

A partir de la información de número de usuarios, se determinó que el 12% del suministro de agua potable calculado será para los Edificios 2, 3 y 4. Recordando que el gasto máximo diario total calculado para el sistema de desinfección fue de 1.45 l/s, se obtuvo el gasto máximo diario que corresponde únicamente a los Edificios 2, 3 y 4 como se muestra a continuación:

$$Q_{MD} = 1.45 \frac{L}{s} \cdot 0.12 = 0.17 \frac{l}{s}$$

Se procedió a calcular el gasto máximo horario con el uso de la ecuación 3.7, el gasto máximo diario de 0.17 l/s, y el coeficiente de variación horaria de la Tabla 34:

$$Q_{MH} = 0.17 \frac{L}{s} \cdot 1.55 = 0.26 \frac{l}{s}$$

Por lo que el valor del gasto máximo horario calculado para el diseño de la nueva ramificación resultó de 0.26 l/s.

Para tuberías de acero, el Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento de CONAGUA proporciona límites de velocidad máxima de 5 m/s y mínima de 0.3 m/s. El diámetro de la tubería nueva se calculó como una línea de conducción, para lo cual se propuso una velocidad de 1.5 m/s, que se encuentra dentro de los límites establecidos.

A partir de la ecuación 4.1:

$$Q = V \cdot A \quad \dots (4.1)$$

Donde:

- Q Gasto máximo horario, en m³/s
- V Velocidad, en m/s
- A Área, en m²

Y despejando el área de la ecuación 4.1, se tiene que:

$$A = \frac{Q}{V}$$

Donde $A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$, para tuberías de sección circular.

Dejando la expresión en función del diámetro y en términos de la velocidad se obtuvo respectivamente:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V}} \quad \dots (4.2)$$

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad \dots (4.3)$$

La ecuación 4.2 fue utilizada para el cálculo del diámetro de la nueva ramificación, como se muestra a continuación:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.00026 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot 1.5 \text{ m/s}}} = 14.9 \text{ mm}$$

Se buscó en un catálogo de tuberías de acero al carbón el diámetro comercial más cercano a este valor:

Diámetro Nominal DN		Diámetro Exterior Real		Espesor de Pared		Identificación		Peso del Tubo		ASTM A53 PRESION DE PRUEBA			
Pulgadas in.	Milímetros mm.	(in.)	mm.	Pulgadas (in.)	Milímetros (mm.)	Weight Class	Schedule	lb/pie	kg/m	Grado A		Grado B	
										psi	Kg/cm2	psi	Kg/cm2
1/2	15	0.840	21.3	0.109	2.77	STD	40	0.85	1.27	700	49	700	49
				0.147	3.73	XS	80	1.09	1.62	850	60	850	60
3/4	20	1.050	26.7	0.113	2.87	STD	40	1.13	1.69	700	49	700	49
				0.154	3.91	XS	80	1.47	2.20	850	60	850	60
1	25	1.315	33.4	0.133	3.38	STD	40	1.68	2.50	700	49	700	49
				0.179	4.55	XS	80	2.17	3.24	850	60	850	60

Ilustración 13. Tubería de acero al carbono. API 5L/ASTM A53/ A106. FUENTE: <http://www.vemacero.com/Tablas/A53MP.pdf>

De la variedad de diámetros comerciales disponibles, se seleccionó el más próximo que en este caso es de $D_N=15$ mm y con resistencia de 49 kg/cm^2 .

Se corrige la velocidad con el diámetro de 15 mm, usando la ecuación 4.3:

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 0.00026 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot (0.015 \text{ m})^2} = 1.33 \text{ m/s}$$

La velocidad calculada de 1.33 m/s se encuentra dentro de las recomendaciones de CONAGUA.

Generalmente, la red secundaria de un sistema de distribución está constituida por tuberías del diámetro mínimo. Se consideraron los diámetros mínimos para las tuberías de relleno dados en la Tabla 42 (CONAGUA, 2007d).

Tabla 42. Diámetros recomendables para la red secundaria. FUENTE: CONAGUA, 2007d.

Tipo de localidad	Diámetro (")
Calles con predios con frentes de 20 m o mayores	2 o 2.5
Zonas densamente pobladas en localidades urbanas, pequeñas y medianas	3
Zonas densamente pobladas en localidades urbanas grandes	4

Se comparó el diámetro de 15 mm con los valores de la Tabla 42. Siendo el diámetro mínimo recomendado mayor al que se calculó, se optó por ocupar tubería de 2" de diámetro. De tal forma se determinó que se requiere de 61.5 m de tubería de acero al carbón de 2" de diámetro para la nueva ramificación.

4.3 Pérdidas de energía

Pérdidas de energía por fricción en la conducción

Para el cálculo de las pérdidas de carga por fricción, se utiliza la fórmula de Darcy-Weisbach, expresada en la ecuación 4.4:

$$h_f = f \frac{LV^2}{2gD} \dots (4.4)$$

Donde:

- h_f Pérdida de energía por fricción, en metros de columna de agua
- f Coeficiente de pérdidas por fricción, adimensional
- L Longitud de tubería, en m
- V Velocidad media del flujo, en m/s
- D Diámetro interior de la tubería, en m
- g Aceleración de la gravedad, se consideró de 9.81 m/s²

La fórmula anterior de pérdida de energía se puede expresar de manera más práctica, en función de n (coeficiente de rugosidad de la tubería) con la fórmula de Manning, resultando la ecuación 4.5:

$$h_f = K \cdot L \cdot Q^2 = \frac{10.3 \cdot n^2 \cdot L \cdot Q^2}{D^{16/3}} \dots (4.5)$$

Donde:

- h_f Pérdida por fricción en metros de columna de agua
- L Longitud de la tubería en m
- Q Gasto en m³/s
- n Coeficiente de rugosidad, $n=0.014$ para acero
- D Diámetro de la tubería en m

Pérdidas locales

Se entiende por pérdidas secundarias a las producidas por ensanchamientos, contracciones, cambios de dirección, entradas, salidas, válvulas y demás accesorios de las tuberías. Estas pérdidas en algunos casos no son significativas y normalmente se ignoran, salvo que el proyectista considere necesario calcularlas, se emplea la siguiente fórmula:

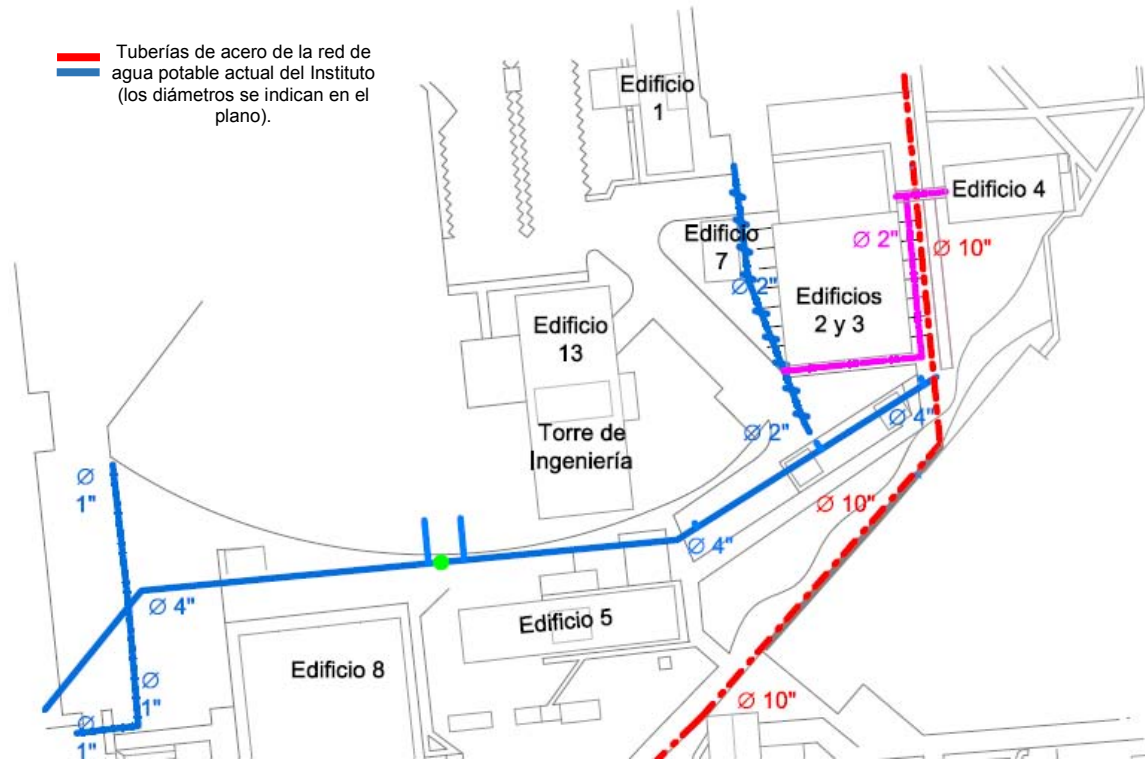


Ilustración 14. Propuesta de modificaciones a la red actual de distribución de agua potable en el Instituto de Ingeniería. FUENTE: Elaboración propia.

