



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

TESIS

**“DISPOSITIVOS DE CONTROL DE PRESIÓN EN LA RED
SECUNDARIA DE AGUA POTABLE EN LA CIUDAD DE MÉXICO”**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

MEDINA PEÑA HAZEL

DIRECTOR DE TRABAJO:

ING. JOSÉ ORTEGA MONDRAGÓN

NEZAHUALCÓYOTL, ESTADO DE MÉXICO, 2022



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.

Dedicado a¹

Julia Cabrera Villegas

“Todo logro aquí es más tuyo que mío”

A2

Selena Estefanía Zepeda Lugo

"De mí tu nombre, ángel y bandera;
tiempo y culpa de lo que pasa en él"

A₃ mi hermana

M. en M. Esp. en P. Sofía Viridiana

A todos mis amigos

A mi padre

A mis tías Rosa y Luz

A Itzel Ivonne Guerra Olivares

Agradecimientos al M. en I. José Trinidad

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1. Generalidades de las redes de distribución de agua potable.....	3
Enfermedades relacionadas con el agua.....	4
Sistema de abastecimiento de agua potable.....	5
Elementos de la red de agua potable.....	6
Elementos principales.....	6
Fuente de abastecimiento.....	7
Obra de toma.....	7
Línea de conducción.....	8
Red primaria.....	8
Red secundaria.....	9
Elementos secundarios.....	9
Planta de bombeo.....	9
Dispositivos de control de transitorios.....	10
Válvulas de control.....	10
Tanques de cambio de régimen.....	10
Tanques de almacenamiento.....	10
Tanques de regulación.....	11
Tanques elevados.....	11
Plantas potabilizadoras.....	11
Telemetría.....	11
Vida útil.....	12
Horizonte de proyecto.....	13
La vinculación de la hidráulica con otras disciplinas.....	14
Capítulo 2. La sectorización en la Ciudad de México.....	16
Hidráulica en la Ciudad de México ubicado en el tiempo.....	19
México antiguo.....	19

Época Virreinal.....	21
Primeros años de México independiente.....	23
Época de la post revolución.....	24
México en la época contemporánea.....	25
Problemas actuales en el abastecimiento de agua potable.....	30
Acueductos.....	30
Tratamiento y potabilización de agua.	30
Corrosión interna de las tuberías.	31
Organismos de operación de la red de distribución.	32
Fugas y carácter migratorio de las fugas.	33
Fugas.....	33
Carácter migratorio de las fugas.	34
Sectorización como alternativa de solución.	35
Estado actual de la red primaria de agua potable de la Ciudad de México.	36
Capítulo 3: Aspectos técnicos de hidráulica en la red secundaria.	40
Fundamentos de hidráulica.	44
Presión hidrostática.	44
Ecuación de continuidad.....	44
Ecuación de energía y principio de Bernoulli.	45
Pérdidas por fricción.	48
Variable f para el cálculo de pérdidas por fricción.....	48
Las pérdidas por accesorios.	52
Dotación.....	53
Implementación de un sector.	55
Velocidades máximas y mínimas.....	55
Presiones máximas y mínimas.	56
Diseño del sector de la red secundaria.	56
Balance del sector.	57
Softwares como herramienta de simulación para la sectorización.	58

Capítulo 4. Dispositivos de control de presiones.	59
Análisis del sistema Lerma en la Ciudad de México.	59
Dispositivos de control de presión.	62
Bombas hidráulicas.	63
Bombas de volumen fijo.	63
Bombas de engranes de baja y alta presión.	64
Bombas de engranes de 1500 y 2000 Lb/plg ²	64
Bombas de Pistón.	65
Cálculo de bombas hidráulicas.	66
Cálculo de las curvas de una bomba.	67
Golpe de ariete.	70
Velocidad específica.	71
Válvulas de alivio.....	71
Válvula de reducción de presión.	71
Válvula reductora de presión con compensación de flujo.	72
Válvula de alivio de presión rápida.	73
Selección de válvulas VPR.	73
Revisión por cavitación.	75
Softwares en la modelación.....	76
Conclusiones y futuras líneas de trabajo.....	78
Referencias.....	81
Bibliografía.....	81
Apuntes de clase.....	82
Referencias en internet.....	83

Introducción

Existe un recurso natural el cual es indispensable para toda actividad humana, el agua, ya que posee un papel vital para el funcionamiento y desarrollo de los ecosistemas, por lo que la ausencia o presencia de ésta significaría un impacto al ecosistema.

En términos generales, el planeta Tierra está cubierto en su superficie por un 70% de agua, solo que grandes cantidades de ésta no son aptas para consumo humano; es apenas una pequeña cantidad de agua la que se considera potable que corresponde a un 2.5 % del total.

El agua dulce se puede encontrar en distintos tipos de cuerpo de agua, entre los más importantes por su cantidad se encuentran los glaciares que corresponden alrededor del 70 % del agua dulce en el planeta, otra fuente importante de este recurso es el agua subterránea que se calcula en un 29% del total de agua dulce; en cuanto a ríos, lagos y agua atrapada en la atmósfera abarcan alrededor del 1%.

Se entiende entonces que el agua dulce es un recurso bastante limitado, por lo que resulta común hallar poblaciones asentadas alrededor de cuerpos de agua dulce los cuales suelen ser cuerpos superficiales como los son principalmente ríos, lagos y lagunas permitiéndoles la subsistencia y el desarrollo a las poblaciones cercanas.

Con los datos mencionados anteriormente se puede entender que existirán grandes extensiones de tierra que se encuentran alejadas de los cuerpos importantes de agua dulce y superficial, por lo que habrá poblaciones cuyo abastecimiento dependerá de otros medios como la extracción del agua subterránea; sin embargo la explotación descontrolada genera problemas graves por lo que el suministro de agua potable para este tipo de poblaciones será un reto importante para la ingeniería y para la sociedad en general.

Debido al crecimiento desorganizado que ha tenido la población en el último siglo es común encontrar que la demanda de agua potable haya superado desde hace tiempo a los sistemas de abastecimiento actuales, es entonces que surge la necesidad de mejorar dicho sistema el cual debe garantizar la continuidad y presión del recurso. Para ello en este trabajo se abordan los problemas y soluciones que se le ha intentado dar a la red de abastecimiento así como las consecuencias que estas provocan.

Una vez comprendidas las consecuencias que provocaron las soluciones a los problemas que presentaron los sistemas de abastecimiento de agua potable en la Ciudad de México se introduce el tema de la sectorización, clave para el control de

la continuidad y presión en la red secundaria. El tema de la sectorización se aborda como una medida para mejorar el sistema de abastecimiento, exponiendo así sus principales características del sistema. De esta forma se puede entender mejor el contexto de los dispositivos reguladores de presión en los sectores y su importancia.

Para ser precisos en el capítulo 1 se mencionan los aspectos generales de las redes de distribución de agua potable, además de hablar sobre las principales problemáticas y soluciones que se le ha intentado dar a las redes de agua potable y cómo aborda la sectorización soluciones para cada uno de los problemas.

La ingeniería civil se encarga de la infraestructura que necesita la sociedad, por lo tanto es necesario el estudio particular de la sociedad que impacta, de esta manera se puede mencionar que el capítulo 2 da un contexto social, histórico y político para lograr una mejor comprensión de la situación de la Ciudad de México vinculado a la gestión del recurso.

El capítulo 3 se refiere a los aspectos técnicos generales que implican las redes de distribución de agua potable.

De manera que implementando la información obtenida de los capítulos anteriores para el capítulo 4 se tiene el contexto necesario para abordar la información de los dispositivos de control de presiones en las redes de agua potable así como una profundización en dichos dispositivos seguidos del último capítulo, el cual contiene las conclusiones obtenidas.

Capítulo 1. GENERALIDADES DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE.

El recurso del agua es vital para toda actividad humana, ya que de ella depende desde el ecosistema en el que se desarrolla dicha actividad hasta la subsistencia y actividades de las personas. Desde el agua que se usa para el riego, para preparar los alimentos, para enfriar máquinas pesadas hasta para evacuar y limpiar los desechos que de la actividad humana emanan.

El recurso del agua se puede clasificar por su uso en las actividades humanas las cuales son para uso doméstico, uso industrial y para la agricultura. Se ha estimado que el consumo de agua, en un promedio mundial, está destinado en un 22% para el uso industrial, contando con el 8% para consumo doméstico y un 70% para la agricultura.

CONAGUA, a través del gobierno de México estima que el 2.5% del agua total es agua dulce, 10.5 millones de hm^3 se encuentran como agua subterránea y solo el 0.14 billones de hm^3 se encuentran en lagos, ríos, humedad en el suelo, la atmósfera, humedales y plantas.

No obstante no es solo la actividad humana quien requiere del agua dulce, por lo existe el concepto de “caudal ecológico” el cual hace referencia a una demanda mínima de agua que debe tener el ecosistema para no verse afectado.

Debido al crecimiento demográfico se ha podido apreciar un aumento de demanda de agua potable, por lo que se debe captar el agua de lugares cada vez más lejanos y cada vez más profundos, entendido de otra forma como mayores costos de extracción, operación y mejores tecnologías.

Resulta complicado comprender el comportamiento del medio ambiente sin la intervención que implica la actividad humana, ya que con tan pocos años de estudio, y con éstos tan limitados, los resultados arrojados presentan una gran incertidumbre. Sin embargo hay acciones que están generando un deterioro inmediato en los ecosistemas como lo es la extracción de un volumen de agua superior al volumen de recarga, la contaminación de los cuerpos de agua y extracción que deja al cuerpo de agua sin su caudal ecológico.

Los problemas principales de la sobreexplotación de cuerpos de agua, además de agresivos deterioros al ecosistema, son que dichos deterioros provocan una menor recarga en los cuerpos de agua; otro tipo de consecuencias son los hundimientos diferenciales cuando se sobreexplotan los acuíferos que suelen

ocasionar daños persistentes a la infraestructura y a los domicilios. Existen diversas razones como la baja proporción y accesibilidad al agua dulce, así como el deterioro ambiental como para hacer de la gestión del agua una prioridad tecnológica, administrativa y cultural.

Enfermedades relacionadas con el agua.

Aun en los manantiales, en los ríos o en aguas subterráneas sin intervención humana se podrá hallar la presencia de una gran cantidad de contaminantes con distintas concentraciones; es frecuente encontrar el mismo tipo de contaminante en los mismos tipos de cuerpo de agua, por ejemplo, los ríos al estar expuestos a la atmósfera tendrán contaminantes turbulentos y el agua de pozos tendrá altas concentraciones de sales y cantidades bajas de oxígeno diluido. Cuando se consumen estos contaminantes en concentraciones arriba de las preestablecidas será común encontrar que la población que ingiere el agua tiene problemas severos de salud.

Tabla 1.1 Enfermedades relacionadas con el agua.

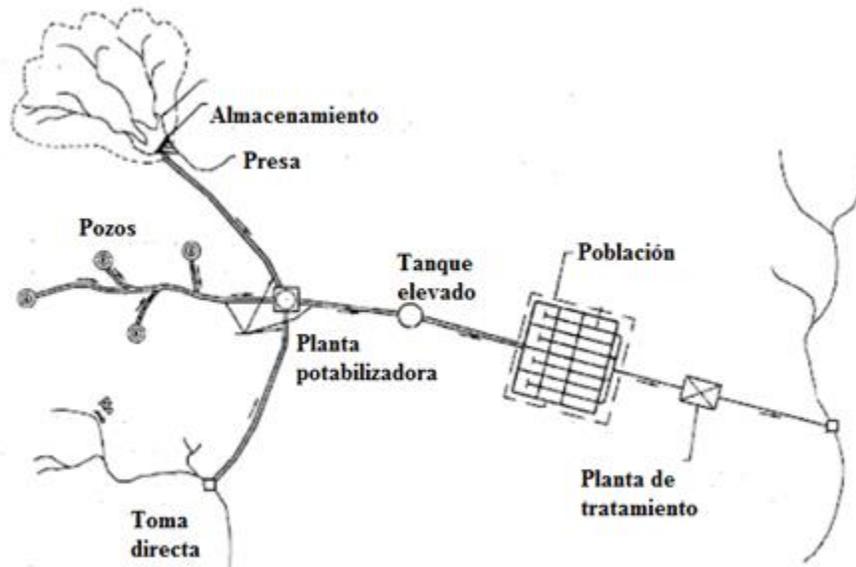
Grupo de enfermedades	Comentario	Enfermedades que producen
Enfermedades transmitidas por el agua (wáter-norne diseases).	En este grupo de enfermedades el agua actúa como un vehículo pasivo del agente infeccioso al ser ingerido en el agua contaminada. Se producen debido a una pobre calidad de la potabilización del agua para uso y consumo humano.	Cólera Tifoidea Disentería bacilaria Hepatitis infecciosa Leptospirosis Giardiasis Gastroenteritis
Enfermedades debidas a la carencia de agua (wáter-washed diseases).	Se relacionan con la falta de higiene personal y el uso de agua de baja calidad en las actividades diarias como lavar y bañarse. También dependen de la insuficiencia de recursos para la disposición adecuada de residuos humanos.	Infecciones de los ojos y la piel Conjuntivitis Salmonelosis Tracoma Fiebre paratifoidea Ascariasis
Enfermedades causadas por agentes infecciosos esparcidos por el contacto y/o ingestión de agua (wáter-related diseases).	Estas enfermedades se producen cuando parte del ciclo de vida de un agente infeccioso tiene lugar en un medio acuático.	Fiebre amarilla Malaria Arbovirus Dengue
Enfermedades causadas por agentes infecciosos, ingeridos en diversos alimentos (pescado) que están en contacto con agua contaminada.	Este grupo de enfermedades son producidas al ingerir alimentos contaminados por la bioacumulación de ciertos contaminantes o por microorganismos que habitan en el agua.	Clonorsiacis

Nota: Enfermedades relacionadas con el agua, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Diseño de plantas potabilizadoras tipo de tecnología simplificada, CONAGUA (p. 9).

En la tabla 1.1 se describen las enfermedades principales que causa ingerir aguas contaminadas. Entre los casos extremos se tiene un registro en la fecha de los años 70's, en Tamaulipas, donde los niños recién nacidos nacían sin masa encefálica, entre otros problemas serios al resto de la población, tras investigar el tema se encontró que la causa principal era el consumo de agua con altos contaminantes, lo que hizo más severas las normas de calidad en el agua para consumo humano. El riesgo salubre que implican las aguas contaminadas demanda normas severas y plantas potabilizadoras en una red de agua potable.

Sistema de abastecimiento de agua potable.

Figura 1.1 Configuración típica de un sistema de abastecimiento de agua en localidades urbanas.



Nota: Configuración típica de un sistema de abastecimiento de agua en localidades urbanas, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado, CONAGUA (libro 12, p. 1).

Un sistema de red de abastecimiento se refiere a la infraestructura cuya función es suministrar de agua potable a una población transportando el recurso desde un cuerpo de agua hasta los usuarios de la misma red a través de los elementos que la componen.

Clasificando a los sistemas de abastecimiento por el funcionamiento en el que trabajan existen los sistemas con funcionamiento a gravedad y los sistemas con funcionamiento por bombeo; los elementos que componen cada sistema tendrán diferencias en cuanto a la infraestructura.

El funcionamiento de la red se refiere a cómo adquiere el agua energía para llegar a los usuarios que la componen. El funcionamiento a gravedad requiere de un tanque elevado o un embalse a una mayor elevación que la elevación que le dé al agua una energía de al menos 15 mca mayor a la que se encuentran los usuarios de la red. El funcionamiento por bombeo tiene lugar cuando el agua no tiene energía de posición por sí sola o cuando las pérdidas de energía son tales que el recurso no puede llegar a los usuarios de la red, por lo que se suministra energía a la red a través de plantas de bombeo.

La infraestructura entre distintos tipos de redes de abastecimiento dependerá principalmente del relieve (cotas) y las distancias entre la línea de conducción y los usuarios de la red; en ocasiones el sistema puede requerir túneles, canales, plantas de bombeo, puentes o grandes tuberías. La infraestructura entre distintos sistemas tendrás elementos que se adapten a las necesidades de cada red.

En la figura 1.1 se puede observar un sistema de abastecimiento de agua potable alimentado de tres fuentes distintas: un embalse, pozos y de forma directa al cuerpo de agua natural. Por lo general las pequeñas poblaciones requieren de solo una fuente de abastecimiento, en cambio el reto que representa dar abasto de agua potable a las ciudades con grandes dimensiones poblacionales hace la demanda del recurso aumente y requiera por lo general más de una fuente de abastecimiento.

Elementos de la red de agua potable.

Elementos principales.

Diversos elementos de una red de agua potable son representados en la figura 1.1 por lo que es necesario el entendimiento del funcionamiento de las partes más importantes de la red de abastecimiento de agua potable además de mencionar y describir otros elementos con la misma importancia. Los elementos que debe tener toda red de abastecimiento son los siguientes:

- Fuente de abastecimiento
- Obra de toma
- Línea de conducción
- Red primaria y secundaria

Fuente de abastecimiento.

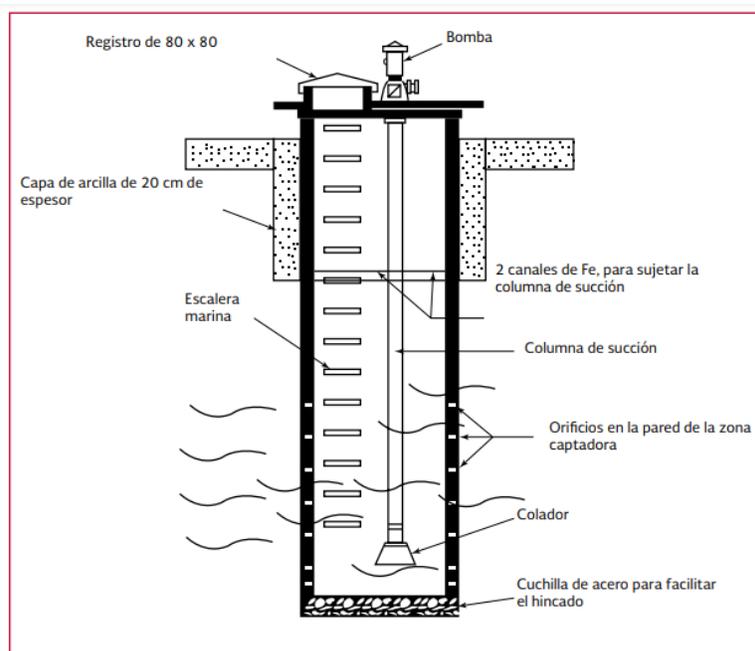
Es un cuerpo de agua del cual se obtiene el recurso necesario que suministra la red de agua potable; estos pueden ser de origen superficial o subterráneo. En los cuerpos de agua superficiales se encuentra generalmente a los ríos, lagos y lagunas, la extracción de agua subterránea se refiere generalmente a las aguas freáticas, acuíferos y ríos subterráneos.

Cuando el agua atmosférica se precipita sobre la superficie, una cantidad es absorbida por el suelo antes de escurrir sobre la superficie; se tiene el dato de que el 29% de agua dulce en el planeta se encuentra localizada por debajo de la superficie, por lo que es normal encontrar poblaciones que aprovechen el agua de ríos subterráneos y acuíferos.

Obra de toma.

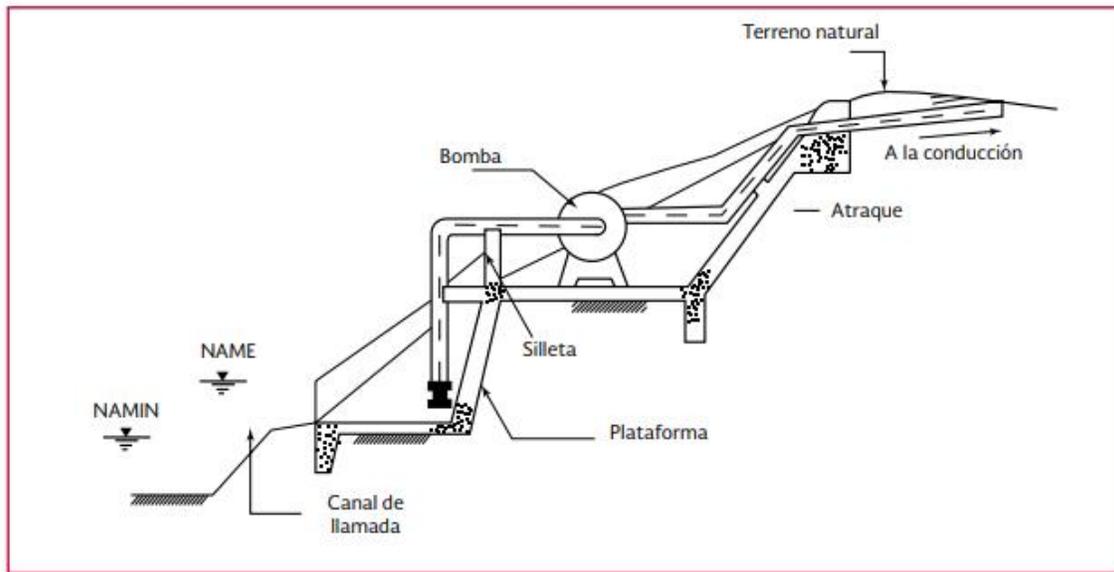
Como se observa en las figuras 1.2 y 1.3, las obras de tomas son las infraestructuras que cuentan con el equipo necesario cuyo objetivo es la extracción de agua de la fuente de abastecimiento ubicada a su cercanía para dirigir el agua a una línea de conducción.

Figura 1.2 Obra de toma en pozo.



Nota: Obra de toma en pozo, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Obras de captación superficiales, CONAGUA (libro 7, p. 100).

Figura 1.3 Obra de toma directa.



Nota: Obra de toma directa, normalmente la obra de toma directa en un cuerpo de agua y en un dique tienen grandes similitudes, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Obras de captación superficiales, CONAGUA (libro 7, p. 28).

Línea de conducción.

Es la obra que conduce el agua desde la obra de toma a un tanque elevado, tanque de cambio de régimen o a la red primaria. Está conformada por tuberías, bridas, codos, atraques, válvulas de control, además de la infraestructura necesaria como túneles sobre los que pase la línea, también puede estar conformada por un sistema de canales si resulta conveniente aprovechar su funcionamiento a gravedad.

Red primaria.

Se encuentra principalmente compuesta de tuberías con un diámetro mayor a 12", también requiere de otros elementos como atraques, uniones, cambios de dirección y válvulas de control principalmente. Generalmente se recomienda mantener presiones altas en la red primaria para evitar las plantas de bombeo que ocasionan costos adicionales, también se recomienda tener pocas conexiones a la red secundaria teniendo en estas un control de presiones como estrategia para el control de fugas.

Red secundaria.

Está compuesto en su mayoría por tuberías de un diámetro menor a 12" requiriendo de los mismos elementos que la red primaria pero con tamaños acordes al tamaño de la tubería y gastos que la conforman; las presiones en la red secundaria a comparación de la red primaria serán menores debido a la relación fuga-presión la cual debería rondar idealmente los 15 mca; es a la red secundaria a la cual se conectan los usuarios.

Elementos secundarios.

Los problemas que enfrentan distintas poblaciones para lograr el suministro de agua coincidirán en los aspectos de continuidad y presión principalmente, pero existirá una variedad bastante enriquecida sobre los problemas que las ocasionan. Es necesario garantizar el recurso por lo que así como en cantidad de problemas existirá un número similar en cantidad de soluciones que se le ha intentado dar para la solución del problema y cada solución tiene por lo común sus propios elementos secundarios.

Los elementos secundarios son dispositivos, equipo o infraestructura que se implementa para solucionar las problemáticas que tengan las distintas redes de agua potable para su funcionamiento y eficiencia, los cuales son las plantas de bombeo, los dispositivos de control de transitorios, los tanques de cambio de régimen, tanques elevados, tanques de almacenamiento, las plantas potabilizadoras, el equipo de telemetría, los dispositivos de control de presiones, entre otros accesorios que son usados para necesidades más específicas que presentan algunas redes.

Planta de bombeo.

Una planta de bombeo es una instalación que cuenta con maquinaria, instrumentos y suministro de energía para los equipos; la finalidad de la planta es suministrar de energía al agua para que pueda alcanzar cierta elevación, presión o incluso para vencer pérdidas de energía por fricción y accesorios que por las características del sistema que por sí sola la energía que lleva el agua no lograría.

Algunas plantas pueden bombear agua directo a la red secundaria, sin embargo esto no se recomienda si la eficiencia de la red es baja debido a que la presión con la que sale el agua del pozo es constante, pero la demanda varía en el día por lo que el gasto en ciertas horas del día disminuiría por lo cual la velocidad también

lo haría y al mantener la elevación del agua constante ocasionará que la presión aumente, provocando que las fugas que son directamente proporcionales a la presión también incrementen.

Las plantas de bombeo generan un consumo considerable de energía eléctrica, por lo que la operación de la red sería más costosa, así que se debe evitar las plantas de bombeo prefiriendo el funcionamiento a gravedad en lo posible.

Dispositivos de control de transitorios.

Son equipos que ayudan a mitigar lo que se conoce como el golpe de ariete, una sobrepresión en la red generada por un paro súbito de la red y el de las subpresiones ocasionadas por el arranque de la red cuando no se encuentra en operación.

Algunos ejemplos de dispositivos de control de transitorios son las cámaras de aire, torres oscilatorias y torres unidireccionales. Los dispositivos de control de transitorios se encuentran protegiendo desde pequeños dispositivos como inodoros hasta grandes dispositivos como bombas, líneas de conducción y turbinas.

Válvulas de control.

Son equipos cuya finalidad son controlar factores en el flujo del agua como lo puede ser el sentido de flujo, el gasto en la conducción, la presión a la salida de la válvula, el aire dentro de la red y el cierre total del flujo para la red primaria y secundaria.

Tanques de cambio de régimen.

Son tanques con una geometría sencilla cuya finalidad es conectar la línea de conducción con la red primaria cambiando el funcionamiento de la red de uno por bombeo a uno a gravedad. Una característica del tanque es que rompe con la presión que lleva la línea de conducción y lleva el agua a una presión atmosférica.

Tanques de almacenamiento.

Como su nombre lo indica son tanques que almacenan grandes cantidades de agua conectados a la red primaria. La ventaja principal de estos tanques es el de

disponer de agua durante obras de mantenimiento, épocas de estiaje y desastres, un funcionamiento parecido lo tienen los embalses y presas de almacenamiento.

Tanques de regulación.

En algunos casos la demanda de agua de la población es alta y los tanques de almacenamiento cambian a tener la función de un tanque de regulación, el cual tiene la característica de controlar la carga estática con la que se suministra a la población, manteniendo presiones altas durante horas de máxima demanda y presiones bajas en horas con baja demanda. Suelen ser los horarios de baja demanda donde la red secundaria tiene más presión por disminuir el gasto, lo que hace que las fugas, en función de la presión, aumenten su intensidad. Los tanques de regulación son un elemento clave para controlar las fugas.

Tanques elevados.

Son almacenamientos que se encuentran en una posición geográfica con más elevación que la red primaria cuya finalidad es garantizar una carga de posición para mantener presiones que idealmente rondan los 15 mca en la red secundaria. Los tanques elevados permiten un funcionamiento a gravedad de la red, además de tener en ocasiones la ventaja de ser utilizados como tanques reguladores.

Plantas potabilizadoras.

Son instalaciones que toman el agua que se capta y a través de procesos hidráulicos, mecánicos y químicos que garantizan la ausencia de concentraciones tóxicas de distintos minerales, compuestos químicos y organismos dañinos para la salud humana.

Las plantas potabilizadoras tienen distintos procesos según la procedencia del agua, nivel y diversidad de contaminantes. Las plantas potabilizadoras deben situarse en un punto intermedio entre la obra de captación y la red primaria.

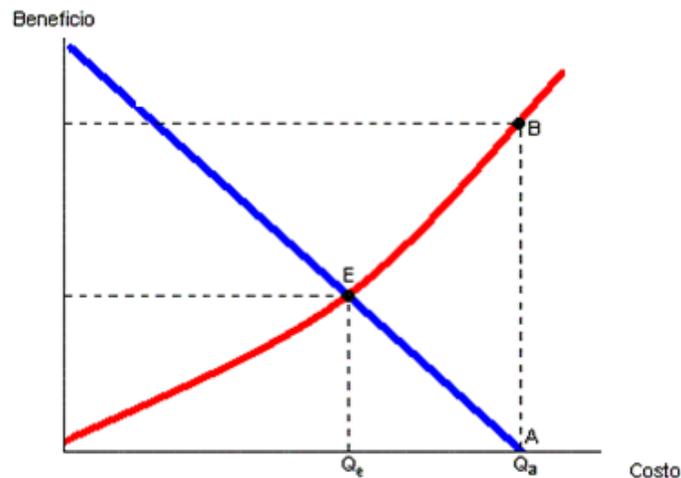
Telemetría.

Es un elemento no indispensable pero altamente funcional, consiste en la toma de datos y el envío de información a un centro de monitoreo. Los datos que se registran son la velocidad, caudal, calidad y presión.

Conocer las presiones en la red es de vital importancia debido a que son clave para entender el comportamiento de la red, cualquier alteración no planeada en la presión de la red indicaría un mal funcionamiento en esta, lo que disminuye la eficiencia de ésta, algunas de las razones por las cuales se podría ver limitada una red puede ser la existencia de fugas o de salidas de volúmenes no registradas en redes cerradas, así como el cierre clandestino de tuberías o daño en el equipo.

Los elementos mencionados tienden a ser diseñados con un equilibrio como lo indica un ejemplo de gráfica de costo beneficio en la figura 1.4, la cual se refiere a un menor costo por un mayor beneficio y dicho beneficio se refiere a que la obra no se vea superada en capacidad.

Figura 1.4 Gráfica tipo comparativa costo-beneficio.



Nota: gráfica para ejemplificar el punto de convergencia entre el costo y el beneficio.

Vida útil.

La vida útil es el tiempo en el que se espera que la obra sirva a los propósitos de diseño sin tener gastos de operación y mantenimiento elevados que hagan antieconómico su uso o requiera ser eliminada por insuficiencia, en otras palabras que la conservación y mantenimiento de la obra no superen el costo de la misma.

Horizonte de proyecto.

En cuanto al tiempo de proyección a futuro u horizonte de proyecto es el tiempo que tardaría la obra en llegar a su nivel de saturación, dicho periodo debe ser menor al de la vida útil en sus elementos principales. El manual de, agua potable, alcantarillado y saneamiento propone la vida útil que se debe considerar para los elementos del sistema de abastecimiento indicados en la tabla 1.2, asimismo en la tabla 1.3 se indica el periodo de diseño con el cual se sugiere calcular los elementos de la red.

Tabla 1.2 Vida útil de elementos de un sistema de agua potable y alcantarillado.

Elemento	Vida útil (Años)
Pozo: Obra civil	de 10 a 30
Equipo electromecánico	de 8 a 20
Línea de conducción	de 30 a 40
Planta potabilizadora: Obra civil	40
Equipo electromecánico	de 15 a 20
Estación de bombeo: Obra civil	40
Equipo electromecánico	de 8 a 20
Tanque: Elevado	20
Superficial	40
Red de distribución primaria	de 20 a 40
Red de distribución secundaria	de 15 a 30
Red de atarjeas	de 15 a 30
Colector y emisor	de 20 a 40
Planta de tratamiento: Obra civil	40
Equipo electromecánico	de 15 a 20

Nota: Vida útil de elementos de un sistema de agua potable y alcantarillado, Recuperado del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado, CONAGUA (libro 4 pp. 4).

Tabla 1.3 Periodos de diseño para elementos de sistemas de agua potable y alcantarillado.

Elemento	Periodos de diseño (Años)
Fuente	10 hasta 50
Pozo	de 10 a 20
Embalse (presa)	hasta 50
Línea de conducción	de 20 a 30
Planta potabilizadora	de 10 a 20 (más crecimiento modular)
Estación de bombeo	de 10 a 20 (más crecimiento modular)
Tanque	de 10 a 20
Distribución primaria	de 10 a 20
Distribución secundaria	estará en función de la saturación
Red de atarjeas	estará en función de la saturación
Colector y emisor	de 10 a 20
Planta de tratamiento	de 10 a 20 (más crecimiento modular)

Nota: Periodos de diseño para elementos de sistemas de agua potable y alcantarillado, Recuperado del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado, CONAGUA (libro 4 pp. 5).

La vinculación de la hidráulica con otras disciplinas.

El correcto funcionamiento de una red de abastecimiento de agua potable no depende únicamente de los fenómenos que estudia la hidráulica, es por esto que para el análisis de una red ya existente tanto como para el diseño de una se requiere el estudio desde distintas disciplinas.

Estudiar o diseñar el trazo de los elementos de una red de agua potable influye en la energía de posicionamiento que tendría el agua en cada elemento por su elevación, si la elevación de la fuente de abastecimiento o línea de conducción fuera más baja que el promedio de los usuarios de la red entonces el agua no tendría la energía suficiente para llegar a los usuarios, por lo que muy probablemente la red deba tener un funcionamiento por bombeo, mientras que si la obra de toma se encuentra a una mayor elevación que la mayoría de usuarios en la red, entonces el funcionamiento de la red es a gravedad.

Entender la topografía del terreno ubicando en ella la elevación que tienen los elementos así como a los usuarios que componen la red dará una pista sobre los puntos que tengan problemas de presión.

Los puntos con mayores elevaciones presentarían las menores presiones mientras que los más bajos tendrán altas presiones generalmente si las tuberías de la red secundaria tienen tuberías de un diámetro idéntico, en las mismas condiciones es necesario estudiar los puntos donde se presenten cambios bruscos en pendientes puesto que suelen presentar problemas con las presiones. El problema que genera no tener un control en las presiones es el deterioro de la red por desgaste.

Un punto de importancia para la geotecnia en las redes de abastecimiento se centra desde que se diseña el trazo de la tubería de la red primaria y secundaria debido a que el tipo de suelo determina los costes de excavación. La disciplina tiene una vital importancia debido a su estudio de las discontinuidades de la roca, grietas, fallas, construcción de túneles, resistencia del material sobre el que descansa la tubería, los cimientos sobre los que deban estar las instalaciones para el control y operación de la red.

Por otro lado es común encontrar fugas en lugares asociados baja capacidad de carga del terreno que tenga construcciones de casa-habitación producto de la autoconstrucción, dado que los cimientos no son los adecuados ello producirá fallas en el terreno y hundimientos diferenciales, lo que afectará gravemente a la red de agua potable en su cercanía y ocasionará fugas. Sin embargo no solo las construcciones sin los cimientos adecuados presentan problemas para la red secundaria, también lo son vehículos pesados y un alcantarillado saturado.

El estudio social es de vital importancia, ejemplo de ello es la dotación suministrada por el nivel de ingresos promedio de la población o el uso que le den al agua (domiciliario, industrial o mixto). El número total de habitantes y su relación con la capacidad de suministro ha provocado una cantidad significativa de problemas sociales, entender los problemas sociales y darle una solución en compañía de la población evitaría problemas que han sucedido por no establecer dicha comunicación.

Para adentrarse en el tema legal y cultural es necesario entender el contexto social de la población en la que se encuentre la red a diseñar o a estudiar, esto implica factores como el valor de los salarios adecuados para los trabajadores de la población, el costo y el procedimiento adecuado de los trámites, por lo que el próximo tema introduce al contexto cultural que se vive en la Ciudad de México en el tema del recurso del agua potable.

Capítulo 2. La sectorización en la Ciudad de México.

La tecnología permite atender de forma cada vez más eficiente la captación de agua; permite ir con mayor eficiencia cada vez más profundo y cada vez más lejos. Una vez dicho lo anterior se puede entender que sin el conocimiento de hidráulica del funcionamiento de canales, tuberías a presión, hidromecánica, así como a la infraestructura necesaria para una red de agua potable le permitiría solamente a la población extraer agua de cuerpos de agua superficiales más cercanos, es por esta razón que las primeras grandes civilizaciones se asentaron alrededor de lagos y ríos, teniendo entre tantos ejemplos la figura 2.1 donde se puede apreciar los ríos Tigris y Éufrates sobre los cuales prosperó la civilización de Mesopotamia.

Figura 2.1 Mapa de la antigua Mesopotamia.



Nota: Mapa de la antigua Mesopotamia. Tomado de <https://adriw.com/c-economia-mundial/economia-de-mesopotamia/>, Economía de Mesopotamia: historia, qué es, legado y más. 2017.

Sin embargo no es necesario ir tan atrás en el tiempo y tan lejos, muchas ciudades en México se asentaron alrededor de ríos o lagos como lo es, en este trabajo tema de estudio, la Ciudad de México.

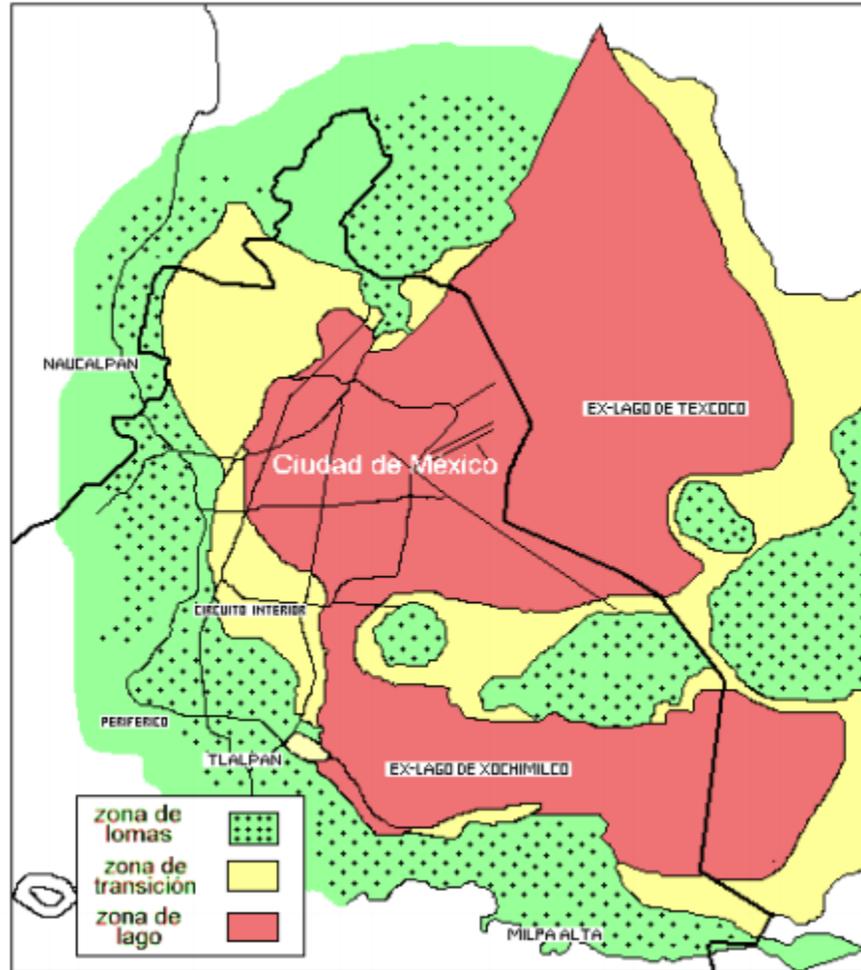
Figura 2.2 Antiguos lagos de Tenochtitlán superpuestos con la actual división política periférica de la Ciudad de México.



Nota: Adaptado de La isla de México en el siglo XVI, Luis Covarubias, 2019, La ciudad que secó sus lagos y hoy enfrenta la escasez de agua, Ciencia UNAM.

En la figuras 2.2 se aprecia un mapa de la periferia de la Ciudad de México superpuesto con la localización de los antiguos lagos de la zona, para visualizar el área que alguna vez ocuparon los lagos.

Figura 2.3 Condiciones geológicas de la ciudad de México.