- Excavación para interconexión con línea primaria de agua en punto cercano al cruce 91 (Línea primaria de 4"), entre los edificios 5 y 8 del Instituto de Ingeniería
- Conexiones de Edificios 2, 3 y 4. Con las condiciones actuales de operación de la red, se podrá abastecer a los Edificios 1 a 5, 7, 13 y la Torre de Ingeniería

$$h_L = k \frac{V^2}{2g} \dots (4.6)$$

Donde:

- h_L Pérdida secundaria, en metros de columna de agua
- k Coeficiente de pérdida que depende del accesorio que lo genera
- V Velocidad del flujo, en m/s
- g Aceleración de la gravedad, se consideró de 9.81 m/s²

4. Revisión hidráulica de la red de distribución y propuesta de modificaciones para la instalación de un sistema de tratamiento con ozono

Los diámetros y materiales de las tuberías en la Tabla 43 se obtuvieron de los planos de la red de agua potable del Instituto de Ingeniería, proporcionados por el grupo de trabajo PUMAGUA. Los datos de la columna de gasto máximo horario Q_{MH} se calcularon con la ecuación 3.7.

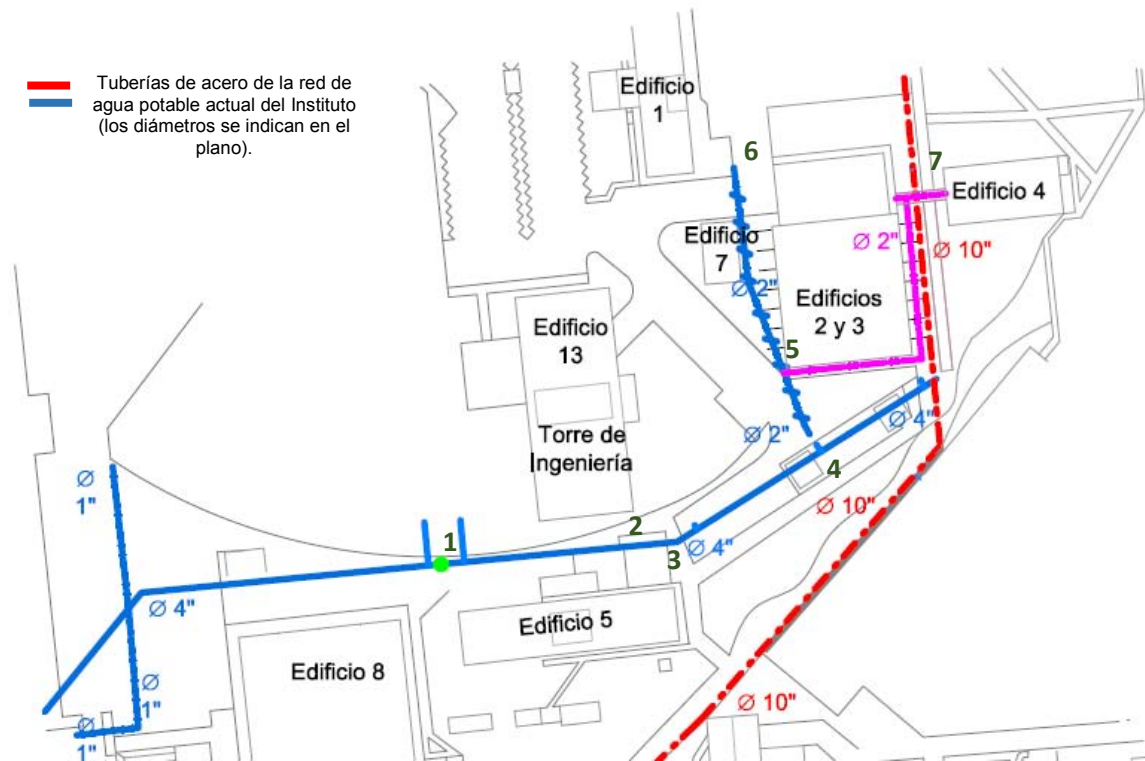


Ilustración 15. Puntos de referencia para la revisión hidráulica. FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 43. Datos de la red para el cálculo de las pérdidas de energía. FUENTE: Elaboración propia.

Tramo	Longitud (m)	D (")	D interior (m)	Q_{MH} (m^3/s)	Material
1 a 2	39.2	4	0.1016	0.00225	Acero al carbón
2 a 3	5.9	4	0.1016	0.00047	Acero al carbón
3 a 4	32.3	4	0.1016	0.00047	Acero al carbón
4 a 5	17.2	2	0.0508	0.00047	Acero al carbón
5 a 6	26.9	2	0.0508	0.00022	Acero al carbón
5 a 7	61.5	2	0.0508	0.00026	Acero al carbón

Se calcularon las velocidades del flujo en las tuberías usando la ecuación de Manning:

$$V = \frac{1}{n} R_H^{2/3} S^{1/2} \dots (4.7)$$

4. Revisión hidráulica de la red de distribución y propuesta de modificaciones para la instalación de un sistema de tratamiento con ozono

Donde:

n Coeficiente de Manning, para acero, $n=0.014$

R_H Radio hidráulico, en m

$$R_H = \frac{A}{P} \dots (4.8)$$

Donde:

A Área de sección transversal de la tubería, en m^2

P Perímetro mojado de la sección transversal de la tubería, en m

$$R_H = \frac{D}{4}, \text{ para sección transversal circular.}$$

Donde:

D Diámetro de la sección transversal de la tubería, en m

$$S = \frac{H}{L} \dots (4.9)$$

Donde:

S Pendiente de la tubería

H Diferencia de elevaciones, en m

L Longitud de la tubería, en m

En la Tabla 44 se presenta el resumen del cálculo de velocidad en cada tramo analizado (de acuerdo a la Ilustración 15) para lo cual se usaron las ecuaciones 4.7 a 4.9. Las cotas de la Tabla 44 se obtuvieron de los planos topográficos y de instalaciones hidráulicas del Instituto de Ingeniería proporcionados por la Secretaría Técnica. El banco de nivel de los planos topográficos se consideró para el cálculo como plano horizontal de referencia. Cabe mencionar que las cotas son aproximadas, debido a la falta de actualización y detalle de los levantamientos.

Tabla 44. Resumen de cálculo de velocidad en cada tramo analizado. FUENTE: Elaboración propia.

Tramo	D (m)	R_H (m)	n (Manning)	Cota inicial (m)	Cota final (m)	L (m)	S	V (m/s)
1 a 2	0.1016	0.0254	0.014	3.3	2.6	39.2	0.018	0.82
2 a 3	0.1016	0.0254	0.014	2.6	2.5	5.9	0.017	0.80
3 a 4	0.1016	0.0254	0.014	2.5	2	32.3	0.015	0.77
4 a 5	0.0508	0.0127	0.014	2	1.6	17.1	0.023	0.59
5 a 6	0.0508	0.0127	0.014	1.6	1.1	27	0.019	0.53
5 a 7	0.0508	0.0127	0.014	1.1	0.4	61.5	0.011	0.41

4. Revisión hidráulica de la red de distribución y propuesta de modificaciones para la instalación de un sistema de tratamiento con ozono

De acuerdo a los planos proporcionados por PUMAGUA, en la sección de la red de agua potable que se está analizando, las pérdidas locales están dadas por válvulas de compuerta, codos y cambios de diámetro. Dado que no hay información específica sobre los accesorios instalados en la red, se utilizaron los valores de la Tabla 45 para el cálculo de las pérdidas locales.

Tabla 45. Coeficiente de pérdida (K) para aditamentos de tuberías. FUENTE: (Munson .B. R. et al., 1990).

Aditamento	K
Entrada	0.5
Cambio de dirección	2.0
Válvula de compuerta totalmente abierta	0.15
Codo 45° radio corto	0.4
Expansión brusca	0.25
Codo 90° radio corto	0.3

Una vez que se calculó la velocidad en cada uno de los tramos analizados, se obtuvieron las pérdidas de energía por fricción y locales usando las ecuaciones 4.5 y 4.6 respectivamente. Se muestra el resumen del cálculo en las Tablas 46 y 47.

Tabla 46. Resumen de cálculo de pérdidas de energía por fricción en cada tramo de la red analizado. FUENTE: Elaboración propia.

Tramo	L (m)	D (m)	Q_{MH} (m ³ /s)	Material	n (Manning)	h_f (m)
1 a 2	39.2	0.1016	0.00225	Acero al carbón	0.014	0.079
2 a 3	5.9	0.1016	0.00047	Acero al carbón	0.014	0.001
3 a 4	32.3	0.1016	0.00047	Acero al carbón	0.014	0.003
4 a 5	17.2	0.0508	0.00047	Acero al carbón	0.014	0.061
5 a 6	26.9	0.0508	0.00022	Acero al carbón	0.014	0.020
5 a 7	31.9	0.0508	0.00026	Acero al carbón	0.014	0.065

Tabla 47. Resumen de cálculo de pérdidas de energía locales en cada tramo de la red analizado. FUENTE: Elaboración propia.

Tramo	Material	$\frac{v^2}{2g}$ (m)	K	h_L (m)
1 a 2	Acero al carbón	0.035	0.5	0.017
2 a 3	Acero al carbón	0.033	0	0.000
3 a 4	Acero al carbón	0.030	0.4	0.012
4 a 5	Acero al carbón	0.018	2.4	0.043
5 a 6	Acero al carbón	0.014	0	0.000
5 a 7	Acero al carbón	0.009	2.3	0.020

4.4 Presión en la red

Las presiones o cargas disponibles de operación, que se han de obtener en el diseño de la red primaria, deberán ser suficientes para suministrar una cantidad de agua razonable en los pisos más altos de las casas, fábricas y edificios comerciales de no más de 6 pisos. Deberán estar comprendidas entre 1.5 a 4.0 kg/cm² (15 a 40 metros de columna de agua) (CONAGUA, 2007d).

Tabla 48. Valores de presión usuales en la red de distribución. FUENTE: CÉSAR, 1990.

Zonas	Presión disponible (kg/cm ²)
Residencial de 2 ^a	1.5 a 2.0
Residencial de 1 ^a	2.0 a 2.5
Comercial	2.5 a 4.0
Industrial	3.0 a 4.0

Para estimar la presión mínima requerida a la salida del sistema de desinfección, de tal forma que el agua llegue con la carga suficiente hasta el punto con las condiciones más desfavorable, que serían los Edificios 2, 3 y 4 (punto 7, de acuerdo a la Ilustración 15), se propuso en el punto 7 una cota piezométrica de 25 m.c.a, con lo que se está dentro de los límites que establece CONAGUA, así como de las recomendaciones de la Tabla 48.:

Se usó la ecuación 4.10 para obtener la cota piezométrica mínima necesaria en el punto donde se ubicará el sistema. Las pérdidas de energía totales (h_r) se obtuvieron de las Tablas 46 y 47, siendo estas iguales a la suma de las pérdidas de energía por fricción y las pérdidas de energía locales.

$$\text{Cota piezométrica 2} = \text{Cota piezométrica 1} - h_{r(1-2)} \dots (4.10)$$

$$\text{Cota piezométrica 1} = \text{Cota piezométrica 7} - h_{r(1-7)}$$

$$\text{Cota piezométrica 1} = 25 \text{ m} - 0.3 \text{ m} = 24.7 \text{ m}$$

Por lo tanto con el tanque de contacto presurizado que trabajará a 3.5 kg/cm² y entregará el agua tratada con una carga de presión de 35 m, superior a los 24.7 m calculados como cota piezométrica mínima, el agua llegará con suficiente presión hasta el punto más desfavorable en la red.

4.5 Propuesta de bebederos

Como parte de las acciones de PUMAGUA, se está iniciando un programa en el que se busca reducir la compra de agua embotellada dentro de Ciudad Universitaria. PUMAGUA puso a prueba a finales de 2014 en la Facultad de Medicina dos diferentes modelos de despachadores de agua (ALVARADO, 2014)

El agua embotellada está relacionada con el problema de la generación de residuos de polietileno tereftalato (PET). Los residuos sólidos del agua embotellada no sólo implican un costo sino que también resultan en gasto de energía relacionados con su producción (Espinosa *et al.* 2014)

En este proyecto se usará el mismo modelo de dispensador de agua que se instaló en la Facultad de Medicina y que tuvo una respuesta positiva por parte de los usuarios (Ilustración 16).

De acuerdo a los criterios para la instalación de bebederos del equipo de trabajo PUMAGUA, se requiere que la conexión de los bebederos se haga desde una línea principal que pase por el lugar, además de que este modelo de bebedero se conecta con tubería de $\frac{3}{4}$ de pulgada.

El Criterio Normativo para la construcción e instalación de Bebederos INIFED (Instituto Nacional de Infraestructura Física Educativa), establece que la ubicación de bebederos se hará bajo las siguientes consideraciones:

I. Se ubicarán en áreas de uso común del plantel que permitan tanto accesibilidad permanente como visibilidad a los usuarios, preferentemente cercanos a las áreas de juegos, zonas deportivas o comedores.

II. No existirán elementos que obstaculicen el acceso a los bebederos o interfieran en su uso.

III. Se ubicarán en áreas que eviten la exposición de los depósitos a las altas temperaturas con objeto de evitar el sobrecalentamiento del agua purificada que será consumida por los usuarios.

V. Para mantener la sanidad del servicio, se evitará que se ubiquen cerca de cualquier fuente de contaminación como sanitarios, bodegas o talleres.

VI. Los pisos sobre los que se instalen estas unidades deben ser lavables y no debe haber encharcamientos (INIFED, 2011)

Teniendo en cuenta las recomendaciones de INIFED y los requerimientos de PUMAGUA, se seleccionaron tres posibles puntos de ubicación de los bebederos (Ilustración 17). De acuerdo a los planos disponibles, se consideraron 48.5 m de tubería de acero al carbón de $\frac{3}{4}$ de pulgada necesaria para hacer la conexión a la línea primaria.

4. Revisión hidráulica de la red de distribución y propuesta de modificaciones para la instalación de un sistema de tratamiento con ozono

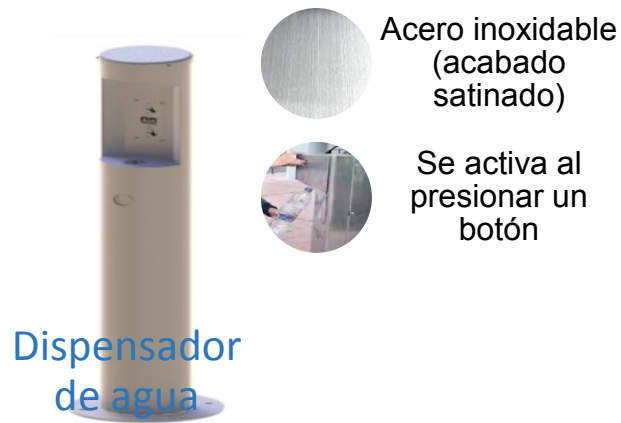


Ilustración 16. Propuesta de bebedero. FUENTE: Elaboración propia.

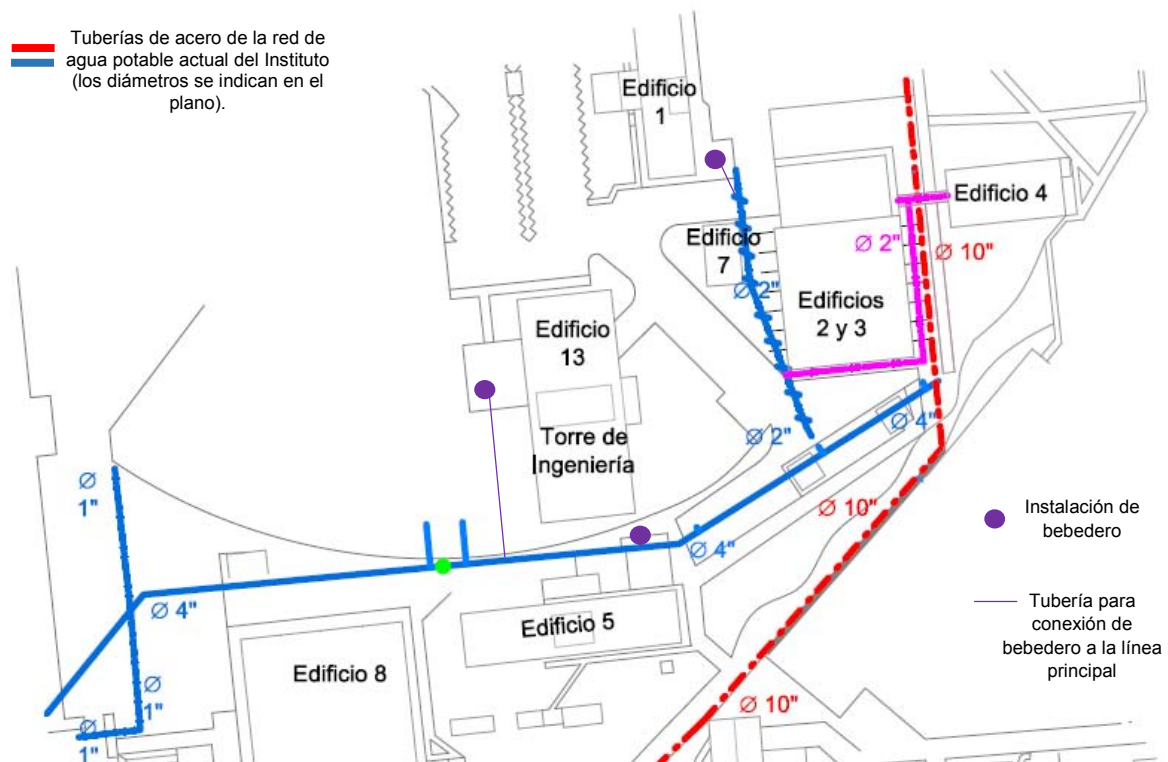


Ilustración 17. Propuesta de instalación de bebederos. FUENTE: Elaboración propia.