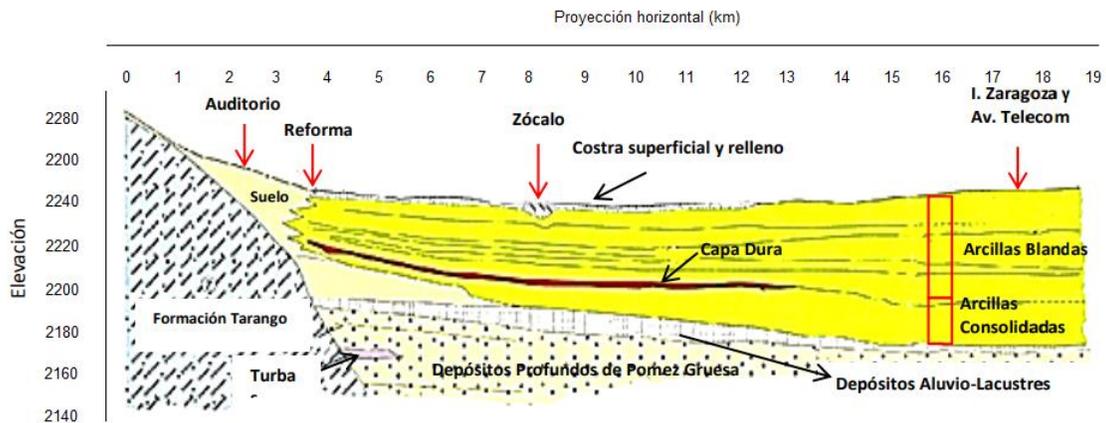
Nota: Zonificación geotécnica de la cuenca de México (tomada del SSN).

En geotecnia se clasifican los suelos de muchas formas, entre ellas está la clasificación que se tiene por zonificación, las características tienen grandes diferencias en cuanto a capacidad de carga y saturación de suelo que tiene el terreno zona de lago, zona de transición y de lomas, esto se puede apreciar en la figura 2.3.

Si se compara el mapa de la figura con el mapa se encuentra la siguiente relación: la zona sobre la cual hubieron lagos tienen la condición de Zona de lago, lo cual influye significativamente en la infraestructura de la zona, sin la cimentación y el estudio adecuado del terreno sumado a la sobreexplotación de sus acuíferos hace que las estructuras y el terreno en general presenten hundimientos diferenciales, lo que provoca rotura de tuberías y un mal estado general de la infraestructura de la red de abastecimiento de agua potable.

La cuenca de la Ciudad de México está rodeada de volcanes, cuyo terreno corresponde al área de zona de lomas que indica la figura 2.3. En un plano de corte vertical se aprecia la estratigrafía en la figura 2.4.

Figura 2.4 Sección de la secuencia estratigráfica de la Ciudad de México.



Nota: Sección de la secuencia estratigráfica deducida en común por ingenieros geotécnicos y geólogos para arcillas y el relleno aluvial debajo de la ciudad de México (Modificada de Santoyo, 2007).

Hidráulica en la Ciudad de México ubicado en el tiempo.

México antiguo.

Para comprender la situación que tienen en general las redes de agua potable de la Ciudad de México es necesario ubicarla en el tiempo.

El área de la Ciudad de México perteneció antiguamente al territorio de cinco lagos: Texcoco, Chalco, Zumpango, Xaltocán y Xochimilco, encontrándose todos a distintas elevaciones, siendo Texcoco el punto más bajo de la cuenca, sin embargo la mano de la civilización ha borrado el rastro que dejaron muchos lagos.

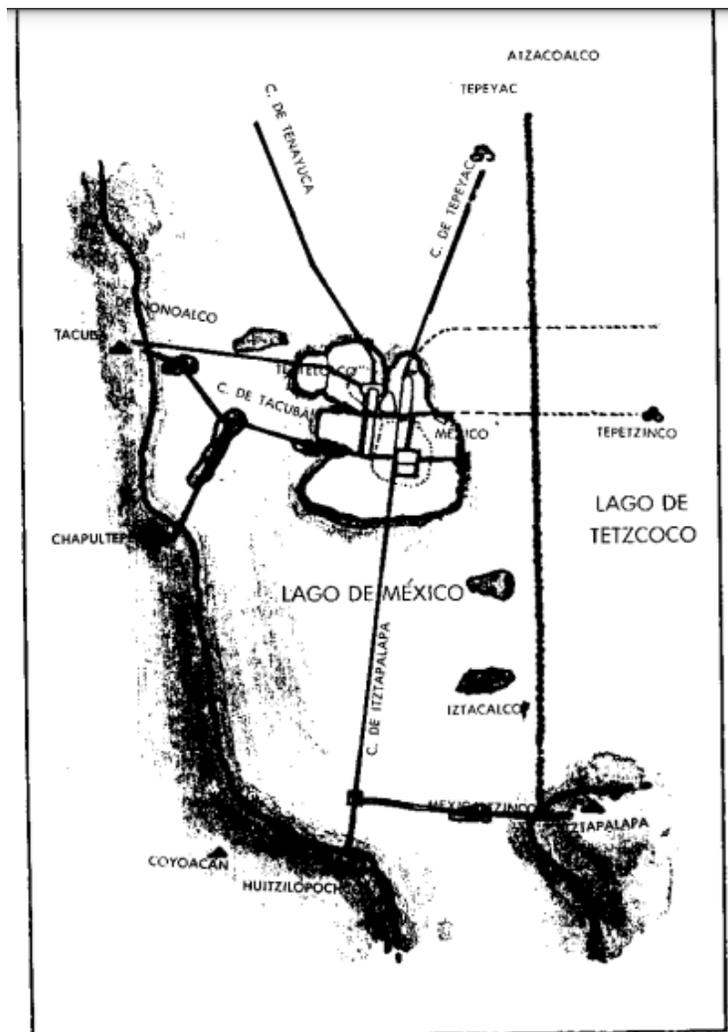
Tenochtitlán fue una ciudad fundada sobre el agua, la civilización azteca le fue ganando terreno al lago gracias a la técnica de las chinampas misma que les permitió tener hasta tres cosechas por año. La civilización que se asentó sobre el lago entendía al agua como un elemento de vida y destrucción, venerando a la naturaleza y a su dios responsable de la lluvia, Tláloc.

Los habitantes, los primeros pobladores de Tenochtitlán recurrieron a la laguna y a los manantiales más cercanos al lugar donde se asentaron para el abastecimiento de agua potable de la civilización.

Para el año 1418 su gobernador, el señor Chimalpopoca se asesoró con Nezahualcóyotl, señor de Texcoco el cual conocía de técnicas de construcción de los acueductos (apipolalli), así como de presas (tlaxquilacaxtli). El asesoramiento tuvo como objetivo el trazo y construcción del acueducto de Chapultepec como lo señala la figura 2.5 pero para el año 1486 el acueducto de Chapultepec fue insuficiente para la demanda de agua en Tenochtitlán.

Años más tarde el señor de Tenochtitlán, Moctezuma acudió a Nezahualcóyotl para la reconstrucción del acueducto puesto que fue erosionado por las mismas aguas que conducía, el acueducto duró buena parte de la época virreinal.

Figura 2.5 Croquis del lago de México donde se aprecia la ubicación del acueducto de Chapultepec.



Nota: Croquis del lago de México donde se aprecia la ubicación del acueducto de Chapultepec (SRH), M. en I. Patricia Peña Santana, Historia de la hidráulica en México: Abastecimiento de agua desde la época prehispánica hasta el Porfiriato (p. 12).

Al llegar a la ciudad el caño que transportaba el agua potable se hacía subterráneo y el recurso se repartía por diversas partes para ser usada por los pobladores hasta llegar al centro ceremonial contando una longitud de cinco kilómetros.

Durante el proceso de conquista de la Tenochtitlán los españoles destruyeron diques y acueductos para cortar la infraestructura hidráulica de Tenochtitlán, punto clave en la toma de la gran ciudad.

Época Virreinal.

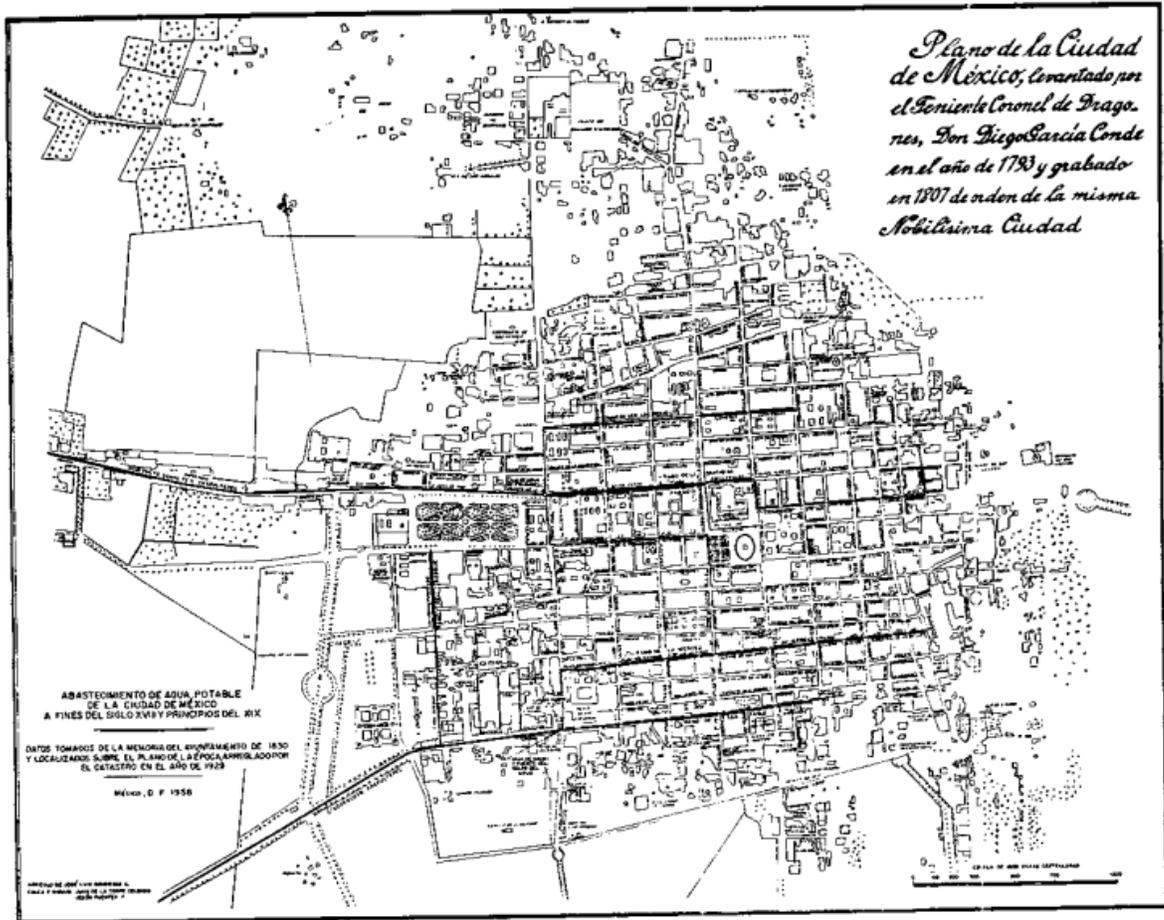
Algunos historiadores creen que los españoles se aferraron en hacer de Tenochtitlán la capital de la Nueva España por orgullo debido a que los aztecas fueron la civilización más poderosa, asentarse sobre su ciudad reafirmaría su autoridad sobre el resto de civilizaciones en el México antiguo.

Sin embargo los conquistadores no entendieron la veneración que la cultura azteca tenía hacia el agua y la naturaleza, por lo que trataron de asentar sus ideas europeas para zanjar el problema cuando el lago reclamaba su espacio: inundaciones.

Llegaron a la Nueva España varios científicos en segunda mitad siglo XVI, fue entonces que retomaron las obras hidráulicas que ellos mismos destruyeron durante el proceso de conquista, como por ejemplo las bardas de protección que construyó Nezahualcóyotl, sin embargo el diseño se vio rápidamente superado.

Para dar solución al abastecimiento de agua potable durante el virreinato se propuso la construcción del túnel Huehuetoca por Enrique Martínez con una longitud de siete kilómetros, trazo apreciable en la figura 2.6. Se desviaron las aguas del río Cuautitlán y del lago de Zumpango para conducir las hacia el río Moctezuma y el río Pánuco cuya desembocadura es el Golfo de México.

Figura 2.6 Trayectoria de los acueductos de Santa Fe y Chapultepec y sus ramales.



Nota: Trayectoria de los acueductos de Santa Fe y Chapultepec y sus ramales, M. en I. Patricia Peña Santana, Historia de la hidráulica en México: Abastecimiento de agua desde la época prehispánica hasta el Porfiriato (p. 12).

El ingeniero Holandés Adrian Boot propuso como solución a las inundaciones que frecuentaba la capital de la Nueva España retomar la comunión indígena que se tenía hacia el agua en la ciudad y detener las obras que consistieron en secar los lagos, sin embargo no fue escuchado.

Para solucionar el problema de abastecimiento de agua potable de construyeron nuevos acueductos en Arquería Santa Fe a Molino del Rey en Chapultepec.

Primeros años del México independiente.

Tras el caos, producto de la consumación de la independencia, los nuevos gobernantes tuvieron que lidiar con problemas de presupuesto, por lo que las obras hidráulicas de abastecimiento de agua potable fueron solo para particulares.

En 1827 el ayuntamiento construyó diversas fuentes: Victoria, Entrada del Paseo y Nuevo Bucareli, entre ellos, levantó el acueducto de Santa Fe y construyó la Presa Desierto de los Leones para aprovechar el agua de esa zona.

Suministró 536 lt/s por el acueducto de Santa Fe y 344 lt/s por el acueducto de Belén y el resto del agua que necesitó la ciudad fue obtenida a través de pozos y pequeños ríos.

Se tiene registro que para el año 1836 que el bando policial de autoridad evitaba el desperdicio de agua potable en distintos puntos de abastecimiento. En esta época existieron varias obras que intentarían resolver los problemas frecuentes de inundaciones, la solución final fue entubar los ríos principales sin ser esto suficiente para detener las inundaciones, pero a consecuencia se redujo considerablemente el área de lago que una vez ocupó esta superficie sobre la que hoy se asienta la Ciudad de México.

Para el año 1882 el agua era extraída por particulares, razón que provocó la expropiación del agua indemnizando a los mismos particulares.

En el año 1886 debido a la sequía de los cuerpos de agua que abastecieron a los acueductos Manantiales de Chapultepec y Santa Fe cuyo destino final era en Salto del Agua, fueron destruidos.

El sistema de abastecimiento de agua potable enfrentó diversos problemas cuya investigación quedó en manos de privado obteniendo así las siguientes conclusiones:

“-El agua era conducida por los acueductos y distribuida en las fuentes públicas en condiciones altamente desfavorables para la salud pública.

-Recogía en su curso los materiales orgánicos y gaseosos de la atmósfera contaminada de los alrededores de la capital, y los polvos de diferentes géneros suspendidos en el aire.

-El agua delgada de santa Fe y los leones era empleada, a lo largo del acueducto descubierto, para el lavado de ropa.

-El agua gorda de Chapultepec corría por un acueducto abierto y situado entre acequias inmediatas de donde se desprendían gases y emanaciones de la más elevada putrefacción.

-El sistema de distribución del agua carecía de un recipiente situado a una altura suficiente para producir en las cañerías una presión hidráulica que impidiera la mezcla peligrosa de esta agua con los líquidos fecales de las atarjeas.

-Las fuentes públicas construidas al estilo de la época virreinal, estaban abiertas a la intemperie y recogían los materiales orgánicos del aire viciado del interior de la ciudad y los que sobre ella arrojaban los vientos del lago de Texcoco.

-La cantidad de agua, insuficiente para 300 000 habitantes, debe considerarse como la primera causa permanente de la insalubridad en la capital; su mezcla con las deyecciones humanas de las atarjeas debió de ser uno de los factores responsables de la mortalidad elevada en la capital.

-Por lo dañina que resultaba el agua de los pozos poco profundos debiera proscribirse su uso para cualquier empleo, inclusive industrial.”

Memoria sobre las aguas potables en la capital de México, Dr. Antonio Peñafiel, 1884.

El ingeniero Manuel Marroquín y Rivera presenta un nuevo proyecto para un nuevo sistema de abastecimiento de agua potable para el entonces Distrito Federal en el año 1901 que se realizaría hasta el año 1905. El proyecto hidráulico consistió en un acueducto subterráneo de concreto con una longitud de 25 km desde San Luis Tlaxialtemalco hasta las Bombas en la colonia Condesa.

Época de la post revolución.

Para el año de 1925 se tiene la primera evidencia de hundimiento en el entonces Distrito Federal ocasionado por la extracción de agua mediante pozos, dicha evidencia se haya en que las alcantarillas se ubicaban a 50 cm por debajo de su punto original.

Se cuenta con 350 pozos de 12 y 45 metros de profundidad dedicados a la extracción de agua para el sistema de abastecimiento para el año 1930.

En el año 1933 tuvo lugar la creación de la Dirección General de Agua y Saneamiento, predecesora de SACMEX.

Otro evento significativo tuvo lugar en el año 1936 donde se perforaron 18 pozos profundos entre 100 y 200 metros de excavación, con lo cual marcaría el comienzo de la explotación intensiva del manto acuífero.

México en la época contemporánea.

Los hundimientos diferenciales ocasionados por la explotación de aguas subterráneas fueron cada vez más evidentes, así que para el año 1940 se prohibió perforar más pozos en zona lacustre causando que los siguientes pozos se concentraran en las zonas de transición.

Debido a una constante insuficiencia para dar abasto de agua potable a la ciudad para el año de 1942 se inician obras de captación de los manantiales del río Lerma en el Valle de Toluca para llevar agua hacia el Distrito Federal.

También fue necesario avanzar con la legislación con el fin de regular el uso y el aprovechamiento de aguas, por lo que para el año de 1946 la Secretaría de Agricultura y Fomento reglamenta su uso. Incluyendo en la legislación que el presidente podrá construir reservas hidráulicas nacionales para la generación de energía.

Para el año 1947 se abrieron 144 pozos de hasta 105 metros de profundidad, de los cuales 24 se abrieron para riego cuyo gasto era de 150 lt/s y 120 pozos para casas que contaban con un gasto de 34 lt/s.

La ley federal de ingeniería sanitaria la cual aborda el tema de la planeación, proyección y ejecución de las obras de abastecimiento y alcantarillado fue publicada en 1948.

Figura 2.7 Fotografía del mural de Diego Rivera en los Cárcamos de Dolores.



Con mural de Diego Rivera apreciable en la figura 2.7 en los Cárcamos en Xotepingo en el año de 1951 se inaugura el sistema de abastecimiento Lerma: primer abastecimiento de agua al Distrito Federal desde una cuenca circunvecina cuyo gasto se diseñó para $8 \text{ m}^3/\text{s}$, que actualmente varía dependiendo su horario, sin embargo actualmente el promedio es de $4.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

En el mismo año los ríos de Churubusco, Mixcoac, La Piedad, Consulado y parte del río de los Remedios fueron entubados para seguir enfrentando el problema de las inundaciones.

Para el año de 1953 se hizo el viaducto Miguel Alemán y de la misma manera se resolvió el problema de inundación del área cercana. La obra más importante de drenaje del año es el drenaje profundo que inicia su construcción.

Con el fin de abastecer de agua potable a la capital, además de enfrentar los múltiples problemas de drenaje y controlar los hundimientos causados por los mismos, en 1953 la Dirección General de Obras Hidráulicas (predecesora de SACMEX) estudia, proyecta y construye diversas obras con el objetivo de satisfacer las necesidades hidráulicas de la ciudad.

El agua residual tiene que ser tratada en una planta correspondiente, es por ello que para el año de 1956 se construye la primera planta de tratamiento en

Chapultepec cuya operación se mantiene hoy en día. Un par de años después comienza la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales en Xochimilco, Ciudad Deportiva, San Juan de Aragón y su construcción termina 6 años después.

Una vez en entendido el papel fundamental que tienen las plantas de tratamiento en el sistema de distribución de agua potable para el año de 1968 se inicia la construcción de la planta de tratamiento de Cerro de la Estrella, el objetivo de la planta es eliminar los contaminantes de las aguas provenientes de las entonces delegaciones de Coyoacán, Benito Juárez e Iztacalco, iniciando su operación para el año de 1971.