5. Costos, mantenimiento y descripción del proceso constructivo para la instalación del sistema de desinfección con ozono

5.1 Proceso constructivo para la instalación

Tuberías

La excavación incluye la remoción del material y su extracción, su colocación a uno o ambos lados de la zanja, de forma que no interfiera con el desarrollo de los trabajos (HERNÁNDEZ, 2001). Se tendrá que realizar la excavación de zanja para la tubería de acero al carbón de 2" (5.1 cm) de diámetro de la línea secundaria que se calculó en el capítulo anterior. La colocación de la tubería se realizará de acuerdo a la Figura 13.

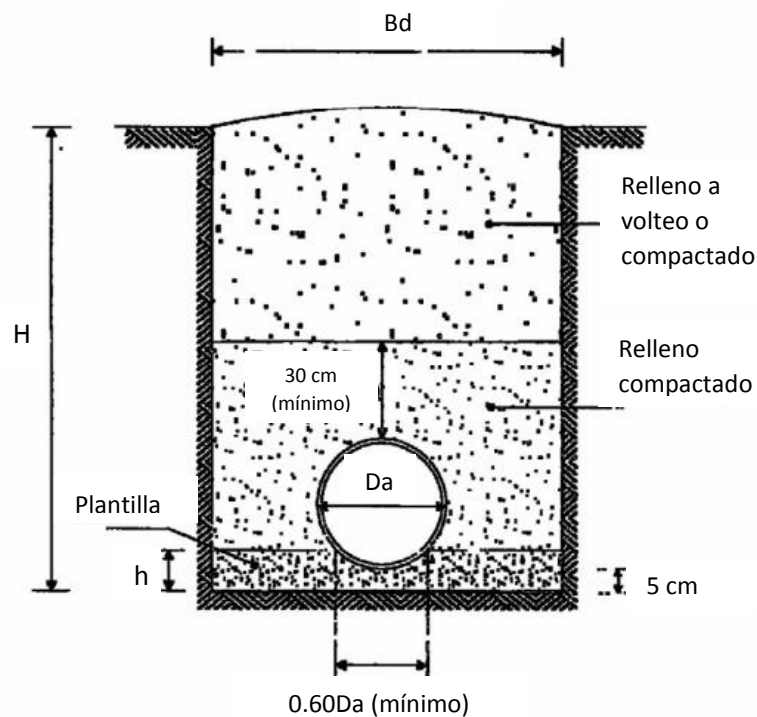


Figura 13. Relleno de zanja. FUENTE: CONAGUA, 2007a.

Para tuberías con diámetro exterior menor a 50 cm, el ancho de la zanja será el diámetro exterior más 50 cm (CONAGUA, 2007a), por lo que el ancho de la zanja será de 55 cm y la profundidad de 70 cm, lo que da un volumen de excavación de 0.39 m³ por metro lineal, como se muestra en la Tabla 49.

DIÁMETRO NOMINAL		ANCHO Bd (cm)	PROFUNDIDAD H (cm)	ESPESOR DE LA PLANTILLA (cm)	VOLUMEN DE EXCAVACIÓN (m³/m)
(cm)	(pulgadas)				
2.5	1	50	70	5	0.35
3.8	1½	55	70	5	0.39
5.1	2	55	70	5	0.39
6.3	2½	60	100	7	0.60
7.5	3	60	100	7	0.60
10.0	4	60	105	10	0.63
15.0	6	70	110	10	0.77
20.0	8	75	115	10	0.86
25.0	10	80	120	10	0.96
30.0	12	85	125	10	1.06
35.0	14	90	130	10	1.17
40.0	16	95	140	10	1.33
45.0	18	110	145	10	1.60
50.0	20	115	155	11	1.78
61.0	24	130	165	13	2.15
76.0	30	150	185	14	2.77
91.0	36	170	210	15	3.57
107.0	42	190	230	17	4.37
122.0	48	210	245	20	5.14
162.0	60	250	300	23	7.50
183.0	72	280	340	27	9.52
213.0	84	320	380	30	12.16
244.0	98	350	415	34	14.53

Tabla 49. Dimensiones de zanjas y plantillas para tubería de agua potable y alcantarillado. FUENTE: CONAGUA, 2007a

Para la colocación de los 58.8 m de tubería de la línea secundaria, se requerirá el siguiente volumen de excavación:

$$V_{excavación} = 0.39 \frac{m^3}{m} \cdot 58.8 m = 22.9 m^3$$

Para fines prácticos, se considerarán 23 m³ de excavación de zanja. Paralelo a la excavación se procederá a realizar el afine de la plantilla de la zanja, para eliminar las aristas, que pudieran romper la tubería una vez que esta esté cubierta, la cual se hará con pico, pala y barreta. Se deben nivelar las partes de la zanja que presenten pequeñas pozas o lomas, rellenando las primeras con material fino, con la finalidad de dejar una superficie uniforme y lista para recibir la cama de arena. La plantilla tiene la finalidad de mantener la tubería en una posición estable y que tenga un asentamiento correcto en toda su longitud, facilitar el acomodo de la tubería y formar una superficie tal que la carga del tubo en el terreno sea uniforme y también para que no sea dañada por los fenómenos sísmicos (HERNÁNDEZ, 2001).

De acuerdo a la Tabla 49, el espesor de la plantilla (cama de arena) será de 5 cm. Recordando que el ancho de zanja será de 55 cm, se requerirá el siguiente volumen de cama de arena:

$$V_{plantilla} = 0.05 m \cdot 0.55 m \cdot 58.8 m = 1.6 m^3$$

El relleno compactado es la capa de tierra cribada que cubre el lomo de la tubería para protegerla de los efectos de las cargas vivas. Se hará con material producto de la excavación, cribándolo a través de una malla número 10, y deberá ser cuidadosamente colocado preferente en capas de 10 cm de espesor, compactándose a ambos lados, con pisón metálico de 20 kg (HERNÁNDEZ, 2001).

De acuerdo a la Figura 13, el volumen de relleno compactado será del diámetro de la tubería más 30 cm sobre el lomo de esta, lo que da un espesor de 35 cm. El volumen de relleno compactado será el siguiente:

$$\text{área de sección transversal de la tubería} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0.051 \text{ m})^2}{4} = 0.002 \text{ m}^2$$

$$V_{compactado} = [(0.35 \text{ m} \cdot 0.55 \text{ m}) - 0.002 \text{ m}^2] \cdot 58.8 \text{ m} = 11.2 \text{ m}^3$$

El relleno a volteo se realizará en la zanja a partir del relleno compactado hasta formar arriba del nivel del terreno un lomo para garantizar con esto que se tendrá el nivel original después del asentamiento natural. Esto se efectuará con el material producto de la excavación y libre de grandes partículas (HERNÁNDEZ, 2001).

La profundidad restante de la excavación de 70 cm es el espesor de la capa de relleno a volteo. Para la profundidad de 30.1 cm se requiere el siguiente volumen de relleno a volteo:

$$V_{volteo} = 0.3 \text{ m} \cdot 0.55 \text{ m} \cdot 58.8 \text{ m} = 9.7 \text{ m}^3$$

Atendiendo a las recomendaciones del *Manual de Abastecimiento de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* de CONAGUA, se propuso que la unión de la nueva ramificación con la red existente se realice con soldadura porque se unirán tuberías del mismo diámetro (2") y del mismo material (acero con acero).

Cuarto para alojar instalación

Se requiere la construcción de un cuarto con ventilación para alojar la instalación del sistema de desinfección. De acuerdo al tamaño de los componentes y las recomendaciones dadas por el distribuidor del sistema de desinfección con ozono, se propuso un almacén de 2m x 3m y 2.8m de altura. Dada la naturaleza oxidante e inestabilidad del ozono, el cuarto será de muro de block de concreto, con paredes proyectadas a lo largo de todo el contorno.


Se tendrá especial cuidado para la instalación eléctrica del cuarto de ozono pues se requiere de energía eléctrica para el funcionamiento del equipo. Debido a las características del equipo que se instalará, por medio del distribuidor del equipo se suministrará la mano de obra especializada en este tipo de trabajos y los

materiales para realizar la conexión de la línea primaria a los filtros de agua y equipos periféricos.

5.2 Costo de inversión

Para los precios de los componentes del sistema de potabilización con ozono, se pidió cotización con un distribuidor especializado en sistemas de potabilización con ozono. Los precios fueron proporcionados en dólares, y se utilizó la tasa de cambio de 1 USD: \$15.353 MXN, por lo que los valores que se muestran a continuación están sujetos a variaciones.

Únicamente se consideraron costos de inversión de los componentes del sistema de desinfección y de las adaptaciones de infraestructura, pues los costos de mano de obra y equipo (a excepción de lo que se necesita para la instalación del sistema de desinfección con ozono, que requiere personal especializado), serán licitados por parte de la Dirección General de Obras de la UNAM.

 Obra: Proyecto RAM. Propuesta de suministro de agua potable segura en el Instituto de Ingeniería. Primera etapa.	Fecha: 13/05/2015
Lugar: Instituto de Ingeniería, Ciudad Universitaria UNAM, México, D.F.	

COSTO DE INVERSIÓN

Concepto	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Importe
SISTEMA DE POTABILIZACIÓN CON OZONO				
Equipo de filtros de carbón activado de operación automática y alternada	Unidad	1	\$94,989.01	\$94,989.01
Generador de oxígeno	Unidad	1	\$55,270.80	\$55,270.80
Generador de ozono	Unidad	1	\$83,719.91	\$83,719.91
Destructor de ozono	Unidad	1	\$23,029.50	\$23,029.50

5. Costos, mantenimiento y descripción del proceso constructivo para la instalación del sistema de desinfección con ozono

Trampa de agua	Unidad	1	\$5,373.55	\$5,373.55
Inyector y válvula	Unidad	1	\$7,676.60	\$7,676.60
Tanque de acero inoxidable para presión máxima de 7 kilos, con mezclador estático e inyector	Unidad	1	\$61,412.00	\$61,412.00
Motobomba centrífuga de 5 HP.	Unidad	1	\$41,238.16	\$41,238.16
Monitor de ozono	Unidad	1	\$79,835.60	\$79,835.60
Tablero de control para el arranque de la bomba de 5 HP, generador de ozono y destructor, con funcionamiento automático por medio de PLC y pantalla táctil, modulación de generación de ozono y medición de ozono disuelto	Unidad	1	\$56,145.92	\$56,145.92
Suministro de material y mano de obra para la instalación y desviación de la línea de agua de 4" para la incorporación de ozono. instalación y arranque de bomba y tablero automático, conexiones eléctricas en cuarto, instalación de sensores en agua, inyector de ozono y tuberías a inyector	Unidad	1	\$68,474.38	\$68,474.38
Suministro de material y mano de obra para instalación eléctrica en cuarto de ozono. Incluye: Centro de cargas tubería de alimentación y cableado a tablero automático de ozono, conexión a filtros de agua y equipos periféricos, luces y apagadores, todo lo necesario para su correcto funcionamiento	Unidad	1	\$25,086.80	\$25,086.80
Viáticos, transportación y hospedaje	Unidad	1	\$15,353.00	\$15,353.00

**TOTAL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN
CON OZONO**

\$622,211.13

**CUARTO PARA ALOJAR INSTALACIÓN
(2X3X2.8m)**

ACABADOS

Pintura vinílica en muros a dos manos, incluye: aplicación de sellador, materiales, preparación de la superficie, equipo y herramienta.	m ²	24.1	\$20.99	\$505.86
---	----------------	------	---------	----------

5. Costos, mantenimiento y descripción del proceso constructivo para la instalación del sistema de desinfección con ozono

Aplanado de yeso-cemento en muros de 1.5 cm. de espesor, Incluye: suministro de materiales, acarreo, desperdicios, fijación, limpieza, equipo y herramienta.	m ²	24.1	\$48.63	\$1,171.98
--	----------------	------	---------	------------

MUROS Y PLAFONES

Falso plafón de panel tipo resistente a la humedad de 13 mm. de espesor, con bastidor armado a base canaleta de 1 1/2 pulgadas y canal listón cal. 26, a cada 0.61 m. de separación, incluye: materiales, acarreo, elevaciones, cortes, desperdicios, fijación, esquineros, pasta y cinta de refuerzo de acuerdo al tipo de panel, mano de obra, equipo y herramienta.	m ²	6	\$138.90	\$833.40
--	----------------	---	----------	----------

TOTAL MUROS Y PLAFONES

\$833.40

TOTAL ACABADOS

\$2,511.24

ALUMINIO

Portón de 2.60 x1.80 m. en dos hojas abatibles, con marco de construido con PTR de 1 1/2" x 1 1/2" del 1/8" de espesor, forrado con duela de aluminio, incluye: cerradura de sobreponer, pasador portacandado, dos pasadores de maroma, bibeles y tejuelos, materiales, soldadura, aplicación de primer y pintura de esmalte, mano de obra, equipo y herramienta.	pza	1	\$10,665.21	\$10,665.21
---	-----	---	-------------	-------------

TOTAL ALUMINIO

\$10,665.21

ALBAÑILERÍA

IMPERMEABILIZACIÓN

Impermeabilización a base de una impregnación de hidropriemer, y festermip de 4 mm acabado terracota, incluye: materiales, desperdicios, traslapes, equipo y herramienta.	m ²	6	\$286.21	\$1,717.26
---	----------------	---	----------	------------

TOTAL IMPERMEABILIZACIÓN

\$1,717.26

MUROS

Muro de 10 cm. de block de concreto de 10x20x40 cm. asentado con mezcla cemento arena 1:5, acabado común, con refuerzos horizontales a base de alambón a cada 2 hiladas, incluye: materiales.	m ²	24.1	\$132.49	\$3,193.01
---	----------------	------	----------	------------

TOTAL MUROS

\$3,193.01

LOSA

Losa de 10 cm. de espesor de concreto F'c=250 kg/cm ² , armada con varilla del No. 3 (3/8"), a cada 20 cm. en ambos sentidos, incluye: suministro de materiales, acarreo, cimbra, equipo y herramienta.	m ²	6	\$390.94	\$2,345.64
--	----------------	---	----------	------------

TOTAL LOSA

\$2,345.64

PISO

Piso de 8 cm acabado escobillado, de concreto F'c= 250 kg/cm ² , incluye: suministro de materiales, acarreo,	m ²	6	\$116.76	\$700.56
---	----------------	---	----------	----------

5. Costos, mantenimiento y descripción del proceso constructivo para la instalación del sistema de desinfección con ozono

cimbrado de fronteras, equipo y herramienta.

TOTAL PISO \$700.56

TOTAL ALBAÑILERÍA \$7,956.47

VARIOS

Entortado de 4 cm. de espesor a base de mezcla cemento-cal-arena en proporción 1:1:8, incluye: acarreos, equipo y herramienta.	m ²	6	\$49.26	\$295.56
--	----------------	---	---------	----------

TOTAL VARIOS \$295.56

TOTAL CUARTO PARA ALOJAR INSTALACIÓN (2X3X2.8m) \$21,428.48

CONEXIÓN DE EDIFICIOS 2, 3 Y 4 A LA LÍNEA DE 2 PULGADAS

Tubería de acero al carbón sin costura de 2" de diámetro	m	61.5	\$343.35	\$21,116.03
--	---	------	----------	-------------

Codo de acero al carbón soldable cédula 40, 90 grados, 51 mm (2")	pza	1	\$312.02	\$312.02
---	-----	---	----------	----------

Tee recta de acero al carbón de 2"	pza	1	\$219.30	\$219.30
------------------------------------	-----	---	----------	----------

TOTAL CONEXIÓN DE EDIFICIOS 2, 3 Y 4 A LA LÍNEA DE 2 PULGADAS \$21,647.35

BEBEDEROS

Dispensador de agua de acero inoxidable (acabado satinado) fabricado en lámina de acero inoxidable T-304 calibre 16 con registro para mantenimiento y tornillería de acero inoxidable, base en placa de 3 mm de acero inoxidable T-304 Gráfico y logotipo institucional en recorte de vinyl color negro, incluye llave para bebedero compacta	Unidad	3	\$7,560.00	\$22,680.00
---	--------	---	------------	-------------

Tubería de acero al carbón de 3/4" de diámetro	m	48.5	\$172.77	\$8,379.35
--	---	------	----------	------------

Instalación de dispensador de agua, incluye tornillería de acero inoxidable y taquetes de expansión	Unidad	3	\$450.00	\$1,350.00
---	--------	---	----------	------------

TOTAL BEBEDEROS \$32,409.35

TOTAL DEL PRESUPUESTO MOSTRADO SIN IVA: **\$697,696.31**

IVA 16.00% **\$111,631.41**

TOTAL DEL PRESUPUESTO MOSTRADO: **\$809,327.72**

(* OCHOCIENTOS NUEVE MIL TRESCIENTOS VEINTISIETE PESOS 72/100 M.N. *)

5.3 Costos de operación y mantenimiento

Costo de operación

Se realizó el cálculo del tiempo de operación diario del sistema de desinfección, con el gasto medio anual de 1 l/s calculado en el capítulo 3 (Ver Tablas 35 a 37). Como se mencionó anteriormente, el control de encendido del sistema estará regulado con base en la concentración de ozono residual en el agua del tanque de contacto presurizado la cual fue fijada como valor máximo en 0.2 mgO₃/l y como valor mínimo 0.1 mgO₃/l. Es decir, el sistema entrará en operación cuando el medidor de potencial de óxido reducción detecte una concentración menor a 0.1 mg/l de ozono residual y se apagará al alcanzar los 0.2 mg/l.

Para efecto de cálculo teórico de los tiempos de operación se consideró un análisis estático y que el tanque de contacto presurizado es un reactor de mezcla perfecta.