Con el objetivo de aumentar los volúmenes de agua y limitar el sobrebombeo a los pozos que drenaron desde entonces los acuíferos de la ciudad, para el año de 1970 se inicia la segunda etapa del proyecto Lerma. Se aprobó entonces la ley orgánica donde se establecen 16 delegaciones en el Distrito Federal, contando cada una con oficinas de destinadas a la operación del recurso del agua potable para gestionar las conexiones de tomas domiciliarias.

En el año de 1972 se crea la ley de aguas propiedad de la nación que regula la explotación del recurso, incluida el agua subterránea, así como su aprovechamiento.

Tras el crecimiento demográfico en la capital se requería cada vez más de un mayor volumen de agua para la dotación de sus habitantes, por ello para el año de 1976 inicia la construcción del sistema Cutzamala con el fin de llevar los afluentes de zona alta del río Cutzamala al Distrito Federal cuya inauguración se celebra en 1982, el trazo del sistema se puede observar en la figura 2.8.

Figura 2.8 Esquema del sistema Cutzamala.



Nota: Adaptado del esquema del sistema Cutzamala, Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles, Distribución de agua potable en la ciudad de México, Conferencia del Instituto de ingeniería, 2018, UNAM.

En el año 1978 se crea la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (predecesora de SACMEX) uniendo para ello a la Dirección General de Agua y Saneamiento y a la Dirección General de Obras y servicios.

Un poderoso Terremoto sacude la ciudad en el año de 1985, cobrándose en el acto una gran cantidad de vidas humanas, destruyendo edificios e infraestructura, generando un daño significativo a la red de agua potable, cortando el suministro por 40 días, que tras 24 horas de trabajo diario se logra reestablecer.

Se establece la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) como órgano desconcentrado además de establecerse consejos de cuenca como representantes de usuarios de sus respectivas cuencas hidrológicas

Para el año de 1994 con el objetivo de lograr una mayor eficiencia en gestión del agua potable se divide la ciudad en cuatro cuadrantes logrando en el proceso una actualización del registro de usuarios y la instalación de medidores como la implementación de un proceso de recaudación de pagos más eficaz.

El organismo del Sistema de Aguas de la Ciudad de México se crea en el año del 2003 con el objetivo modernizar la distribución y modernización del recurso del agua potable en la capital.

Para lograr tener un mejor control en los gastos así como una mejor eficiencia del recurso, para el año del 2004 el sistema de aguas de la ciudad de México inicia trabajos de sectorización de la red secundaria de agua potable.

Siguiendo con trabajos para lograr una mejor eficiencia en la gestión del agua potable resalta que para el año del 2006 se reemplaza en la capital 1486 km de tubería.

Inicia la construcción de 15 plantas potabilizadoras que inyectan agua de mejor calidad a la red primaria y secundaria en el año del 2013 ubicadas en las entonces delegaciones Gustavo A Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Tlahuac y Venustiano Carranza.

Un segundo temblor en el mes de septiembre ocasiona severos daños a la infraestructura hidráulica de la Ciudad de México en el año 2017, tardando en reestablecer el servicio hasta 55 días en la capital.

Figura 2.9 Fotografía de grietas provocadas por el S17.



Según el jefe de sectorización poniente de la oficina de automatización de agua potable en la Ciudad de México de SACMEX, para finales del 2021 se cuenta con un avance de sectorización de la red secundaria de las alcaldías a su cargo con un 50% en Iztapalapa, Álvaro Obregón, Benito Juárez y Gustavo A. Madero

próximos al 100%, Cuauhtémoc se prevé terminar de sectorizar en el año 2022, Tlalpan tiene un avance del 80%, mientras que Iztacalco cuenta con un 70% Coyoacán y Azcapotzalco rondan el 10%, Xochimilco, Tláhuac y Magdalena Contreras no presentan avances en sectorización. Señala también que en Tláhuac y en algunas partes de Tlalpan serán los únicos sectores donde se planea implementar el funcionamiento por bombeo para darle presión a algunos sectores.

Problemas actuales en el abastecimiento de agua potable

En lo general, el abastecimiento de agua potable presenta varias problemáticas a las cuales se les ha intentado dar solución, sólo que algunas veces dichas soluciones ocasionan a su vez otro tipo de inconsistencias. A continuación se describen las principales dificultades, así como las alternativas que se han implementado para la solución de sus problemas.

Acueductos.

Un acueducto es la infraestructura que consiste en llevar volúmenes significativos de agua desde un cuerpo de agua lejano e importante hasta una determinada población.

Los puntos más importantes que se tienen en contra de la construcción de acueductos es que se suele sobreexplotar los cuerpos de agua generando impactos ambientales y limitando la cantidad de agua con la que se suministra a las poblaciones cercanas, además de tener costos muy elevados en la construcción, operación y mantenimiento de estas obras hidráulicas.

La construcción de acueductos tiene un gran peso en la sociedad por carácter político y cultural de la población en general, prefiriendo los acueductos por encima de las plantas potabilizadoras de agua debido a que no se tiene la disposición de la potabilización. El problema cultural de rechazar “agua tratada” ha frenado la construcción de plantas potabilizadoras, también destaca el problema desde un enfoque político debido a que tiene más impacto político la construcción de grandes obras como lo son los acueductos, pero ello sin tener en cuenta su relación costo-beneficio comparada con la misma relación que tendría de una planta potabilizadora.

Tratamiento y potabilización de agua.

Consiste en la eliminación de residuos orgánicos, organismos patológicos, compuestos tóxicos, así como una regulación en los minerales, salinidad, PH del agua que ha sido usada en la población o se ha extraído de una fuente de

abastecimiento, logrando un impacto tanto social como ambiental favorable ya que elimina los efectos de la ausencia de agua en un ecosistema ya que el agua tratada es inyectada a los cuerpos de agua o al sistema de distribución de agua potable.

Las plantas de potabilización y tratamiento de agua también suelen tener costos elevados en su construcción y operación, pero es menor si se compara con el costo que representa la construcción y operación de un acueducto en lo general.

Aumentar la cantidad de agua en el sistema por medio de la construcción de acueductos o plantas de tratamiento a una red que presenta baja eficiencia sin trabajos simultáneos enfocados en mejorar la línea primaria o secundaria ocasionará que el líquido que ingresa a la red se pierda, en otras palabras, ingresar más agua a la red provocará que se pierda más agua si la eficiencia de la red de distribución es baja.

Corrosión interna de las tuberías.

Se ha observado que existe corrosión al interior de tuberías muy viejas, dicha corrosión alterará el factor de rugosidad y con ello el resultado de la ecuación para obtener las pérdidas por fricción pudiendo modificar desde pérdidas de energía en la red hasta el gasto que conduce.

Existe una relación entre el tipo de material y el coeficiente de las fugas, debido al comportamiento elástico que tienen los materiales cuando son sometidos a determinada presión. Se observa también que el acero posee mayor resistencia que las tuberías de PVC; lo que sucede en las tuberías de PVC es que incrementará el área de las fugas debido a la presión y a una alta elasticidad del material, ello implica que un mayor gasto puede perderse de la red. Mientras que en una tubería de acero, en caso de existir una fuga y debido a su resistencia, el área por la cual se pierde el volumen no aumentará debido a que tiene más resistencia a la deformación que la tubería de PVC.

Se cree culturalmente que es excesivo el costo en el mantenimiento de las tuberías, pero en realidad es más elevado tenerlas con altas rugosidades ya que se tiene que emplear más energía para suministrar el mismo caudal y cabe la posibilidad de que la tubería no pueda aportar el gasto con el que fue diseñada.

Se ha observado que en tuberías con alta porosidad, como lo es en el caso de las tuberías de concreto, que la rugosidad tiende a tapar los poros con el paso del tiempo, haciendo que el agua fluya de una mejor manera sobre un material menos áspero. Cosa contraria ocurre en las tuberías de metal y PVC donde la rugosidad aumenta el factor de fricción.

Organismos de operación de la red de distribución.

Los problemas que generan los organismos operadores consisten en las diversas decisiones a fin de lidiar con el desabasto que sufren las poblaciones, estas medidas han sido principalmente bajar la dotación a una población o sólo abastecerla algunas horas al día lo que es llamado como "tandeo". También tienden a controlar las presiones con maniobras tanteadas y empíricas en las válvulas, lo cual disminuye el volumen de agua que se pierde de la red de distribución al controlar las fugas como se puede observar en la ecuación de fugas, sólo que muchas medidas suelen tener efectos contraproducentes.

El manejo de la presión por los organismos operadores de la red de agua potable consiste en abrir y cerrar válvulas de seccionamiento sin el conocimiento de cuál es el funcionamiento hidráulico de las válvulas en la red, todo esto con el fin de disminuir la presión la cual es directamente proporcional al gasto de fugas. Las válvulas de seccionamiento sólo están diseñadas para operar en dos formas: abiertas y cerradas, por lo que estar parcialmente abiertas generará un daño al equipo así como una obsolescencia en su funcionamiento.

Otras medidas han sido la sustitución de tuberías y elementos en la red de agua potable que se encuentran deterioradas así como la instalación de más micro-medidores en las tomas domiciliarias.

Las medidas que suelen manejar los organismos operadores sin un conocimiento de hidráulica generan problemas que ocasionan grandes deterioros a la red como el "tandeo". El "tandeo" genera una deterioración en los elementos de la red en un factor de 10, lo que significa que una tubería que está diseñada con un periodo de vida de 25 años se reduzca a 2.5 años. El manejo de la red por "tandeos" genera efectos transitorios, que sin dispositivos de control de éstos, generan dicho desgaste.

Normalmente la población sin el suministro constante de agua tiende a dejar la llave abierta al interior de sus domicilios, lo que genera que el micromedidor registre la entrada de aire como entrada de agua y esto mismo se refleja como un costo adicional en su tarifa bimestral.

Otro problema del "tandeo" suelen ser los suministros alternos de agua potable a los que se recurren por falta de agua; la contratación de pipas es el principal problema, que en comparación del costo por volumen de agua desde la red primaria, suelen ser precios demasiado caros.

El agua que se encuentra en una red de distribución con bajas presiones es debido a estas mismas maniobras de los organismos operadores de la red genera

diversos problemas, por ejemplo que no alcance a llegar el agua con la energía necesaria a zonas con altas cotas como lo son las ubicaciones en cerros ni a los almacenamientos en los altos pisos de algunas construcciones, lo que genera que los usuarios deban construir cisternas u obras de almacenamiento, incluyendo la compra y operación de bombas, elevando así el costo por el suministro de agua potable para los usuarios.

Fugas y carácter migratorio de las fugas.

Fugas.

Existen pérdidas de volúmenes de agua potable en la red lo que representan enormes pérdidas económicas; se contempla en la subdirección de Sectorización de agua potable de la Ciudad de México del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) que el 95% de la pérdida de volumen de agua se origina en la red primaria.

Es difícil tener un coeficiente exacto de pérdidas en fugas si no se tiene micromedición y macromedición, ya que se requieren para estimar el porcentaje de fugas; de no tener un control de los volúmenes de agua y medición sólo se puede estimar aquella cantidad.

Ayudado de la micromedición se podrá hacer un balance: el gasto suministrado a la red menos el gasto medido en las tomas domiciliarias es igual al gasto en fugas representado en la siguiente fórmula:

$$Q_f = Q_e - Q_m$$

Donde:

Q_e = Gasto de agua que entra al sector. [m^3/s]

Q_m = Gasto agua que es consumido y medido en las tomas domiciliarias. [m^3/s]

Q_f = Gasto de fugas de agua. [m^3/s]

Las fugas son volúmenes de agua potable que se pierden de la red de distribución; algunas causas de fugas pueden ser las tomas clandestinas que son llamadas "huachicoleo de agua", que han sido tomas no controladas ni registradas para la extracción de agua. Otra situación que se considera como fuga son las tomas sin micromedición o fugas al interior del domicilio particular, así como el volumen de agua que se escapa cuando existe daño en elementos de la red.

Los daños en la red suelen ser ocasionados por presiones y subpresiones así como por el efecto de fatiga que es la carga y descarga de un elemento de la red de distribución, los daños en la red también se deben a hundimientos diferenciales, vida útil, baja calidad en el proceso de instalación y construcción de la red de distribución y la poca calidad de los materiales principalmente.

Se resalta que las pérdidas físicas (fugas) son la pérdida del volumen de agua, mientras que las pérdidas por fricción es la pérdida de energía que tiene el agua al fluir a través de la red. Existe una relación entre el caudal de las fugas y la presión que existe en la red de distribución, las cuales son directamente proporcionales siendo expresada la relación en la siguiente ecuación:

$$Q_f = (HK)^x$$

Donde

Q_f = Gasto de fugas. [m^3/s]

k = Coeficiente que depende de la geometría y área de la fuga. [adimensional]

x = Coeficiente. [adimensional]

Carácter migratorio de las fugas.

Para entender por qué arreglar directamente las fugas no es la solución habrá que entender el concepto de “Carácter migratorio de las fugas”.

Al tener una grieta que signifique pérdida de volúmenes de agua potable en un punto de la red secundaria “1” y de arreglarse la fuga significará idealmente que la presión y gasto no se perderán en este punto “1”, pero el volumen que no se pierde en la fuga en el punto “1”, la cual ha sido reparada, se perderá en la fuga de un punto cualquiera “2”, en la cual la fuga no ha sido reparada ni detectada.

En una compleja red donde es bastante difícil reparar y detectar todas las fugas, reparar una no aumentará la eficiencia ni disminuirá el volumen de agua que se pierde, en otras palabras, el agua que no se perdió por reparar una fuga en el punto “1” se pierde en la fuga del punto “2”; a este fenómeno se le llama “carácter migratorio de las fugas”.

La micromedición es de vital importancia ya que sin ésta es imposible conocer el gasto de fugas y con ello el volumen de agua que se pierde.

Sectorización como alternativa de solución.

Con el sector implementado, el problema del carácter migratorio de las fugas se mitiga ya que la reparación de una fuga localizada al interior de un área con volúmenes de agua controlados (sector) no se perderán en este punto y en caso de no existir otra fuga dentro del área delimitada ocasionará que el volumen de agua se mantenga dentro de la red secundaria en el sector.

La sectorización contempla un abasto de agua las 24 horas los 7 días de la semana; la continuidad en el servicio evitará fenómenos transitorios que generan un desgaste en factor de 10 en las tuberías. Dicho de otra manera, la sectorización contempla eliminar el “tandeo” y todos los problemas que implica.

La red primaria encuentra su presión muy “castigada” debido al problema de las fugas ya que tienen una relación directamente proporcional; entonces la presión sería menor en la red secundaria; la sectorización pretende que la red primaria mantenga presiones altas, para controlar la presión de la red primaria a la red secundaria en la entrada del sector se encontrará una válvula de presión que se mantenga por lo general entre 5 mca y 15 mca.

La eliminación de las fugas al interior del sector mitigará el fenómeno de carácter migratorio, los cambios implicarán una mejora a los usuarios al interior del sector ya que no necesitarán construir cisternas ni tener bombas para hacer llegar el agua potable a altas cotas y pisos a los que normalmente el agua no tendría la energía de llegar.

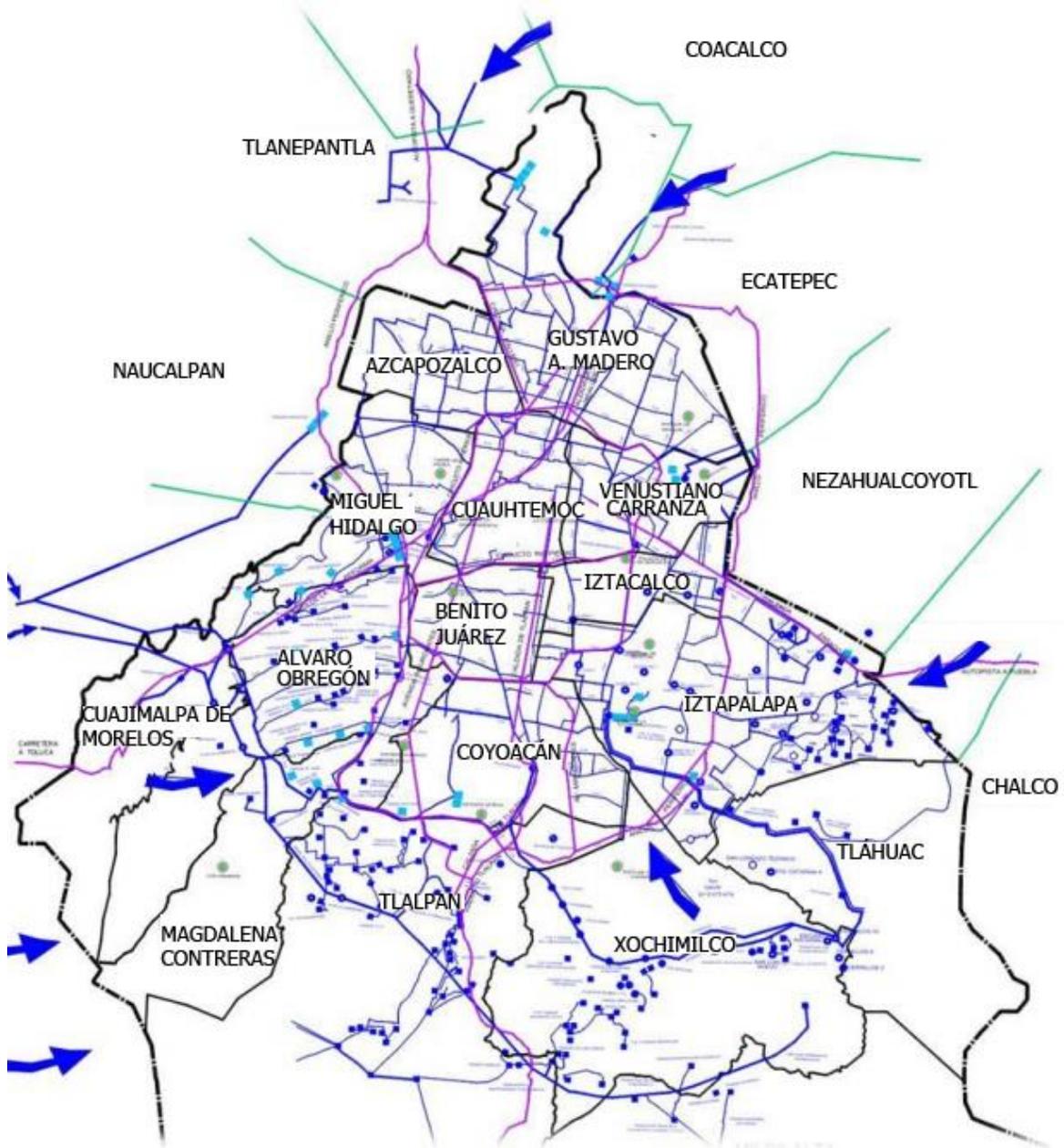
La sectorización consiste en la construcción de sectores que son un área medida de la red secundaria limitada por una o más entradas, que de preferencia sea sólo una y que no tenga salida de volúmenes de agua hacia otra zona o sector. Suele ser un área de entre 1 y 2 km² y alrededor de quince mil habitantes por sector.

El objetivo de la sectorización es hacer eficiente la forma en la que se distribuye el agua potable a través de la red de distribución, además de tener controlado el volumen de agua que ingresa a un área cerrada de la red secundaria, por lo que la cantidad de agua que entra ahora tendrá un mejor control.

Se tiene que tener en claro que la sectorización es sólo el inicio de la solución ante la mayoría de problemáticas que implica el abastecimiento de agua potable, ya que sin ésta será obsoleto intentar resolver los problemas que se agravan al no tener un control ni registro. Una vez implementada la sectorización se deberán incorporar medidas que puedan mejorar la red de agua potable con el fin de aumentar la eficiencia, disminuir el costo a los usuarios, trabajar en la eliminación de fugas y mejoras en la red.

Estado actual de la red primaria de agua potable de la Ciudad de México.

Figura 2.10 Diagrama de la red primaria de la Ciudad de México.



Nota: Adaptado del diagrama de la red primaria de la Ciudad de México, Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles, Distribución de agua potable en la ciudad de México, Conferencia del Instituto de ingeniería, 2018, UNAM.