Tomando en cuenta el valor de gasto promedio anual de 1 l/s, al tanque de contacto estarán ingresando 60 l cada minuto de agua sin ozono y estará saliendo el mismo volumen de agua con una concentración variable de ozono en función de tiempo en un intervalo de 0.1 – 0.2 mg/l.

La concentración en el tiempo fue aproximada de acuerdo a la siguiente relación:

$$C_{O_3} = \frac{m_{O_3}}{V} \dots (5.1)$$

Donde:

- C_{O_3} Concentración de ozono, en mg/l
 m_{O_3} Masa de ozono total en el tanque, en mg
 V Volumen de tanque presurizado, en l

La masa total inicial de ozono $m_{O_3_0}$ en el tanque de contacto presurizado de 2700 l, tomando en cuenta una concentración de ozono residual inicial, $C_{O_3_0}$ de 0.2 mg/l, es igual a:

$$m_{O_3_0} = C_{O_3_0} \cdot V_{O_3} \dots (5.2)$$

$$m_{O_3_0} = 0.2 \frac{mg}{l} \cdot 2700 l = 540 mg_{O_3}$$

Tomando en cuenta la concentración residual inicial de 0.2 mgO₃/l y el flujo de agua promedio de 60 l/min, en el primer minuto habrán salido del tanque una masa de 12 mg de ozono la cual habrá que restar a la masa total inicial, para obtener la nueva concentración en el tiempo.

Teniendo en cuenta que el gasto de entrada es igual al de salida (el volumen de agua en el tanque de contacto es constante), se volvió a calcular la concentración para el siguiente instante t₁:

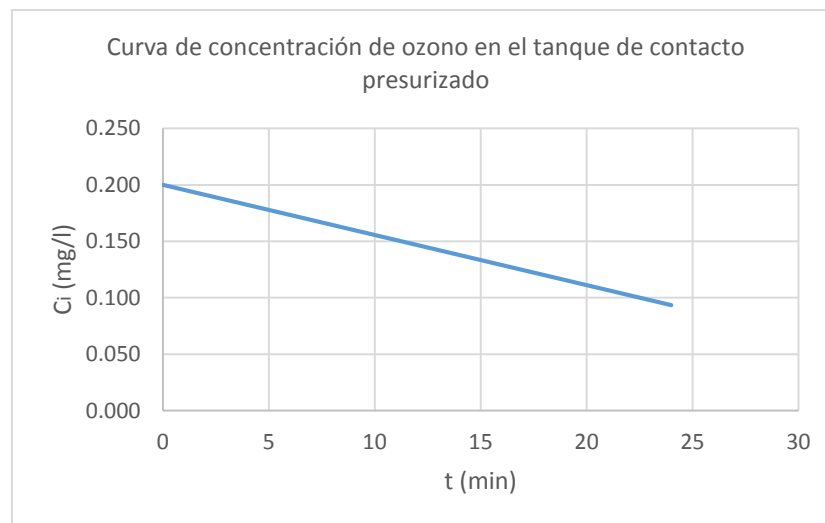
$$C_{O_3,1} = \frac{540 - 12 \text{ mg}_{O_3}}{2700 \text{ L}} = 0.196 \frac{\text{mg}_{O_3}}{\text{l}}$$

De la misma manera se calculó las variaciones de concentración en función del tiempo de operación. La curva de concentración de ozono en el tanque de contacto presurizado está representada en la Tabla 50 y en la Gráfica 5.

De acuerdo al cálculo realizado, se determinó que el sistema de desinfección se encenderá en promedio cada 23 minutos, cuando se alcance una concentración menor a 0.1 mg/l de ozono en el tanque de contacto. La bomba de 5 HP tiene la capacidad de llenar el tanque de contacto con un flujo de 1.17 l/s, por lo que no tendrá problemas en mandar al tanque un gasto de entrada de 1 l/s.

El sistema de desinfección estará en funcionamiento por aproximadamente 30 minutos, que es el tiempo de retención hidráulica para el que fue diseñado el tanque de contacto. Continuando con la suposición de flujo permanente, el equipo se encenderá 27 veces al día para estar en funcionamiento por 30 minutos, por lo que el sistema estará en funcionamiento durante 13.5 horas al día en promedio.

Posteriormente, se determinaron los costos de operación de los componentes del sistema de desinfección de mayor consumo energético (generador de ozono y bomba).



Gráfica 5. Curva de concentración de ozono en el tanque de contacto presurizado. FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 50. Cálculo de curva de concentración de ozono en el tanque de contacto presurizado.

t_i (min)	$C_{O_3 i}$ (mg/l)	$m_{O_3 i}$ (mg)	$V_{O_3 i}$ (l)	V_s (l)	$V_{O_3 i+1}$ (l)	mgO_{3i+1}	C_{i+1} (mg/l)
0	0.200	540	2700	60	2640	528	0.196
1	0.196	528	2640	60	2580	516	0.191
2	0.191	516	2580	60	2520	504	0.187
3	0.187	504	2520	60	2460	492	0.182
4	0.182	492	2460	60	2400	480	0.178
5	0.178	480	2400	60	2340	468	0.173
6	0.173	468	2340	60	2280	456	0.169
7	0.169	456	2280	60	2220	444	0.164
8	0.164	444	2220	60	2160	432	0.160
9	0.160	432	2160	60	2100	420	0.156
10	0.156	420	2100	60	2040	408	0.151
11	0.151	408	2040	60	1980	396	0.147
12	0.147	396	1980	60	1920	384	0.142
13	0.142	384	1920	60	1860	372	0.138
14	0.138	372	1860	60	1800	360	0.133
15	0.133	360	1800	60	1740	348	0.129
16	0.129	348	1740	60	1680	336	0.124
17	0.124	336	1680	60	1620	324	0.120
18	0.120	324	1620	60	1560	312	0.116
19	0.116	312	1560	60	1500	300	0.111
20	0.111	300	1500	60	1440	288	0.107
21	0.107	288	1440	60	1380	276	0.102
22	0.102	276	1380	60	1320	264	0.098
23	0.098	264	1320	60	1260	252	0.093

- Valor futuro de una cantidad presente

La fórmula clásica del interés compuesto muestra el valor futuro que se obtendría al invertir una cantidad en el presente, a una determinada tasa, por un periodo dado. Esta relación se establece por la siguiente fórmula:

$$F = P(1 + i)^n \dots (5.3)$$

Donde:

- F Valor futuro de una cantidad presente
- P Valor presente
- I Tasa de interés del periodo de capitalización
- N Número de periodos de capitalización

La tarifa por consumo de electricidad de Ciudad Universitaria corresponde a la tarifa horaria en media tensión (HM), en esta tarifa se aplican cargos por la demanda facturable, por la energía de punta, por la energía intermedia y por la energía de base.

Para 2011 CU consumió 83 572 527 kWh y pagó a CFE por concepto de electricidad la cantidad de 159.8 millones de pesos (CASTILLO, 2014). De acuerdo a estas cifras, para fines de este trabajo se estimó el cargo promedio por kWh de \$1.91 (en 2011). Se obtuvo a partir de estadísticas disponibles en la página web de la CFE y con la ecuación 5.3, que en el periodo 2005-2015 hubo una inflación promedio de 5.8% anual en el precio de la Tarifa HM, por lo que el cargo promedio por kWh para el año 2015 en este estudio se consideró de \$2.39.

- Generador de ozono.

De acuerdo a los datos de gasto medio anual de 1.0 l/s, una dosis de ozono de 0.2 mg/l y usando la ecuación 3.10 se estimó que se requiere una producción promedio de ozono de 0.8 g_{O_3}/h , para la cual se seleccionó de un catálogo (Crystal Air, 2015) un generador de ozono con potencia de 60 W.

Suponiendo que el generador de ozono funcionará durante 13.5 horas al día, el consumo energético promedio al día se estimó de la siguiente forma:

$$E = 0.060 kW \cdot 13.5 h = 0.81 kWh$$

Se estimó el costo de operación del generador de ozono como se muestra a continuación:

$$C = 0.81 kWh \cdot 2.39 \frac{\$}{kWh} = \$1.94$$

- Bomba

Para el cálculo del costo de operación de la bomba de 5 HP de potencia, se siguió el procedimiento descrito a continuación:

$$P = 5 HP \cdot \frac{746 W}{1 HP} = 3.73 kW$$

Suponiendo que la bomba funcionará durante 13.5 horas al día, el consumo energético promedio al día se estimó de la siguiente forma:

$$E = 3.73 kW \cdot 13.5 h = 50.36 kWh$$

El costo diario promedio para el funcionamiento eléctrico de la bomba fue obtenido como:

$$C = 50.36 kWh \cdot 2.39 \frac{\$}{kWh} = \$120.35$$

Sumando los costos de la operación de la bomba y del generador de ozono, se obtuvo como cargo de operación diario \$122.29. Se consideró que hay 261 días en un año, sin contar los fines de semana, lo que significa que se tendrá un costo de operación anual de \$31,917.69, para el año 2015.

Costo de mantenimiento

De acuerdo a la información del proveedor, para el mantenimiento del equipo de generación de ozono y el equipo de oxígeno se debe hacer una inversión de \$34,375.00 por cada dos años de operación.