Se puede apreciar en la figura 2.10 un esquema general del trazado que tiene la red primaria de agua potable en la Ciudad de México. La ciudad cuenta con una

compleja red de agua potable que se fue construyendo a fin de satisfacer la demanda creada a partir del crecimiento poblacional y la centralización de la capital. La infraestructura de la red de agua potable en la Ciudad de México se señala en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Infraestructura de la red de agua potable de la Ciudad de México

Infraestructura	Cantidad
Red secundaria de agua (m)	11972
Red primaria de agua (m)	2006
Pozos en inventario	976
Pozos operando	880
Plantas de bombeo	268
Plantas potabilizadoras	51
Plantas cloradoras	15
Tanques de almacenamiento	357
Subestaciones eléctricas	23
Líneas eléctricas de alta tensión (Km)	2589
Manantiales	69
Dispositivos de cloración en pb y pozos	435
Cámaras de válvulas	1
Instalaciones en agua potable	1714

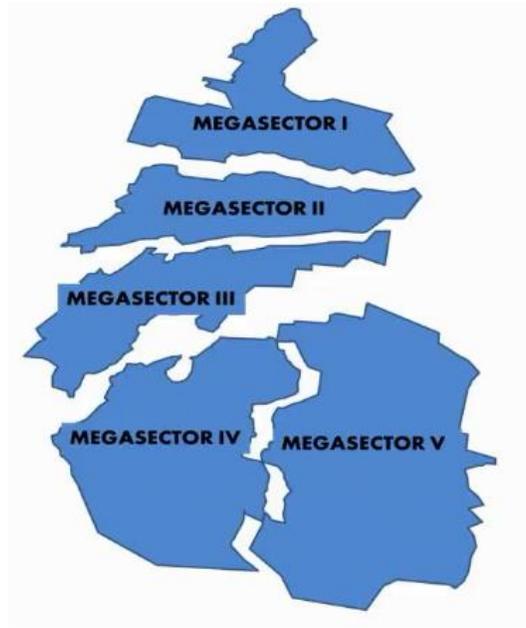
Los ingresos a la red secundaria de agua potable así como otros tipos de ingresos se señalan en la tabla 2.2 y 2.3.

Tabla 2.2 Ingresos de agua a la red primaria de la Ciudad de México.

Fuente	Punto de entrada	Gasto (m ³ /s)
Sistema Barrientos	Azcapotzalco	2.3
Sistema Chiconautla	G.A.M.	0.8
Sistema Cutzamala	Cuajimalpa	9.3
Sistema Lerma	Cuajimalpa	4.2
Planta la Caldera	Iztapalapa	0.6
Manantiales y Río Magdalena	Magdalena C.	1
Pozos		15.1
Q aportado por fuentes propias		21.1
Q aportado por CNA		13.5

Nota: Rescatado del esquema de los ingresos a la red primaria, Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles, Distribución de agua potable en la ciudad de México, Conferencia del Instituto de ingeniería, 2018, UNAM.

Figura 2.11 Diagrama de los macrosectores en la Ciudad de México que opera SACMEX.



Nota: Adaptado del esquema de macrosectores de SACMEX, Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles, Distribución de agua potable en la ciudad de México, Conferencia del Instituto de ingeniería, 2018, UNAM.

Para lograr un mejor manejo y control del agua en la Ciudad de México se propusieron 5 macrosectores como se indica en la figura 2.11; el trazo se define por los límites de las alcaldías que conforman la Ciudad de México, se decidió en primeras instancias la división de esta manera debido a que cada alcaldía tiene un gobierno que no siempre tiene tantos puntos de acuerdo con el gobierno de la Ciudad de México, por esto mismo es más fácil manejar el agua por división política que por aspectos que resulten más óptimos.

Los datos que se leen de los macrosectores en cuanto a extracción de agua mediante pozos, acueductos y manantiales son los siguientes.

Tabla 2.3 Ingresos a los macrosectores de la Ciudad de México.

Macrosector	Delegación	Lerma y	Pozo	(l/s)	Manantiales (l/s)		Suma
		Cutzamala	Q	#	Q	#	
1	Azcapozalco	932	992	30			1954
1	G.A.M.		3476	139			3615
2	M. Hidalgo	5671	864	30			6565
2	Cuauhtemoc	5671	142	6			5819
2	V. Carranza	5671	138	7			5816
3	Cuajimalpa	4298	34	2	308	29	4671
3	A. Obragón	4298	352	37	235	3	4925
3	B. Juárez	4298	562	26			4886
3	Iztacalco	4298	290	9			4597
4	M. Contreras	2121	68	6	165	19	2379
4	Coyoacán	2121	2037	64			4222
4	Tlalpan	2121	519	89	419	6	3154
5	Iztapalapa		2432	100			2532
5	Milpa Alta		835	50			885
5	Tláhuac		3436	45			3481
5	Xochimilco		1963	104			2067

Nota: Datos rescatados de la conferencia del Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles, Distribución de agua potable en la ciudad de México, Conferencia del Instituto de ingeniería, 2018, UNAM.

Tabla 2.4 Balance de los macrosectores en la Ciudad de México.

Macrosector	Entradas	Oferta local	Salidas	Balance
1	55	5400	531	5104
2	1061	6815	2747	5129
3	2747	6020	243	8524
4	19990	5327	537	6780
5	537	6956	0	7493

Nota: Datos rescatados de la conferencia del Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles, Distribución de agua potable en la ciudad de México, Conferencia del Instituto de ingeniería, 2018, UNAM.

Tabla 2.5 Dotación y pérdidas por macrosector en la Ciudad de México.

Macrosector	Dotación (lt/Hab/día)	Pérdidas físicas %
I	290	45%
II	370	35
III	403	38
IV	380	57
V	220	45
Fugas	Gasto de 14.2 m ³ /s	44%

Nota: Adaptado del diagrama de dotación y pérdidas por macrosector en la Ciudad de México, estudios de diagnóstico y planeación integral de los sistemas de AP en el D.F. DIPS SACMEX 2009.

El balance entre oferta, entrada de volúmenes de agua así como de volúmenes de salida del recurso se aprecia en la tabla 2.4; se agrega además información de vital importancia como lo es la dotación y pérdidas de volúmenes de agua al interior de los macrosectores señalados en la tabla 2.5.

A partir de la implementación de los macrosectores se comenzó con la sectorización de la red secundaria para lograr un mejor control en presión y continuidad del recurso del agua en la red secundaria. Sin embargo aún queda bastante trabajo por realizar en cuanto a construcción de sectores en la Ciudad de México.

El gobierno de la Ciudad de México, señala que se cuenta con un 35% de avance en el tema de sectorización para el año 2020 y se prevé que para 2024 se tenga el 100%. El director de SACMEX indicó que entre los beneficios de la sectorización existe un aumento significativo en la cantidad del líquido que llega a la zona de influencia de los tanques de reserva de agua de Cerro de la Estrella en la alcaldía Iztapalapa. El porcentaje se incrementó de 48.3% en 2019 a 115.3% de su capacidad original en 2021.

Capítulo 3: Aspectos técnicos de hidráulica en la red secundaria.

Figura 3.1 “Avería en acueducto en Tultepec”.



Nota: Avería en acueducto en Tultepec inunda viviendas y deja 600 mil usuarios sin agua, Emilio Fernandez, 8-3-2020, Periódico El Universal.

Figura 3.2 Miles sin agua en San Luis Potosí por enésima falla en acueducto.



Nota: Miles sin agua en San Luis Potosí por enésima falla en acueducto, Miguel Mora, 21-7-2021, Periódico El Sol de México.

Figura 3.3 CONAGUA repara una falla del acueducto del sistema Cutzamala.



Nota: La Conagua repara una falla del acueducto del sistema Cutzamala, 18-4-2016. Rescatado de twitter.com/conagua_mx?lang=es.

El fallo de un elemento de la red hidráulica puede deberse generalmente a la falta de mantenimiento, a una mala operación e incluso a fenómenos no contemplados así como al error de cálculo durante la fase de diseño del elemento, ejemplos de esta situación se aprecia en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3.

Es necesario atender todas las razones por las cuales una estructura puede fallar, sin embargo este capítulo se centra de forma general en los cálculos necesarios para entender y diseñar los principales elementos de una red de agua potable.

El cálculo obtenido por las fórmulas de hidráulica en agua potable tratará de acercarse todo lo posible al comportamiento que tienen los principales factores que influyen en la cantidad, en la presión y la velocidad; Sin embargo existieron situaciones que no contemplan las fórmulas principales de la hidráulica, es por esto que la experiencia en la ingeniería hidráulica ha propuesto diversos parámetros para evitar imprevistos que afecten al costo o al funcionamiento de la red.

Existe un manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento (MAPAS) en el cual se establecen diversos parámetros para la construcción de obras hidráulicas pertenecientes a los temas que refiere en su título, agua potable, drenaje y

saneamiento haciendo uso de la experiencia en la rama hidráulica de la ingeniería civil.

En el manual de agua potable alcantarillado y saneamiento se describen distintos criterios y parámetros para definir distintos aspectos del sistema como lo es la vida útil, horizonte de proyecto, población a futuro, así como las fórmulas y fuentes que se deben manejar para obtener los valores de velocidad, presión, gasto y población por mencionar los más importantes.

Las dimensiones de los elementos de la red de abastecimiento están sujetas al número de usuarios que pertenecen a esta; a cada usuario se le asigna una dotación diaria de agua potable. Desde luego un usuario se entiende como una toma de agua conectada a la red secundaria, la cual incluye escuelas, hospitales, edificios, casa-habitación, etc.

Al determinar la cantidad de usuarios y el tipo de usuarios en la red se puede estimar una dotación diaria para los usuarios y la suma de esta cantidad es lo que deberá suministrar el sistema de abastecimiento. Tener el dato del tamaño de la población es de vital importancia tanto para su estudio como para su diseño, pues de ser deficiente la obra hidráulica quedará rebasada en capacidad muy rápidamente, y de ser muy grande tendrá un innecesario y elevado costo. El manual señala a las instituciones de CONAPO y a INEGI como fuentes oficiales y confiables cuando se requieran datos poblacionales.

CONAPO. Consejo Nacional de Población, encargado de la planeación demográfica de México a fin de incluir a la población en los programas de desarrollo económico y social que se formulen dentro del sector gubernamental y vincular sus objetivos a las necesidades que plantean los fenómenos demográficos. Entre sus funciones destacan: analizar, evaluar y sistematizar información sobre fenómenos demográficos; asesorar y asistir en materia de población a toda clase de organismos públicos o privados, nacionales o extranjeros, locales y federales.

INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, es el encargado de generar la información sobre fenómenos demográficos, sociales, económicos y del medio ambiente y su relación con el territorio nacional (México). La información estadística y geográfica que produce esta disposición de Estado y la sociedad.

Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado, CONAGUA (libro 4, p. 1).

Fundamentos de hidráulica.

La hidráulica es una rama de la Física que estudia el comportamiento de las fuerzas y del movimiento que poseen los fluidos. Entendiendo por fluido a una sustancia que tiene una deformación constante si está sometida a una tensión tangencial, tal es el caso de los líquidos y gases.

La hidráulica requiere entender numerosos conceptos, sin embargo efectos prácticos de este trabajo se nombran los más indispensables; empezando por la densidad.

La densidad es una propiedad de la materia y se define como su masa entre volumen. Las unidades más comunes de la densidad son g/ml y kg/m³. En el caso concreto del agua, su densidad es 1g/ml o bien 1000 kg/m³. Se debe tener en cuenta que los líquidos varían su volumen con la temperatura; en México no existe una variación tan importante de temperatura para considerar que habrá cambios significativos en la densidad, sin embargo se debe tener en cuenta una temperatura controlada y conocida en el fluido.

Presión hidrostática.

La presión hidrostática es una presión, magnitud escalar, que tiene su origen en el peso de un fluido en reposo que actúa sobre un punto cualquiera; se puede considerar en reposo o con velocidades muy cercanas a cero cuando el fluido se encuentra únicamente bajo la presión atmosférica, siendo considerado el valor de cero como referencia para su estudio. En un fluido el valor de la presión que actúa sobre una superficie dada es:

$$P = \rho g h$$

Donde:

ρ = Densidad [Kg/m³]

P = Presión hidrostática. [Kg/m/s²]

g = Fuerza de gravedad. [9.81 m/s²]

h = profundidad del punto de interés. [m]

Ecuación de continuidad.

La ecuación de continuidad señala que la cantidad de fluido que entra en una conducción es la misma que la cantidad de flujo medido en cualquier punto de la conducción, dando a entender que el volumen que circula a través del conducto

siempre será el mismo pero con distintas características de volumen y velocidad en el fluido, las cuales son directamente proporcionales al volumen.

La fórmula de continuidad se puede expresar de la siguiente manera:

$$Q = A V$$

Donde:

Q = Gasto, volumen de agua por segundo que pasa en un punto. [m³/s]

A = Área de la conducción sobre la cual circula el gasto. [m²]

V = Velocidad del fluido. [m/s]

Cabe señalar que la ecuación de continuidad requiere de ciertas condiciones las cuales son: que exista continuidad en el flujo de la conducción, que no haya pérdidas físicas y que las pérdidas que se generan en los cambios de sección no sean abruptos debido a que podría alterar el comportamiento aguas arriba de la conducción; por lo que la ecuación de continuidad establece que:

$$Q_1 = Q_2$$

Por lo que:

$$V_1 A_1 = V_2 A_2$$

Ecuación de energía y principio de Bernoulli.

La ecuación de Bernoulli describe la forma en que un fluido se comporta a lo largo de una línea de corriente con las siguientes consideraciones: que es un fluido ideal sin viscosidad ni fricción, también considera que la energía permanece constante a lo largo de su recorrido, que consta de tres componentes los cuales se miden en unidades de longitud los cuales son los siguientes:

Energía cinética: es la energía que adquiere el fluido por la velocidad que posea (presión dinámica). La ecuación de la energía cinética (Ec) es:

$$Ec = \frac{1}{2} mV^2$$

Sabiendo la ecuación del peso:

$$W = mg$$

Se puede despejar la masa:

$$m = \frac{w}{g}$$

Donde

m = Masa. [kg]

W = Peso. [kg/ m/s²]

Se puede sustituir la masa de la ecuación del peso en la ecuación de la energía cinética de la siguiente manera:

$$Ec = \frac{1}{2} \frac{wV^2}{g}$$

Si se considera un peso unitario (W) entonces la ecuación tiene la siguiente forma:

$$Ec = \frac{V^2}{2g}$$

Lo que se conoce también como carga de velocidad en metros.

Energía potencial: es la energía que tiene el fluido causada únicamente por la posición que posee. Por lo que la ecuación de la energía (Ep) potencial tiene la siguiente forma:

$$Ep = m g h$$

Y también:

$$Ep = W h$$

Al considerarse W como un peso unitario entonces se tiene que el valor de la carga de posición es igual a su altura (Z) en metros:

$$Ep = Z$$

De la ecuación de la presión:

$$P = \rho g h$$

Se puede despejar la carga (h) quedando de la siguiente manera:

$$h = \frac{P}{\rho g}$$

Lo que también se conoce como carga o energía de presión [m].

El ingenio de los hidráulicos ha adaptado a que las tres energías anteriores sean compatibles entre sí teniendo la misma unidad (metros). Por lo que el principio de Bernoulli que describe la energía que tiene el agua se entiende de la siguiente manera:

$$H = z + \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\gamma}$$

Donde:

P = Presión en la línea de corriente. [Kgm/s²]

γ = Peso específico. [Kg/m³]

Z = Altura de la línea de conducción. [m]

H = Energía total del sistema. [m]

Entonces haciendo un balance de energía entre dos puntos de una conducción de fluido se obtiene que:

$$H_1 + B = H_2 + H_f$$

Donde:

B = Energía suministrada al sistema por bombeo. [m]

H_f = Pérdidas totales de energía. [m]

La ecuación de pérdidas totales de energía tiene la siguiente forma:

$$H_f = h_f + h_k$$

Donde:

h_f = Pérdidas por fricción. [m]

h_k = Pérdidas de energía ocasionada por accesorios. [m]

Pérdidas por fricción.

Se puede entender al concepto de pérdidas por fricción como la energía que se pierde debido a la fricción, la cual es una fuerza que se opone al movimiento del fluido ocasionada por el contacto entre el fluido con la conducción; Darcy-Weisbach calcula las pérdidas por fricción de todos los líquidos en cualquier régimen la cual tiene la siguiente forma.

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

L = Longitud del tramo de tubería. [m]

D = Diámetro de la tubería. [m]

f = Coeficiente de fricción. [adimensional]

Variable f para el cálculo de pérdidas por fricción.

El valor de f se puede obtener por distintos métodos como con las iteraciones de Colebrook-White que dependen de la ecuación con la siguiente forma:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\left(\frac{\varepsilon}{3.71D} + \left(\frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \right) \right]$$

Donde

ε = Rugosidad relativa, ver tabla 3.2. [mm]

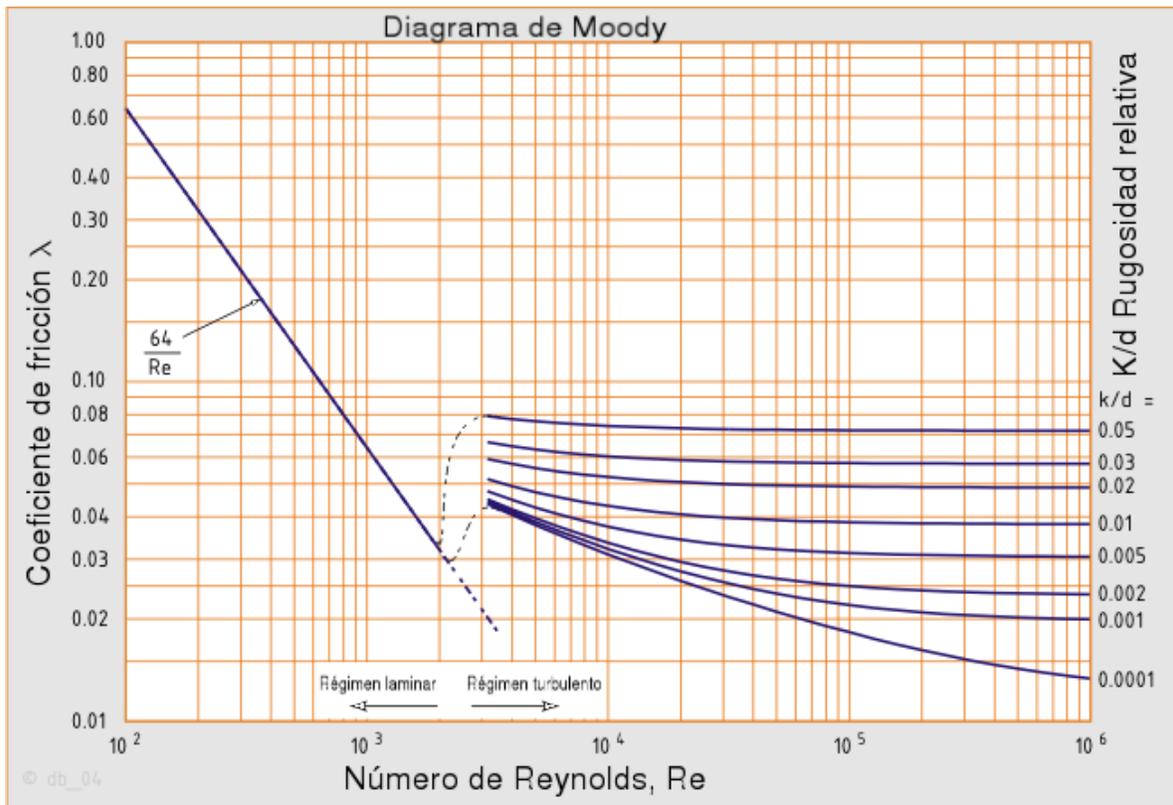
De igual forma se puede obtener a través del diagrama de Moody. Obteniendo el número de Reynolds y la rugosidad relativa. El número de Reynolds [adimensional] se define con la ecuación:

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

Donde

ν = viscosidad cinemática del fluido. [m²/s] Obtenida en la tabla 3.1.

Figura 3.4 Diagrama de Moody.



Nota: Rescatado de la clase de "Suministro y distribución de agua potable". Franco, C. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Posgrado de Hidráulica, Ciudad de México, Ciudad de México. Apuntes de clase del semestre 2020-1.

El número de f se puede obtener también con la fórmula de Swamee-Jain la cual es la siguiente:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \left(\frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right) \right]^2}$$

Tabla 3.1 Viscosidad del agua en las temperaturas habituales de México.

Temperatura °C	Viscosidad Cinemática
0	1.787
2	1.671
4	1.562
6	1.464
8	1.375
10	1.307
12	1.227
14	1.163
16	1.106
18	1.053
20	1.004
22	0.95
24	0.914
26	0.875
28	0.837

Nota: Rescatado de la clase de "Suministro y distribución de agua potable". Franco, C. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Posgrado de Hidráulica, Ciudad de México, Ciudad de México. Apuntes de clase del semestre 2020-1.

Tabla 3.2 Rugosidad relativa de materiales comunes en tuberías.

Material	Darcy-Weisbach (mm) ϵ
Pve y PE	0.0025
Fibrocemento	0.025
Fundición revestida	0.03
Fundición no revestida	0.15
Hormigón armado	0.1
Hormigón liso	0.025

Nota: Coeficiente de rugosidad para diferentes materiales, Recuperado de EPANET 2 Manual del Usuario, Lewis A. Rossman, Water supply and watter resources División (p. 28).

Hazen-Williams calcula las pérdidas por fricción en las tuberías [m] pero sólo de agua en flujo turbulento.

$$h_f = 10.67 \left(\frac{Q}{C} \right)^{1.852} \frac{L}{D^{4.87}}$$

Donde

C = Coeficiente de fricción corregido para dicha ecuación (ver tabla 3.3).

Chezy-Manning calcula las pérdidas por fricción en canales y tuberías grandes sin importar el tipo de régimen que presenten.

$$h_f = Cr \frac{L V^2}{Rh 2g}$$

Donde

Cr = Coeficiente de resistencia al flujo. [adimensional]:

$$Cr = \frac{0.0625}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \left(\frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right) \right]^2}$$

Rh = Radio hidráulico. [m]

$$Rh = \frac{A}{Pm}$$

Donde

Pm = Perímetro mojado. [m]

Al ser una tubería a presión el tubo va totalmente lleno por lo que el perímetro mojado es igual al perímetro total de la tubería:

$$Pm = \pi * D$$

Tabla 3.3 Coeficiente de rugosidad para diferentes materiales.

Material	Hazen-Williams C (Adimensional)	Manning's n (Adimensional)
Hierro colado	130-140	0.012-0.015
Hormigón o revestido de hormigón	120-140	0.012-0.017
Hierro galvanizado	120	0.015-0.017
Plástico	140-150	0.011-0.015
Acero	140-150	0.015-0.017
Arcilla vitrificada	110	0.013-0.015

Nota: Coeficiente de rugosidad para diferentes materiales, Recuperado de EPANET 2 Manual del Usuario, Lewis A. Rossman, Water supply and watter resources División (p. 28).

Las pérdidas por accesorios.

La energía que se pierde en el sistema por accesorios (h_k) [m] se definen con la fórmula:

$$h_k = k \frac{V^2}{2g}$$

Donde

k = coeficiente pérdida por accesorios. [Adimensional]

Los accesorios que general las pérdidas pueden ser válvulas, codos, cambios de dirección, entrada y salida de volúmenes de agua a la red, cambios de sección, el paso por dispositivos como bombas, dispositivos de control de transitorios, bridas, descargas cuyos valores están determinados previamente por el fabricante de dichos elementos, los valores que suelen adoptar en los elementos más comunes se señalan continuación.

Tabla 3.4 Coeficientes de pérdidas menores.

Conectores	coeficiente de pérdidas
Válvula de Globo, totalmente abierta	10
Válvula de Ángulo, totalmente abierta	5
Válvula de Retención de clapeta totalmente abierta	2.5
Válvula de Compuerta, totalmente abierta	0.2
Codo de radio pequeño	0.9
Codo de radio medio	0.8
Codo de radio grande	0.6
Codo a 45°	0.4
Codo cerrado con inversión del flujo	2.2
Te estándar - dirección de paso	0.6
Te estándar - dirección de desvío	1.8
Entrada Recta	0.5
Salida brusca	1

Nota: Coeficientes de pérdidas menores, Recuperado de EPANET 2 Manual del Usuario, Lewis A. Rossman, Water supply and watter resources División (p. 29).

Dotación.

El primer paso para estudiar, diseñar o entender una red de agua potable consiste en determinar la dotación que tiene para cada usuario el sistema. Los organismos operadores que cuenten con micromedición garantizarán este dato, sin embargo para efectos más prácticos se puede determinar este dato por otros medios, por ejemplo por el tipo de clima como se muestra a continuación.

Tabla 3.5 Promedio del consumo de agua potable estimado por clima predominante.

Clima	consumo l / hab/ d			Subtotal por clima
	Bajo	Medio	Alto	
Cálido Húmedo	198	206	243	201
Cálido Subhúmedo	175	203	217	191
Seco o Muy Seco	184	191	202	190
Templado o Frío	140	142	145	142

Nota: Promedio del consumo de agua potable estimado por clima predominante. Recuperado del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado, CONAGUA, (libro 4, p. 10).

Tabla 3.6 Promedio del consumo de agua potable estimado según nivel socioeconómico y clima.

Clima	Nivel Socioeconómico		
	Bajo	Medio	Alto
	m3/toma/mes		
Cálido Húmedo	24	25	28
Cálido Subhúmedo	20	23	26
Seco o Muy Seco	22	22	22
Templado o Frío	15	16	14

Nota: Promedio del consumo de agua potable estimado según nivel socioeconómico y clima. Recuperado del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado, CONAGUA, (libro 4, p. 10).

Por lo que el gasto del sistema tendrá la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{Dot \ Hab \ Vh \ Vd \ Va}{86400}$$

Donde

Dot = Dotación a cada usuario de la red. [lt/día]

Hab = Número de habitantes en la red. [Adimensional]

Vd = Coeficiente de variación diaria de 1.3. [Adimensional]

Vh = Coeficiente de variación horaria de 1.5. [Adimensional]

Va = Coeficiente de variación anual de 1.2. [Adimensional]

86400 = segundos que tiene un día. [día]

Tabla 3.7 Coeficientes de variación horaria para distintas ciudades de México.

t (h)	q/q _{med}	t (h)	q/q _{med}
0	0.606	12	1.288
1	0.616	13	1.266
2	0.633	14	1.216
3	0.637	15	1.201
4	0.651	16	1.196
5	0.828	17	1.151
6	0.938	18	1.121
7	1.199	19	1.056
8	1.307	20	0.901
9	1.372	21	0.784
10	1.343	22	0.71
11	1.329	23	0.651

Nota Coeficientes de variación horaria para distintas ciudades de México (Ochoa., et al. 1993). Recuperado del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado, CONAGUA, (libro 4, p. 10).

Sin embargo el suministro [m³/s] y el consumo [m³/s] es diferente, el suministro se puede entender como:

$$\text{Suministro} = \text{Consumo} + \text{pérdidas}$$

Implementación de un sector.

Para el diseño de una red de agua potable existen muchos parámetros que se pueden modificar, pero la sectorización suele trabajar sobre infraestructura ya existente, por lo que los parámetros que se pueden cambiar son más limitados si se compara con el diseño de una red de agua potable.

Velocidades mínimas y máximas.

Las velocidades mínimas y máximas son parámetros que ayudan a la implementación del sector están reguladas por el manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Las altas velocidades generan erosión mientras que las bajas velocidades generan sedimentación de las partículas que contiene de forma natural el agua, por lo que se ha establecido un rango de velocidades en el manual que se puede apreciar en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Velocidades mínimas y máximas.

Material de la tubería	velocidad (m/s)	
	Máxima	Mínima
Concreto simple hasta 45 cm de diámetro	3	0.3
Concreto reforzado de 60 cm de diámetro o mayores	3.5	0.3
Concreto presforzado	3.5	0.3
Acero con revestimiento	5	0.3
Acero sin revestimiento	5	0.3
Acero galvanizado	5	0.3
Asbesto cemento	5	0.3
Fierro fundido	5	0.3
Hierro dúctil	5	0.3
polietileno de alta densidad	5	0.3
PVC (policloruro de vinilo)	5	0.3

Nota: Velocidades mínimas y máximas, Recuperado del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado, CONAGUA (libro 4, p. 22).

Presiones máximas y Mínimas.

Las presiones máximas y mínimas son definidas en gran parte por las características de resistencia que tenga el material contando también con las características físicas con el cual se haya hecho la infraestructura de la red, para las tuberías de PVC, concreto y acero una presión de 50 mca en la red secundaria no presenta problema, las tuberías de concreto y acero de la red primaria soportan los 100 mca aunque las características específicas dependen del proveedor.

Diseño del sector de la red secundaria.

Para realizar una sectorización el primer paso es hacer los estudios necesarios que permita conocer los parámetros principales, así sea por obtención directa, por algún método empírico, de cálculo o estadístico. De la misma manera se debe conocer la infraestructura de la red sobre la que se trabaja, puede ser por medio de planos, calas o de forma empírica, así como establecer las acciones que permitan controlar y medir las presiones y los caudales dentro del área aislada de la red secundaria que se sectorizó haciendo que las presiones y gastos sean los necesarios.

Lo primero que se debe conocer para implementar la sectorización es la infraestructura presente, así que se debe conocer la pendiente, diámetro y longitud de las tuberías, que si no se cuenta con la información se podrá obtener con métodos de exploración como el despiece en cajas y con calas. También se debe conocer el posicionamiento y elevación de las tomas de los usuarios conectados a

la red de agua potable, así como tener el dato del gasto medido con micromedición o con algún método estadístico basado en fuentes oficiales para conocer el consumo.

Se deben hacer campañas con el fin de informar a la población debido a que para la realización de los trabajos de sectorización se deja a algunos usuarios de la red sin agua durante unos pocos días.

El objetivo de la sectorización es solucionar los problemas de presión, continuidad, abasto al controlar el flujo y presión en un área aislada de la red secundaria.

Para lograr los objetivos se solucionarán las fugas y los problemas de presión, abordando también los problemas que los originan pero con altos niveles de eficiencia: procurando sustituciones innecesarias en la infraestructura de la red, evitando las plantas de bombeo y prefiriendo el funcionamiento a gravedad.

Una vez planteada la posible solución se modela en un software u hoja de cálculo, eligiendo la opción óptima, la cual será donde los parámetros obtenidos sean los de mayor eficiencia, al menor costo conservando su funcionalidad.

Se obtiene la dotación por micromedición y por el manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Se mide el gasto a la salida de los tanques y se obtiene el número de habitantes por tanque abastecidos en condiciones óptimas del sector. Se selecciona la población por almacenamiento de influencia y se obtiene una propuesta óptima.

Un sector que no se encuentre totalmente aislado indicará muchas fugas al realizar la diferencia del gasto que se mide con micromedición con el gasto que entra al sector, por lo que es vital el aislamiento para determinar el valor real de las fugas.

Balance del sector.

Al ser implementado un sector y comprobar su correcto funcionamiento se hace una suma de consumos de los usuarios a la red y se compara con el gasto que ingresa de la fuente de abastecimiento, la diferencia son los volúmenes de agua que se pierde en fugas; la magnitud y rapidez de las soluciones será proporcional al factor de fugas que se obtenga de aquella diferencia.

$$F_a = Q_f + \sum_{n=1}^n Q_d$$

Donde:

Q_d = Gasto consumido por un domicilio conectado a la red. [m^3/s]

F_a = Volumen de fugas de agua potable de la red. [m^3/s]

Como se mencionaba anteriormente, la sectorización es sólo es la primera acción que se debe implementar para comenzar a dar solución a todos los problemas que llegue a presentar el área aislada de la red, por lo que es necesario conocer el balance del sector para hallar las inconsistencias que pudieran presentarse.

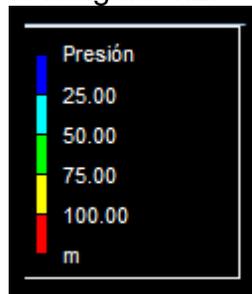
Softwares como herramienta de simulación para la sectorización.

El abastecimiento de agua potable y la calidad del agua poseen factores de los cuales dependerá el diseño o estudio de la red, por lo que es vital su estudio. El diseño de la red depende del gasto, velocidad, presión, cotas, pérdidas e ingresos de energía, material de la tubería por nombrar los principales.

El problema inicia cuando el agua que viene de una sola tubería se ramifica en dos tuberías de características distintas. ¿Qué gasto circulará por cada tubería? Así que se podría plantear la ley de continuidad, sin embargo dejaría a la velocidad y al gasto como incógnitas: "No porque le digas al agua que quieres tres litros de agua en una tubería y dos litros por la otra significa que el agua va a comportarse como el ingeniero quiera". El agua circula hacia donde le cueste menos energía por lo que calcular estos factores depende de un método iterativo que suelen ser tardados y extensos tan solo para una bifurcación simple cuyo objetivo es hallar el equilibrio en el sistema.

Es así como nace la necesidad de una herramienta que tenga listos estos cálculos, y tratándose de suministro de agua potable, la mayoría de los sistemas de suministro de agua potable en el mundo comparten los mismos problemas de baja cobertura, calidad, continuidad y presiones.

Figura 4.3 Rango de presiones de la figura 4.2.



Nota: Simulación hecha sin “castigar” a la red, caso ideal. Simulación hecha desde el Software Epanet 2.0.

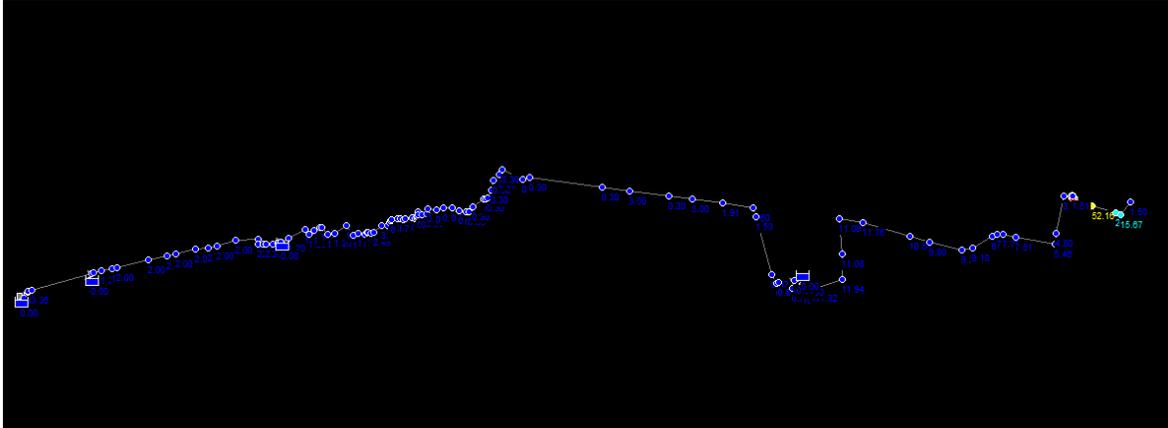
El gasto para el tanque Mimosa está diseñado para 4100 lt/s, para el tanque Jardín del arte el gasto será de 2300 lt/s, para la calle Cerro del Hombre será de 1200 lt/s, entregando a la planta de bombeo Xotepingo un gasto de 1000 lt/s ingresando a la planta de rebombeo Dolores un gasto extra de 400 lt/s provenientes de la red primaria del sistema Cutzamala para este punto y llegando al tanque elevado Cerro de la Estrella un gasto de 1200 lt/s.

La presión para cuando la línea primaria cruce periférico será de 2 m, para el tanque jardín del arte será de 1.2 m y entrega a Xotepingo con 0.3 m, llega al rebombeo en cerro de la estrella con 1.5 m. Cabe resaltar que estos son datos teóricos, el gasto real variará por condiciones como el horario o diario, estiaje, etc.

La información obtenida en el Cárcamo de Dolores contiene las cotas de los nodos, diámetros y trazo de las tuberías mientras que a través del departamento de sectorización de agua potable en la Ciudad de México en SACMEX fue posible medir de forma presencial los caudales en cada uno de los puntos. Se hizo entonces una simulación con los datos obtenidos, a su vez se capturó y simuló en el software Epanet 2.0 para lo que se hicieron dos propuestas.

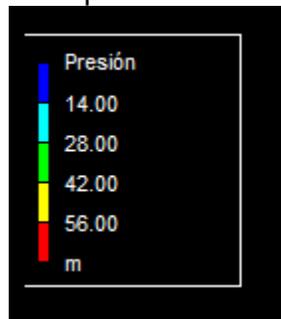
La primera propuesta es la ideal, donde por sí sola el agua tiene la energía suficiente para llegar a Cerro de la Estrella, extremo oriente de la red primaria y la segunda propuesta es una asimilación a la realidad tras la operación de la red primaria al “castigar” la red. Tal castigo consiste en reducir la presión en la línea primaria por medio de tanteo no cuantificado a través de válvulas de seccionamiento parcialmente abiertas.

Figura 4.4 Trazo de la red Primaria desde tanque Mimosa hasta Cerro de la Estrella asemejando a la realidad dispositivos de control de presiones.



Nota: Simulación hecha “castigando” a la red, caso semejante a la realidad. Simulación hecha desde el Software Epanet 2.0.

Figura 4.5 Trazo de la red Primaria desde tanque Mimosa hasta Cerro de la Estrella asemejando a la realidad dispositivos de control de presiones.



Nota: Simulación hecha “castigando” a la red, caso semejante a la realidad. Simulación hecha desde el Software Epanet 2.0.

Se “castiga” a la red primaria al comprender la ecuación del gasto en fugas:

$$Q_f = (HK)^x$$

Donde

K tiene un valor de 10 para las condiciones en México
 x tendrá un valor de 2 cuando sea tubería de PVC y 0.5 en tubería de concreto, dicho valor varía dependiendo de la flexibilidad del material ya que al exponer con altas cargas al material uno se deforma más que otro de forma directamente proporcional.

También se entiende el gasto de fugas con la fórmula de velocidad en tuberías

$$V = \sqrt{2g \Delta H}$$

Donde

ΔH =Diferencia de carga entre un punto anterior y el punto de interés.

Si existe un cambio de carga habrá un cambio de velocidad y se conserva la misma geometría la ecuación de continuidad dice que existe un aumento en el gasto, en otras palabras, la carga es directamente proporcional al gasto de salida; para el caso de las fugas entre mayor carga exista, mayor gasto en fugas habrá.

Por este razonamiento los organismos operadores de las redes de agua potable en la Ciudad de México intentan mantener las presiones al mínimo “castigando” la red primaria.

“Castigar” a la red primaria ocasiona que el agua no tenga la energía necesaria, en veces para llegar a un segundo piso de los usuarios de la red ni para subir a las casas ubicadas en los cerros, ni a llegar al punto final de la red primaria en Cerro de la Estrella, por lo que requieren de un rebombeo, de ahí la razón de ser de la Planta Dolores.

El problema de la red primaria proveniente del sistema Lerma se repite continuamente en la red primaria de la Ciudad de México por lo que para darle solución al problema de presión y continuidad se optó por la sectorización de la red secundaria de agua potable en la ciudad, ya que al tener redes aisladas la presión en la red primaria se puede mantener alta sin provocar las fugas en la red secundaria que una alta carga de presión produciría.

Dispositivos de control de presión.

La causa de los cambios de presión en la red secundaria se entiende con la ecuación de energía; cuando existe un cambio de sección, cambio de dirección, accesorio, entradas y salidas en ciertas circunstancias genera una pérdida de energía, dichos elementos de la red frenan la velocidad del fluido, y al mantenerse una cota constante la presión aumenta.

En cambio si hay una diferencia de cota, pero el gasto y el área es constante, la velocidad también lo será, lo que ocasiona una diferencia de presión con un punto anterior.

Para dar solución a las altas y a las bajas presiones se cuentan con distintos dispositivos los cuales son tanques rompedores de presión, válvulas de seccionamiento, bombas hidráulicas y válvulas de presión principalmente.