5.4 Estimación de costo por m³ de agua

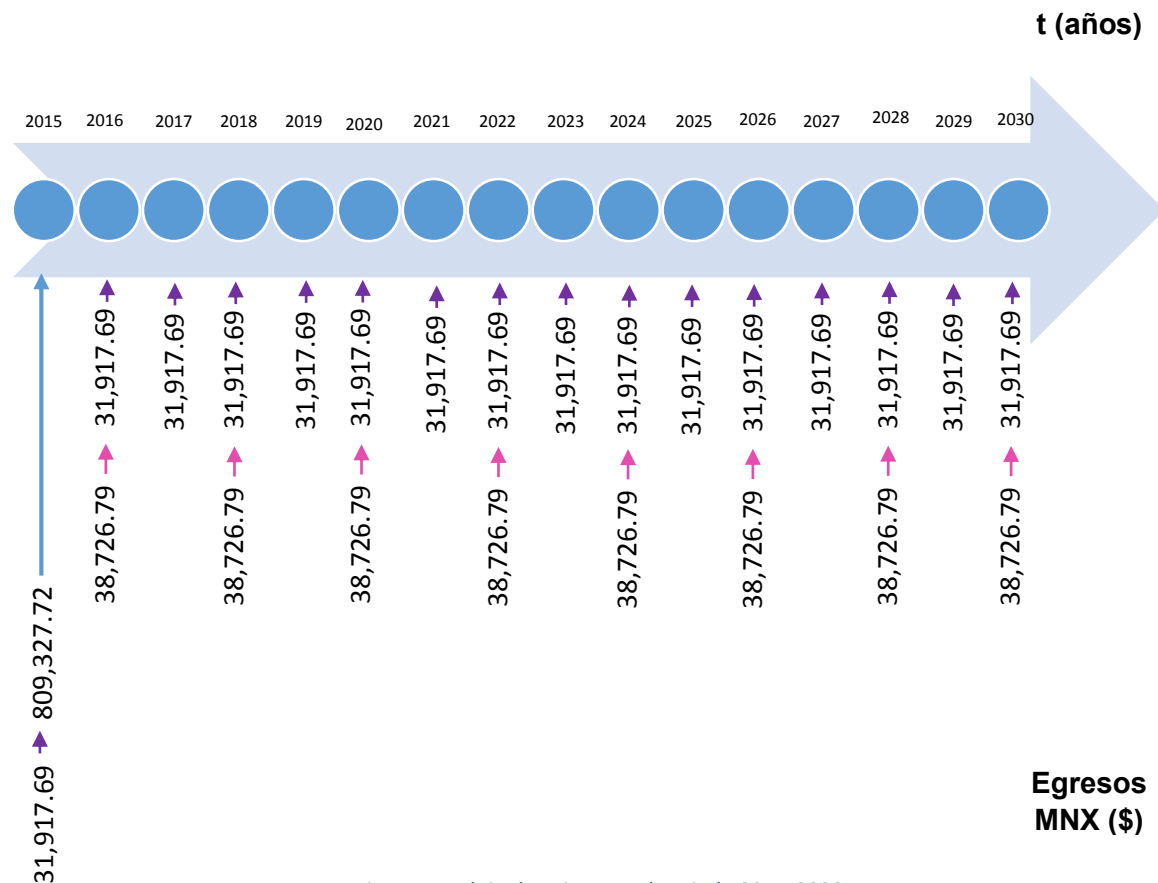


Figura 14. Flujo de caja para el periodo 2015-2030

Se tomó como tasa de interés al valor promedio de las tasas de inflación anual en México de 2010 a 2014 (Banco Mundial, 2015), obteniendo una tasa de inflación anual de 3.9% que se considerará constante durante el periodo de análisis y con

la que se calculó el valor futuro para el caso del mantenimiento. La operación se estimó con la tasa de 5.8% anual calculada anteriormente.

En la Figura 14 se observa el flujo de caja para el periodo 2015-2030. Se desglosaron todas las anualidades y se sumaron los pagos puntuales para obtener flujos netos de efectivo por año como se observa en la Tabla 51.

Tabla 51. Cálculo del valor presente neto para cada año del periodo 2015-2030

Año	Valor presente neto (MXN \$)			
	Costo de inversión	Costo de mantenimiento	Costo de operación	Costo anual
2015	\$809,327.72	\$0.00	\$31,917.69	\$841,245.41
2016	\$0.00	\$40,237.13	\$33,768.92	\$74,006.05
2017	\$0.00	\$0.00	\$35,727.51	\$35,727.51
2018	\$0.00	\$43,436.83	\$37,799.71	\$81,236.54
2019	\$0.00	\$0.00	\$39,992.09	\$39,992.09
2020	\$0.00	\$46,890.97	\$42,311.63	\$89,202.61
2021	\$0.00	\$0.00	\$44,765.71	\$44,765.71
2022	\$0.00	\$50,619.79	\$47,362.12	\$97,981.91
2023	\$0.00	\$0.00	\$50,109.12	\$50,109.12
2024	\$0.00	\$54,645.13	\$53,015.45	\$107,660.58
2025	\$0.00	\$0.00	\$56,090.35	\$56,090.35
2026	\$0.00	\$58,990.56	\$59,343.59	\$118,334.15
2027	\$0.00	\$0.00	\$62,785.52	\$62,785.52
2028	\$0.00	\$63,681.55	\$66,427.08	\$130,108.62
2029	\$0.00	\$0.00	\$70,279.85	\$70,279.85
2030	\$0.00	\$68,745.57	\$74,356.08	\$143,101.65
Total	\$809,327.72	\$427,247.53	\$806,052.40	\$2,042,627.65

Dado el gasto medio anual de 1 l/s, se estimó el costo por m³ de agua desinfectada, considerando que el diseño del sistema permite tener agua desinfectada en cualquier momento, 24 horas al día. En 15 años se tienen 338256000 segundos, por lo que se podrían desinfectar 338256 m³ de agua en este periodo.

$$\text{Costo por m}^3 \text{ de agua} = \frac{\$2,042,627.65}{338256 \text{ m}^3} = 6.04 \frac{\$}{\text{m}^3}$$

De tal manera que el costo será de \$6.04 por m³ de agua desinfectada con ozono, considerando una vida útil del equipo de 15 años. Podría abatirse si se considera una vida útil de 20 años.

6. Conclusiones

La presente propuesta fue parte del Proyecto Suministro de Agua Segura para el Instituto de Ingeniería de la UNAM y cumplió plenamente con los objetivos establecidos al inicio de esta investigación:

1. A partir de la información obtenida del área de estudio, se determinó el flujo de agua a tratar con el sistema de desinfección resultando un gasto máximo diario de 1.45 l/s. De acuerdo a la magnitud del flujo a tratar y la calidad del agua en la red de suministro, la implementación de un sistema de desinfección con ozono es viable desde un punto de vista técnico.
2. Se realizaron los cálculos necesarios y se siguió la normativa vigente de CONAGUA para la propuesta de modificaciones a la red actual del Instituto de Ingeniería. Como resultado de la revisión hidráulica las pérdidas de energía a lo largo de la red son del orden de 0.3 metros, prácticamente despreciables. Se confirmó la factibilidad técnica y operativa de la conexión de los edificios 2, 3 y 4 a la línea primaria de 4 pulgadas, así como de la instalación de bebederos.
3. Se realizó la estimación del costo de inversión del equipo y de las adaptaciones de infraestructura y la operación, así como el costo de operación y mantenimiento requerido a lo largo de la vida útil el cual se definió conservadoramente de 15 años. El costo total del sistema de desinfección con ozono se presupuestó en \$2,042,627.65 por lo cual se determinó que el costo por m³ de agua desinfectada con ozono sería de \$6.04.

Recomendaciones

El diseño de esta propuesta permitirá que el área en estudio sea abastecida con agua apta para consumo humano a través de todas las tuberías de agua potable que se derivan de la línea principal, lo que incluye las instalaciones hidráulicas de los baños, laboratorios y jardines. Se recomienda que en trabajos futuros se considere el diseño de una red de abastecimiento alterna para optimizar el uso del agua potable. También se requiere realizar una evaluación del proyecto con respecto a una estimación del costo y residuos generados de la compra de agua embotellada por los usuarios del área en estudio.

Asimismo se plantea la posibilidad de replicar el sistema de tratamiento para los edificios del Instituto de Ingeniería que no han sido considerados en los alcances del presente trabajo. Posteriormente se podría valorar la sustitución o complementación del método de desinfección usado actualmente a pie de los pozos de Ciudad Universitaria por un método de desinfección basado en el uso de ozono.

Bibliografía

ALVARADO, Isela. 23 de octubre de 2014. *Proyecto de Pumagua. A prueba, bebederos en la Facultad de Medicina*. Gaceta UNAM. Recuperado de: http://www.pumagua.unam.mx/assets/pdfs/publicaciones/cientificas/23_de_octubre_de_2014.pdf

BATALLER, Mayra O.; FERNÁNDEZ, Lidia A.; VÉLIZ, Eliet (2010). Eficiencia y sostenibilidad del empleo del ozono en la gestión de los recursos hídricos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Vol. 26 No. 1. México.

BRIERE, Francois (2011). *Drinking-Water Distribution, Sewage and Rainfall Collection*. Second Edition. Presses Internationales Polytechnique.

CASTILLO, Daniel (2014). *Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero en el área de energía en Ciudad Universitaria*. Posgrado de Ingeniería, UNAM.

CÉSAR, Enrique (1990). *Abastecimiento de agua potable, Volumen I*. UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Ingeniería Civil, Topografía y Geodésica, Departamento de Ingeniería Sanitaria.

Comisión Nacional del Agua (2001). *Norma técnica NT-008-CNA-2001: Determinación de consumos unitarios de agua potable*.

Comisión Nacional del Agua (2007a). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos de proyecto*.

Comisión Nacional del Agua (2007b). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento*.

Comisión Nacional del Agua (2007c). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Modelación hidráulica y de calidad del agua en redes de agua potable*.

Comisión Nacional del Agua (2007d). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Redes de distribución*.

DE SOUSA, Cristina; CORREIA, Angelina; COLMENARES, María Cristina (2010). *Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control*. Boletín de Malariología y salud ambiental. Vol. 5, N°2. Recuperado de: <http://www.scielo.org.ve/pdf/bmsa/v50n2/art03.pdf>

EDZWALD, James K. (2011). *Water Quality and Treatment: A Handbook on Drinking Water*. American Water Works Association.

Environmental Protection Agency (1999a). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con ozono.* Recuperado de: http://water.epa.gov/aboutow/owm/upload/2004_07_07_septics_cs-99-063.pdf

Environmental Protection Agency (1999b) *EPA Guidance Manual. Alternative Disinfectants and Oxidants.* Recuperado de: http://water.epa.gov/lawsregs/rulesregs/sdwa/mdbp/upload/2001_01_12_mdbp_alter_chapt_3.pdf

Environmental Protection Agency (2011). *Water Treatment Manual: Disinfection.*

Espinosa García Ana C., Carlos Díaz Ávalos, Fernando J. González Villarreal, Rafael Val Segura, Velvet Malvaez Orozco, Marisa Mazari Hiriart. *Drinking Water Quality in a Mexico City University Community: Perception and Preferences.* Publicado en línea: 30 de septiembre de 2014. Recuperado de: http://www.pumagua.unam.mx/assets/pdfs/publicaciones/cientificas/ECH_2014_bottled_water.pdf

FRANCO, Luis Eduardo (2006). *Cálculo de redes de agua potable considerando flujo permanente.* Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

FUENTES, O.A; PALMA, A; RODRÍGUEZ, K. (2011). *Estimación y localización de fugas en una red de tuberías de agua potable usando algoritmos genéticos.* Ingeniería Investigación y Tecnología. Vol. XII, Núm. 2. Recuperado de: <http://www.journals.unam.mx/index.php/ingenieria/article/view/26996>

Gaceta del Instituto de Ingeniería UNAM. Junio de 2011. Número 71. Recuperado de: <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/Publicaciones/GacetaElectronica/Documents/71GacetaJunio2011.pdf>

GILES, Randal V.; EVETT, Jack B.; LIU, Cheng (1994). *Mecánica de los fluidos e hidráulica.* Tercera edición. McGraw-Hill.

GONZÁLEZ, Fernando J.; VAL, Rafael; ROCHA, José Daniel (2010). *Sistema integral de medición de agua potable en Ciudad Universitaria de la UNAM.* PUMAGUA. Recuperado de: www.agua.unam.mx/assets/pumagua/articulo%20completo_fgv.doc

GONZÁLEZ, Fernando (2011). *La UNAM comprometida con el Agua. Programa de Manejo, Uso y Reuso del Agua en la UNAM.* Recuperado de: <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/MemoriasdeEventos/Documents/SemanaVerde2011/05%20VIERNES%20Aqua/PUMAGUA.pdf>

HERNÁNDEZ, Aurelio (1990). *Abastecimiento y distribución de agua. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.* Madrid, España.

Instituto de Ingeniería, UNAM (2012). *Plan de desarrollo 2012-2016.* Recuperado de: <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/Organizacion/Planeacion/PlanDesarrolloII/Paginas/PlanDesarrollo20122016.aspx>

Instituto de Ingeniería, UNAM (2013). *Segundo Informe de Actividades.* Recuperado de: <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/Organizacion/Informes/Documents/Informe2013.pdf>

Instituto de Ingeniería, UNAM (2014a). *Los planos de las instalaciones del IIUNAM*. Recuperado de: <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/BancodelImagenes/Documents/PlanosdeinstalacionesIIUNAM.pdf>

Instituto de Ingeniería, UNAM (2014b). *Los becarios en el Instituto de Ingeniería*. Recuperado de: <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/BancodelImagenes/Documents/BecariosdelIIUNAM.pdf>

Instituto Mexicano del Seguro Social (1987) *Guía de saneamiento básico industrial*. Recuperado de: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/eco/000647/0647-04.pdf>

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (2012). *El valor del dinero en el tiempo, matemáticas financieras*. México, D.F.

KNOBELSDOFR, Juliana; MUJERIEGO, Rafael (1997). *Crecimiento bacteriano en las redes de distribución de agua potable: Una revisión bibliográfica*. Ingeniería del Agua. Vol. 4 Núm. 2.

LANGLAIS, B.; RECKHOW, D.; BRINK, D. (1991) *Ozone in Water Treatment, Application and Engineering*. American Water Works Association.

LAZCANO, C.A. *Fallas y problemas de la desinfección urbana*. Lima, Perú. Recuperado de: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/e/fulltext/simposio/ponen2.pdf>

MARINI, Eva Carolina (2013). *Plan de seguridad del agua para la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México*. Recuperado de: http://www.agua.unam.mx/jornadas2013/assets/resultados/proy_desarrollo/marini_eva.pdf

National Environmental Services Center at West Virginia University (2010) *Desinfección*. Recuperado de: http://www.nesc.wvu.edu/pdf/dw/publications/ontap/2010_tb/spanish/disinfection_DWFSO_M149.pdf

NAVA, Ricardo; OLIVARES, Gabriel Eduardo (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*. Facultad de Química, UNAM.

Organización Mundial de la Salud (2006). *Guías para la calidad del agua potable [recurso electrónico]: incluye el primer apéndice. Vol. 1 Recomendaciones*. Tercera edición. Recuperado de: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwg/gdwg3_es_full_lowres.pdf

Programa de Manejo, Uso y Reúso del Agua en la UNAM (2009). *Anexo Balance Hidráulico*. Recuperado de: http://www.pumagua.unam.mx/assets/pdfs/informes/2009/balance_hidraulico_2009.pdf

Programa de Manejo, Uso y Reúso del Agua en la UNAM (2010a). Informe de avances. Recuperado de: http://www.pumagua.unam.mx/assets/pdfs/informes/2010/avances_2010.pdf

Programa de Manejo, Uso y Reúso del agua en la UNAM (2010b). Informe de avances. Resumen Ejecutivo. Recuperado de: http://www.pumagua.unam.mx/assets/pdfs/informes/2010/resumen_ejecutivo_2010.pdf

RODRÍGUEZ, Pedro (2001). *Abastecimiento de agua*. Instituto Tecnológico de Oaxaca.

SOLSONA, Felipe; MÉNDEZ, Juan Pablo (2002). *Desinfección del agua*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Organización Panamericana de la Salud.

SOTELO, Gilberto (1997). *Hidráulica General. Volumen 1- Fundamentos*. Editorial Limusa.

SWANCARRA, John (2008). El Uso Efectivo del Ozono en la Producción de Agua Embotellada. Recuperado de: http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/Swancarra_V12N8.pdf

TRIFUNOVIC, Nemanja (2006) *Introduction to Urban Water Distribution*. UNESCO-IHE Series.

Tzatchkov, Velitchko G.; Izurieta, Jorge (1996). Sistema de cómputo para el análisis y diseño óptimo de redes de distribución de agua potable. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XI, Núm. 2.

TZATCHKOV, Velitchko Guerguiev (2014) *Avances en la hidráulica de redes de distribución de agua potable*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

ZAMORA, Albino (2012). *Diseño de un sistema hidroneumático para fuentes controladas*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Querétaro.

Fuentes electrónicas

Comisión Federal de Electricidad (2014). http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp?Tarifa=CMA S&Anio=2015 (Consulta junio 2015)

Crystal Air <http://www.ozone.ca/products/pro3400.htm> (Consulta junio 2015).

Mazzei Injector Company, <http://mazzei.net/es/install/> (Consulta marzo 2015).

Portal del programa de manejo, uso y reuso de agua en la UNAM, PUMAGUA. <http://www.pumagua.unam.mx/> (Consulta noviembre 2014).

Portal del programa de manejo, uso y reuso de agua en la UNAM, PUMAGUA. http://www.pumagua.unam.mx/calidad_agua.html (Consulta junio 2015).

Torre de Ingeniería, UNAM (2014). Recuperado de: <http://www.torreingenieria.unam.mx/>