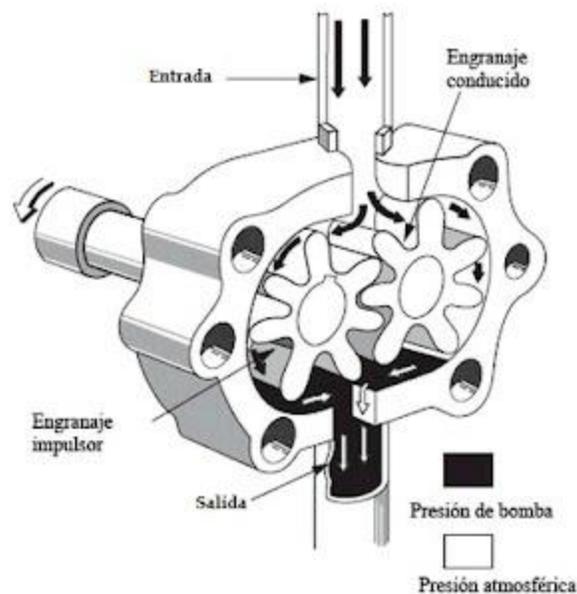
Bombas hidráulicas.

Las bombas hidráulicas son dispositivos electromecánicos que convierten la energía eléctrica en energía mecánica con el fin de impulsar un fluido en una conducción, también puede ingresar energía a un sistema hidráulico, para lo cual se puede clasificar a las bombas de la siguiente manera:

Bombas de volumen fijo.

Estas bombas hidráulicas tienen la ventaja de suministrar un flujo definido con velocidad constante, otra característica es que la bomba tiene una funcionalidad de engranes o piñones y su costo varía dependiendo de la presión y volúmenes requeridos; la simplicidad de su construcción significa un menor costo en su producción, dentro de esta clasificación se encuentran bombas de baja presión, de alta presión, bombas de engranes de 1500 y 2000 Lb/plg².

Figura 4.6 Bomba de engranes.



Nota: Bomba de engranes externos, 26-8-2011, rescatada de <http://industrial-automatiza.blogspot.com/2011/08/bombas-hidraulicas-2-bombas-de.html>.

Bombas de engranes de baja y alta presión.

La flecha impulsora gira dentro de la bomba lo que ocasiona que los piñones engranados a la flecha giren en direcciones opuestas. Conforme los dos piñones se separan se formará una cavidad y se producirá un vacío, este vacío forzará al fluido a ocupar este vacío. El fluido tendrá continuidad debido al constante funcionamiento de los engranes llevando al fluido a la salida de la bomba.

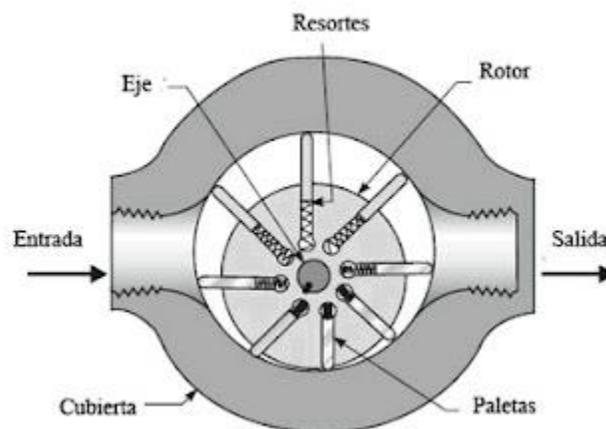
La desventaja más notable de esta bomba son pérdidas internas en la bomba, la diferencia entre la bomba de baja y alta presión es la eficiencia con la que se crean los vacíos y el uso que corresponde a cada una, siendo la de alta presión la que presenta una mayor eficiencia.

Bombas de engranes de 1500 y 2000 Lb/plg².

También conocidas como bombas de la serie “Comercial D” en esta clasificación se incorporan engranes con dentados lisos y tolerancias muy cerradas con el objetivo de darle una mayor eficiencia a la bomba y disminuir el ruido durante la operación de la misma. La diferencia con las bombas de engranes de 2000 Lb/plg² conocida como serie “Comercial H” consiste en ser versión mejorada y pesada en comparación de la serie D cuyos principios de operación son bastante similares.

Bombas de paletas, se clasifican con este nombre las bombas cuyos rotores ranurados son girados por una flecha impulsora, el rotor se encuentra en una posición excéntrica con respecto al eje de la caja de la bomba mientras que las paletas se mueven aproximándose y alejándose de las ranuras del rotor. La rotación de las paletas producirá un vacío en la admisión de la bomba.

Figura 4.7 Bomba de paletas.



Nota: Bomba de paletas, 26-8-2011, rescatado de <http://industrial-automatizada.blogspot.com/2011/08/bombas-hidraulicas-2-bombas-de.html>.

La diferencia de las bombas con eje excéntrico con las bombas de paletas equilibradas de 1000 Lb/plg² está en el trabajo de la compañía Vickers, logrando con ello un diseño que permite tener la carga hidráulica de forma equilibrada, teniendo también la posibilidad de ajustar el sentido de rotación según sean las necesidades del sistema.

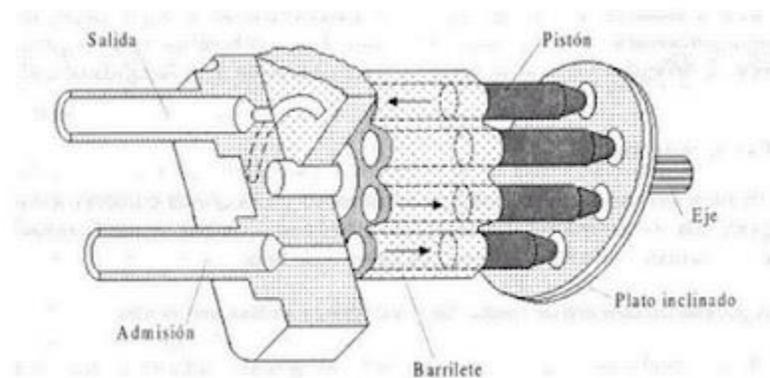
Bombas de Pistón.

Consideradas las más aptas en el uso de la hidráulica para soportar presiones entre 2000 y 5000 Lb/plg². Tienen la clasificación por la dirección del flujo: radial, axial y mixto, siendo el flujo radial cuando el movimiento del fluido se inicia en un plano paralelo al eje de giro del impulsor de la bomba y al salir de la bomba tiene un sentido perpendicular al inicial. El flujo axial se refiere a la bomba en donde la dirección del fluido en el impulsor es axial y alrededor del eje de giro permanece sin cambio de dirección. En cuanto a la bomba de clasificación mixta combina tres direcciones en el flujo, la tangencial, la radial y la axial.

A las bombas dinámicas se les conoce por agregar energía continuamente para incrementar la velocidad del flujo, manteniendo con referencia a la ecuación de energía la presión casi sin modificar.

Las bombas de desplazamiento positivo tienen la utilidad de agregar energía periódicamente mediante la aplicación de fuerza, lo que resulta en un incremento de presión.

Figura 4.8 Bomba de pistones.



Nota: Bomba de pistones, 26-8-2011, rescatado de <http://industrial-automatizada.blogspot.com/2011/08/bombas-hidraulicas-3-bombas-de-pistones.html>.

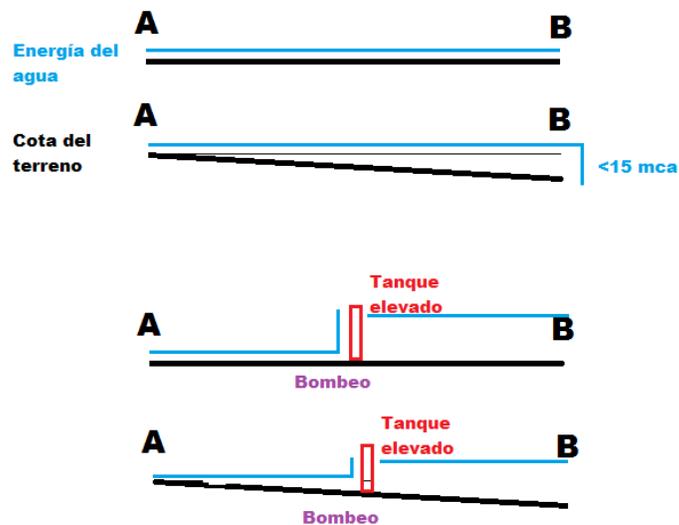
Tabla 4.1 Criterios de clasificación en bombas.

Bombas	Presión Lb/plg2	Velocidad RPM	Volumen Gal/min	Eficiencia %	Eficiencia Total %
Engranaje de baja presión	0	500	5	80	75-800
Engrane 1500	1500	1200	10	80	75-80
Engrane 2000	2000	1800	15	90	80-85
Paleta Equilibrada 1000	1000	1000	11 -- 55	90	80-85
Pistón con empuje angular	3000	1200	120	90	>85
	5000	1800	7.5-41	90	>80
Dynex	6000-	1200-	2.9-2200	90	>85
	8000	2200			

Nota: rescatado de Criterios de clasificación para bombas, González Tolibia Karina Irlanda, Clasificación y tipo de bombas, Dependencia Académica de Ciencias Químicas y Petroleras, Facultad de Química (p.20).

Cálculo de bombas hidráulicas.

Figura 4.9 Energía del agua de un punto A a un punto B.



Nota: el esquema no contempla pérdidas de energía por fricción o accesorios.

Cuando los domicilios de una red de abastecimiento no cuentan con la presión suficiente de entre 5 mca y 15 mca se requiere suministrar más energía a la red de agua potable, sin embargo un bombeo directo dentro de la misma red secundaria no es la mejor opción, pero sí lo suelen ser los tanques elevados. Al bombear agua hacia un tanque elevado, este no ocasiona los problemas que el bombeo directo a la red secundaria causaría.

Se puede entender y estudiar al bombeo dentro de la ecuación de la energía donde:

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma_1} + B = Hf + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma_2}$$

Por lo que para incluirla son necesarias las siguientes ecuaciones:

$$Pot = n \frac{QpgH}{1000}$$

Donde

Pot = Potencia. [Watt]

n = Eficiencia de la bomba. [Adimensional]

$$Pot = n \frac{QpgH}{746}$$

Donde

Pot = Potencia. [Hp]

Por lo que su diseño dependerá de despejar la carga de la ecuación:

$$H = \frac{746Pot}{nQpg}$$

ó

$$H = \frac{1000Pot}{nQpg}$$

Cálculo de las curvas de una bomba.

Para comprender el funcionamiento de una bomba y su relación carga, gasto se debe generar las curvas con la siguiente metodología.

Se debe empezar calculando las pérdidas locales en el sistema:

$$kt = \frac{fL}{\frac{A^2 D}{2g}}$$

Seguido de una sumatoria de las pérdidas en el sistema representado por la ecuación:

$$KT = \frac{1}{2g} \left(\sum_{i=1}^n \frac{f_i L_i}{A_i^2 D_i} \right)$$

Donde

kt = Pérdidas locales del sistema. [Adimensional]

Kt = Pérdidas totales del sistema. [Adimensional]

Una vez obtenido los valores se deben obtener distintos valores de gasto como dominio y para el rango se establece la siguiente ecuación:

$$He = he + KT * Q^2$$

Donde

He = Carga a vencer. [m]

he = Diferencia de cotas. [m]

Se establece el mismo dominio de Q con el rango establecido por la ecuación :

$$H_b = A_b \sqrt{B_b - \left(C_b \left(\frac{Q_i}{Nq} \right) \right)}$$

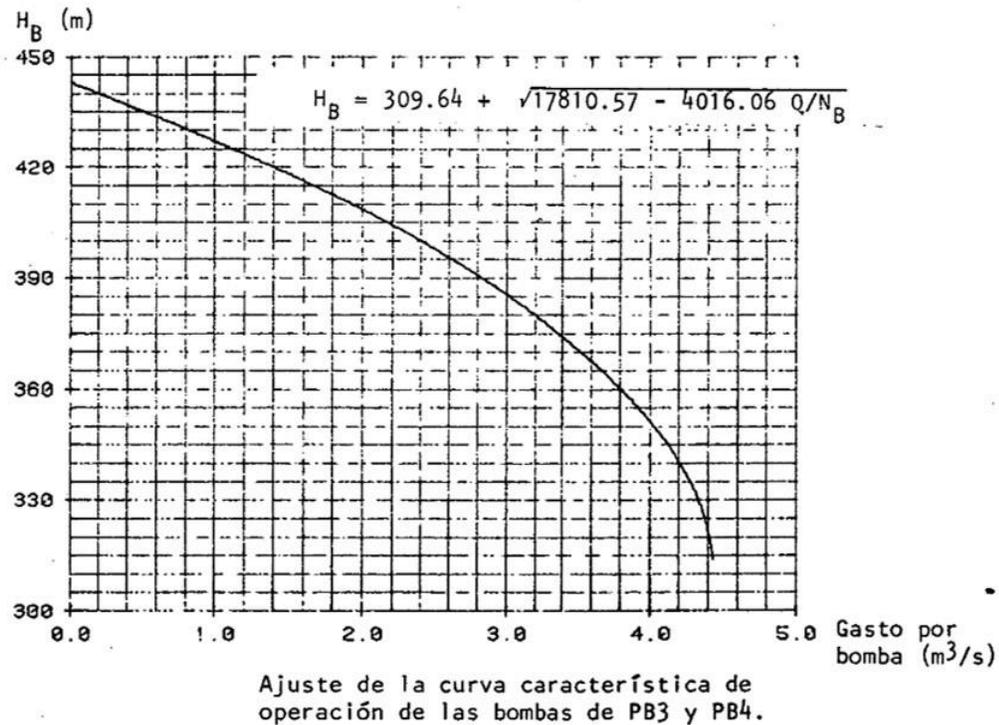
Donde

H_b = Carga de la bomba. [m]

A_b, B_b y C_b = constantes establecidas por el fabricante de la bomba.

Nq = Número de bombas simultáneas.

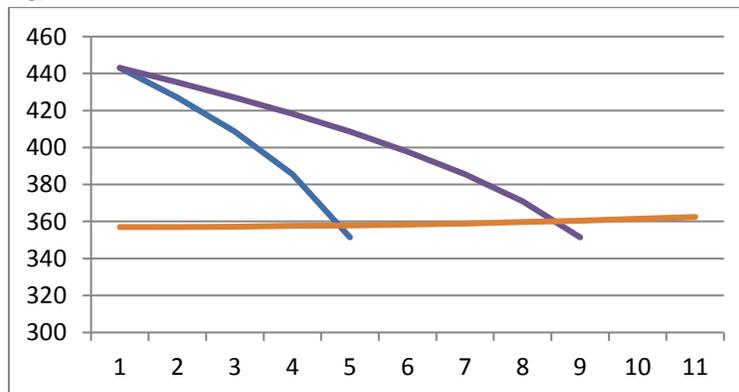
Figura 4.10 Ejemplo de curva de bomba establecida por el fabricante.



Nota: Ajuste de la curva característica de operación de las bombas PB3 y PB4, rescatado de la clase de transitorios hidráulicos, 2021-1, Libia C. Transitorios hidráulicos, Posgrado de Hidráulica Urbana, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Al haber establecido el dominio (Q) y rango (He) se puede graficar la curva de la bomba, de la misma manera y manteniendo el mismo dominio Q y el rango que da la ecuación del fabricante para n número de equipos se procede a comparar las intersecciones y se busca una solución que satisfaga las necesidades del sistema.

Figura 4.11 Ejemplo de gráfica de intersección de la curva de fabricante con la curva del sistema.



Nota: La línea naranja corresponde a la curva de la bomba que requiere el sistema, las líneas azul y morada corresponde a la curva de la bomba con la ecuación propuesta por el fabricante para una y dos bombas respectivamente. Q pertenece a las abscisas y H a las ordenadas.

Golpe de ariete.

Se le conoce al golpe de ariete como a la presión provocada por el paro o inicio repentino del flujo a través del medio que lo transporta, esto puede suceder cuando se cierra repentinamente una tubería, tanto al arranque o apagado de bombas. Las presiones pueden ser negativas o positivas dependiendo de la posición en la tubería inmediata al equipo y dicho sentido de la presión también dependerá si es cierre o arranque de los mismos equipos.

Las presiones y subpresiones generadas suelen deteriorar en escalas considerables a las tuberías y a los equipos cercanos, por lo que su estudio es importante, para ello Alievi propone la siguiente ecuación:

$$a = \frac{1}{\sqrt{\delta \left(\frac{1}{E_v} + \frac{D_i}{e E_t} \vartheta \right)}}$$

Donde

δ = Densidad del agua. [kg/m]

ϑ = Módulo adimensional de la tubería.

D_i = Diámetro interior de la tubería. [m]

e = Espesor de la tubería. [m]

E_v = Módulo de elasticidad de volumétrica del agua. [kg/ms²]

E_t = Módulo de elasticidad de volumétrica de la tubería. [kg/ms²]

Tabla 4.2 Valores del módulo de elasticidad y de Poisson de algunos materiales.

Material de la tubería	Módulo de elasticidad E	Módulo de Poisson
Acero	2.1	0.2
Fibrocemento	0.234	0.2
Concreto reforzado	2	0.2
PVC	0.028	0.4
PRFV	0.14-0.21	0.3

Nota: Valores del módulo de elasticidad y de poisson de algunos materiales, Manual de Agua potable, Alcantarillado y Saneamiento, cálculo, estudio y diseño de instalaciones mecánicas (L. 15 p.37).

Para entender el fenómeno de transitorio es necesario aplicar métodos más elaborados como el de las Características en la ecuación de la energía para conocer instante a instante el cambio de las variables (presión, velocidad y cota). Una forma simplificada de entender la ecuación de Alievi es con la ecuación:

$$Ha = \frac{aV_i}{g}$$

Donde

Ha = Carga de presión máxima en golpe de ariete. [m]

V_i = Velocidad inicial. [m/s]

a = Coeficiente de 1200 para tuberías de acero. [m/s]

Si la presión es excesiva se puede considerar cambiar las variables de la fórmula de Alievi como lo es el espesor del material o considerar colocar dispositivos de control de transitorios.

Velocidad específica.

Para mejorar el diseño de una bomba debe calcularse la velocidad específica, luego de obtenerla se debe escoger la bomba comercial cuyas características más se asemejen a la ecuación:

$$N_s = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}}$$

Donde

N_s = Velocidad específica de la bomba.

Válvulas de Alivio.

Válvula de reducción de presión.

Válvula de control de presión tiene la función de cambiar la carga de presión; entra aguas arriba y disminuyendo a la salida del dispositivo, independientemente de que el fluido tenga intermitencia o incluso si la presión presenta variaciones aguas arriba del dispositivo.

El cuerpo hidrodinámico de las válvulas está diseñado para un paso de flujo sin obstrucciones y proporciona una capacidad de modulación excelente y altamente efectiva para aplicaciones en casos de una alta presión diferencial.

Figura 4.12 Válvula de reducción de presión.



Nota: Válvula de reducción de presión Bermad, catálogo de válvulas, 2017, archivo digital de sectorización de agua potable de la Ciudad de México, SACMEX.

Válvula reductora de presión con compensación de flujo.

Válvula de control reductora de presión con la funcionalidad de optimizar automáticamente y continuamente la presión aguas abajo del dispositivo, ajustando de la misma manera el caudal aguas abajo.

Figura 4.13 Válvula reductora de presión con compensación de flujo.



Nota: Válvula de reducción de presión con compensación de flujo Bermad, catálogo de válvulas, 2017, archivo digital de sectorización de agua potable de la Ciudad de México, SACMEX.

Válvula de alivio de presión rápida.

La válvula de alivio de presión rápida es una válvula de control que alivia la presión excesiva del sistema cuando esta presión se eleva por encima de un valor preestablecido manteniendo un rango preferente para red secundaria entre 0 y 15mca. Responde de forma inmediata, precisa y con alta repetibilidad al aumento de presión de la red.

Figura 4.14 Válvula de alivio de presión rápida.

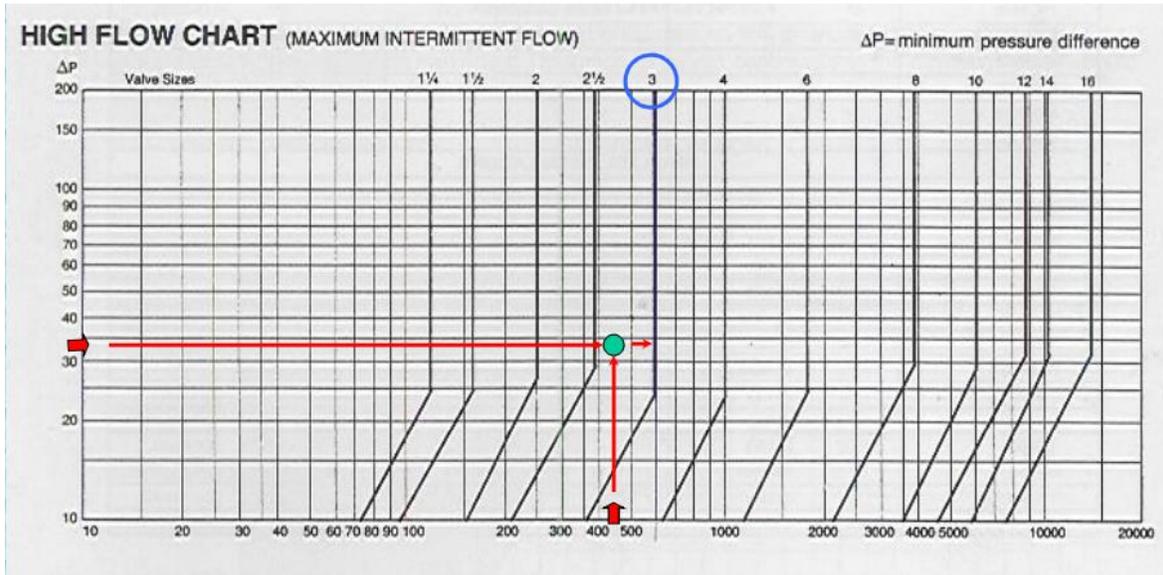


Nota: Válvula de alivio de presión rápida Bermad, catálogo de válvulas, 2017, archivo digital de sectorización de agua potable de la Ciudad de México, SACMEX.

Selección de válvulas VPR.

Un primer criterio además de las sugerencias de fábrica por cada válvula reguladora de presión se encuentra en la figura 4.15; Para la selección de válvulas VPR primero se calcula el caudal en Galones por segundo que corresponde a las abscisas y la diferencia de presión, refiriéndose de tal manera a la diferencia de la presión original y la presión deseada se calcula en el eje de las ordenadas en psi, al hallar los valores en los respectivos ejes se prolongan líneas perpendiculares hasta donde converjan, se busca en sentido lateral la próxima medida en pulgadas de la VPR presentadas en la parte horizontal superior de la figura 4.15.

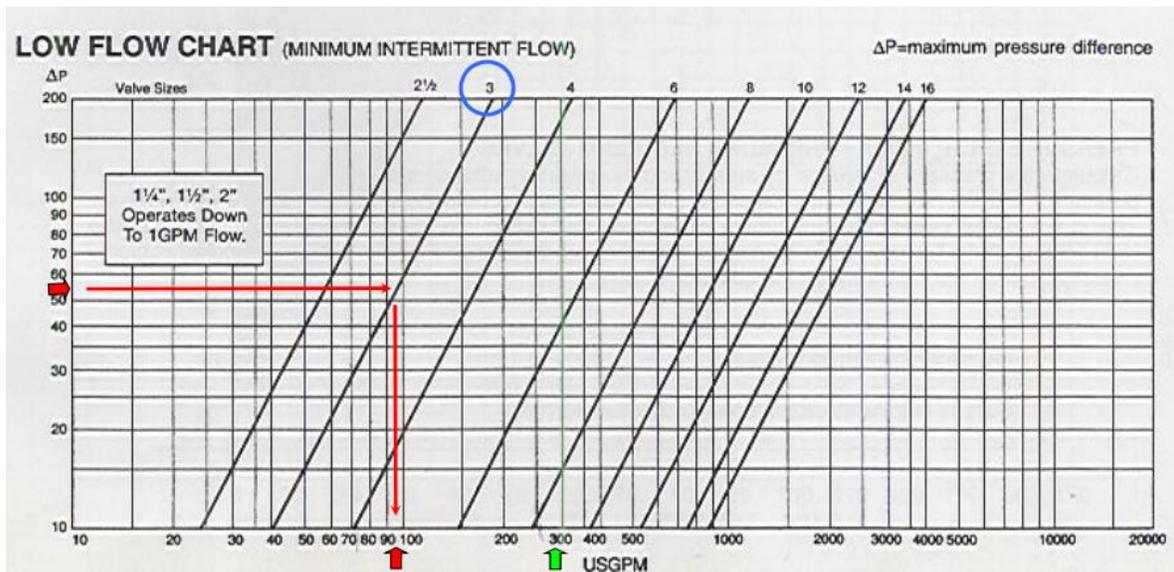
Figura 4.15 Selección de tamaño de VPR por gasto máximo.



Nota: Selección de diámetro por gasto máximo, 2018, Franco D., Rescatado de diapositivas Definición del diámetro de las VPR's en el sector Madereros, Ciudad de México. SACMEX.

De manera que se debe proceder a una revisión de pulgadas por gasto mínimo utilizando la figura, para ello se repite el procedimiento anterior en la figura 4.16 coincidiendo líneas perpendiculares con el valor que corresponda al gasto (mínimo) en las abscisas y a la diferencia de presiones (mínimas) en las ordenadas seguido de que la zona en donde coincidan sea de igual o menor área bajo el tamaño de la válvula, representado en la línea horizontal superior.

Figura 4.16 Revisión de pulgadas por gasto Mínimo.



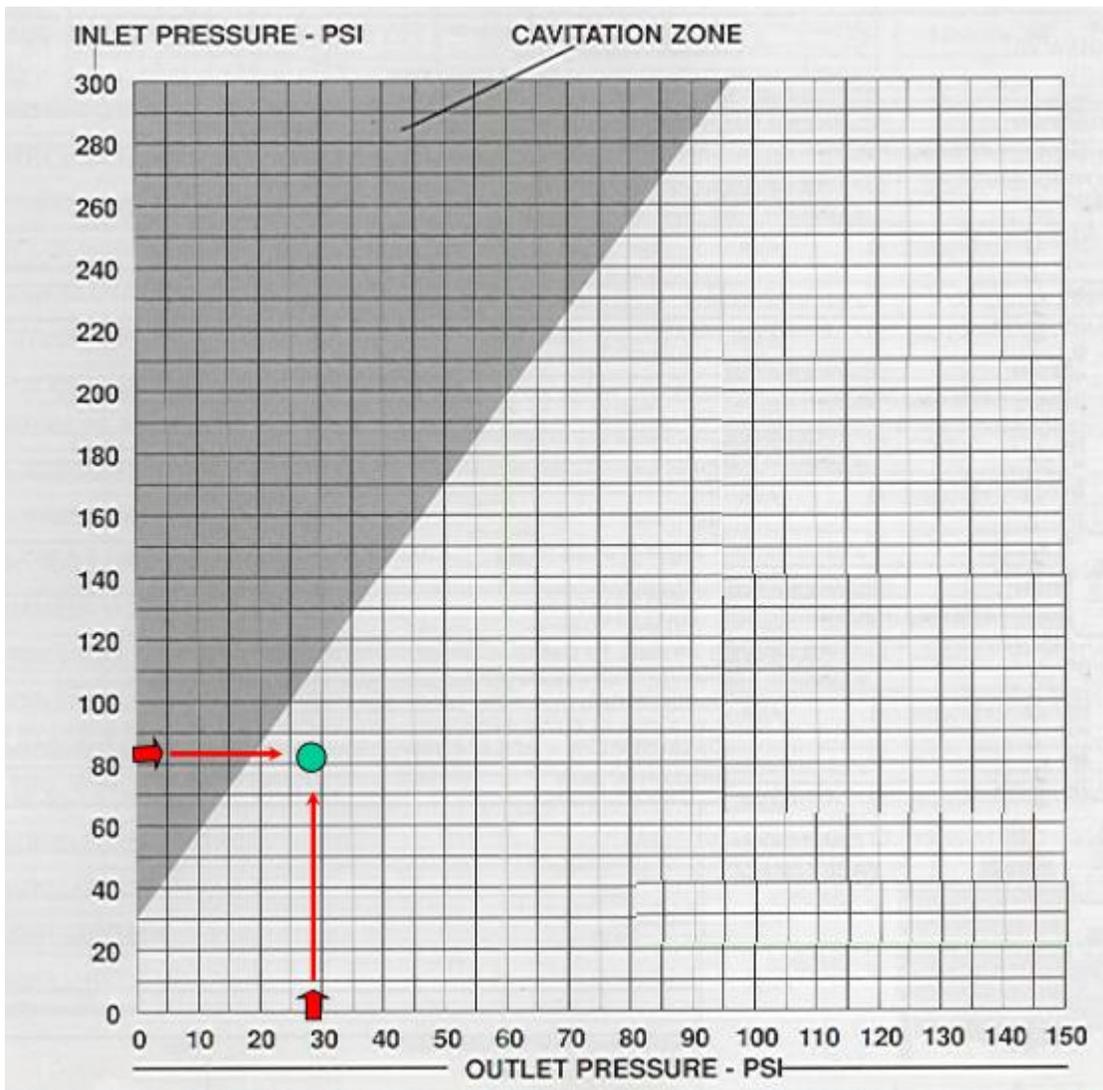
Nota: Selección de diámetro por gasto mínimo, 2018, Franco D., Rescatado de diapositivas Definición del diámetro de las VPR's en el sector Madereros, Ciudad de México. SACMEX.

Revisión por cavitación.

La cavitación es un efecto que pueden sufrir los equipos hidromecánicos cuando se crean cavidades de vapor dentro de un fluido, esto ocurre cuando las moléculas del fluido líquido cambian a estado gaseoso, el gas implosiona y ocasiona daños a los elementos de la red.

Una primera revisión puede ser analizada en la figura 4.17 donde se coloca la presión inicial en las ordenadas en psi y la presión deseada en las abscisas en psi. Si las líneas perpendiculares a sus valores correspondientes caen en el área oscura superior entonces existirá un fenómeno de cavitación en las VPR.

Figura 4.17 Revisión por cavitación.



Nota: Revisión por cavitación, 2018, Franco D., Rescatado de diapositivas Definición del diámetro de las VPR's en el sector Madereros, Ciudad de México, SACMEX.

Softwares en la modelación.

El abastecimiento de agua potable y la calidad del agua poseen factores de los cuales dependerá el diseño o estudio de la red, por lo que es vital su estudio. El diseño de la red depende del gasto, velocidad, presión, cotas, pérdidas e ingresos de energía, material de la tubería por nombrar los principales.

El problema inicia cuando el agua que viene de una sola tubería se ramifica en dos tuberías de características distintas. ¿Qué gasto circulará por cada tubería?

Así que se podría plantear la ley de continuidad, sin embargo dejaría a la velocidad y al gasto como incógnitas: "No porque le digas al agua que quieres tres litros de agua en una tubería y dos litros por la otra significa que el agua va a comportarse como el ingeniero quiera". El agua circula hacia donde le cueste menos energía por lo que calcular estos factores dependen de un método iterativo que suelen ser tardados y extensos tan solo para una bifurcación simple cuyo objetivo es hallar el equilibrio en el sistema.

Es así como nace la necesidad de una herramienta que procese con rapidez tales iteraciones, y tratándose de suministro de agua potable, la mayoría de los sistemas que abordan el tema en el mundo comparten los mismos problemas de una baja cobertura, calidad, continuidad y presiones.

Existen diversos softwares de cálculo con los cuales se puede acelerar el proceso de cálculo, se deben usar como herramienta para observar el comportamiento de los factores de importancia en la red de agua potable al hacer un cambio en ésta, tal sea el caso de la colocación de los dispositivos de control de presiones; sugiriendo EPANET para Bombas, válvulas, tanques rompedores de presión y válvulas de seccionamiento, así como Trans por parte de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México para dispositivos transitorios.

Además del software se requiere el criterio y el conocimiento hidráulico de los datos que se le ingresa así como de los datos que ofrece como resultado, tanto en unidades como en los fenómenos que se presentan cuando el programa no percibe el error.

Conclusiones y futuras líneas de trabajo.

Al momento del término de trabajo se necesita una gran cantidad de sectores a implementar que se prevé terminar para el año 2024, sin embargo el trabajo de la implementación de sectores no acaba ahí, se menciona que para dar soluciones a los problemas de continuidad y presiones la sectorización es la mejor opción para comenzar a solucionar los problemas.

Al mes de enero del año 2022 se tiene proyectada la construcción de 140 sectores más, además de contar con 450 sectores construidos y 208 en construcción con un presupuesto total de 1194 MDP.

Una vez implementados todos los sectores en la ciudad se deben realizar acciones que tengan el fin de mejorar la eficiencia, una de estas acciones debe ser siempre controlar y monitorear las presiones al interior de los sectores de tal manera que la perturbación en las presiones avise al centro de monitoreo de accidentes o mal funcionamiento de los elementos.

En cada sector se ha instalado al menos una válvula reguladora de presión a la entrada del sector, siendo los sectores que se encuentran al oriente de la ciudad y los sectores en elevaciones que requieren además válvulas sostenedoras de presión. Las ventajas de controlar la presión en los sectores es que se ha tenido un mejor control en la distribución y continuidad.

Los sectores de Tláhuac y algunos sectores de Tlalpan están diseñados para que la energía del agua sea suministrada por equipo de bombeo, la forma de diseñar y estudiar dichos sectores se señalan en el capítulo 4 de este trabajo, así como a las válvulas VPR que se necesite para el resto de los sectores en la ciudad que faltan por construir.

Las velocidades del flujo al interior de los sectores quedan dentro del reglamento y el límite de presión para una tubería se establece de 50mca, aunque es el fabricante quien determina su resistencia, no representan problema en el sector.

Se deberá verificar que si los sectores construidos como los que faltan por construir se encuentran totalmente aislados; la forma de verificar a un sector aislado de la red secundaria es cerrando la válvula de seccionamiento a la salida de la fuente de abastecimiento (red primaria) y con un instrumento medir que la presión sea cero, o sea, se deja el sector con una presión de 0 mca en horas sin demanda, y si existe un cambio en esta presión es que el sector se encuentra abierto, por lo que habrá que identificar la salida, arreglarla y repetir la prueba para verificar y arreglarlo, el proceso se debe repetir hasta que se tenga comprobado que no existe salida de agua potable fuera del sector a través de esta prueba.

A partir de ahora todos los problemas relacionados a una baja eficiencia de la red, cobertura, continuidad y presión podrán empezar a abordarse y mitigarse; según el jefe de proyectos de sectorización, medición y automatización del Sistema de Aguas de la Ciudad de México SACMEX “el dinero que se invierte en proyectos de sectorización y aumento de eficiencia de la red se recupera con el costo del volumen que ya no se pierde en fugas”.

El concepto de círculo virtuoso se refiere a las acciones que en conjunto generan condiciones que benefician a una parte de sus integrantes, considerando al menos dos partes que interactúan entre sí; al ser beneficiada alguna de las dos partes, las condiciones hacen que se generen de nuevo mejores condiciones para la otra parte. El concepto de círculo virtuoso también se aplica a la sectorización.

Si el servicio de suministro de agua potable contara con suministro de agua las veinticuatro horas los siete días de la semana, además de que la red tuviera suficiente energía para llegar a las altas cotas y pisos superiores entonces más usuarios pagarían el servicio y a su vez esta acción provocaría que se tuviera más financiamiento para invertir en el cuidado y mantenimiento de la red de distribución, lo que a su vez ocasionaría menos pérdidas en volúmenes de agua.

Las pérdidas de volúmenes de agua de la red de distribución las pagan los usuarios a través de la tarifa por el servicio de agua potable. Evitar y reparar las fugas son costos que se le ahorran a los usuarios, por otro lado un círculo vicioso es lo contrario del círculo virtuoso: si los organismos operadores comienzan a quitarle continuidad y presión a los usuarios de la red, crean condiciones que afectan la infraestructura, lo que hace cada vez más difícil y costoso brindarles la presión y continuidad a los usuarios, lo que hará que muchos se nieguen a pagar su tarifa bimestral, ocasionando con ello que se cuente con menos presupuesto para arreglar las afectaciones que impiden darles un buen servicio a los usuarios.

El problema de círculo vicioso se extendería en ambas partes de forma indefinida por lo que habría que llevar a cabo las acciones que permitan que se puedan presentar los círculos virtuosos en las redes de distribución.

Medidas para aumentar la eficiencia:

- Detección y reparación de fugas.

- Sustitución de elementos de la red dañados.

- Verificación de micromedidores.

- Campañas de reparación de fugas domiciliarias.

Normalización de pago en tarifas de agua.

Mejora de calidad del agua potable.

Monitorear las presiones de la red primaria.

Monitorear las presiones de los sectores de la red secundaria.

Seleccionar equipo de control de presiones adecuado para brindar las presiones deseadas.

Conforme se avance en las medidas de mejoramiento de la red con respecto al tiempo, el servicio de agua potable también lo hará, lo que generará un círculo virtuoso y su autosuficiencia en términos económicos.

Existen otros grandes conflictos ajenos a la ingeniería para que un sector funcione; los cuales se han mencionado en general en el capítulo porque la mayor parte de estos problemas son de origen social como problemas políticos, religiosos o donde se vean intereses afectados y una mala operación de la red por lo cual se cree socialmente que este tipo de acciones es un gasto inútil, por lo que la sectorización también deberá incluir una campaña de información..

Existe un problema al momento de hablar de la planeación que ha tenido la red de distribución de agua potable, ya que normalmente se hace sin un orden y con total anarquía, generando una cantidad innumerable de problemas, por lo que es responsabilidad del ingeniero identificarlos y resolverlos de forma oportuna.

Una futura línea de acción será tapar las salidas con placas de metal, entonces tendrá que ser muy especializado el organismo en hidráulica para poder cambiar las condiciones en estos puntos de la red secundaria, por lo que el funcionamiento del sector no se verá afectado con el movimiento de válvulas de seccionamiento por personas u organismos que tengan la intención de sabotaje por intereses de por medio. La medida resulta muy útil para mantener las presiones estables.

Automatizar los dispositivos de control de presiones ocasiona un gran número de problemas, entre ellos se ha popularizado la idea que la gente de organismos operadores tendrán trabajos obsoletos, entonces suelen estropear los trabajos realizados para mantener las presiones estables. Cuando en realidad su trabajo sólo cambiaría su hacia el mantenimiento, operación y verificación de los trabajos realizados. Diversas situaciones podrían ser arregladas de forma eficiente con una correcta comunicación con los organismos operadores.

Referencias.

Bibliografía.

- CONAGUA (2019). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable. México, D.F. CONAGUA.
- Comisión Nacional del Agua (2009). Semblanza histórica del agua en México. México: CONAGUA.
- Cruickhank G. (1998). Proyecto Lago de Texcoco. Rescate hidroecológico. México.
- Fernández , A. (2006). Sectorización en redes de agua potable. México, D.F. CONAGUA.
- Filián, G. (2004). Utilización de EPANET a un Sistema de Agua Potable. Tesis de grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Jutglar, Luis B. (2005). Bombas, ventiladores y compresores. Ediciones Ceac. España.
- Kenneth J. McNaughton. S.F. Bombas, selección, uso y mantenimiento. Ed Mc Graw Hill.
- Orive A. (1952). Los problemas del Valle de México en ingeniería hidráulica en México, núm. 2.
- Peña P. y Levi E. (1989). Historia de la hidráulica en México. Abastecimiento de agua desde la época prehispánica hasta el Porfiriato. México: CONAGUA
- Pérez, R. (2005). Análisis del Comportamiento Hidráulico de la Red de Abastecimiento de la Ciudad de Córdoba Mediante EPANET. México, Córdoba. Universidad de córdoba.
- Perló M. (1999). El paradigma porfiriano. Historia del desagüe del Valle de México. México, UNAM, Instituto de Investigaciones Sociales.
- Perló M. y González A. (2009). ¿Guerra por el agua en el Valle de México?: estudios sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y el Estado de México. México, UNAM, Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad, Coordinación de Humanidades, 2da edición.
- Romero M. (1949). Los acueductos de México en la historia y en el arte. Instituto de investigaciones estéticas. UNAM.

Sistema de Aguas de la Ciudad de México (2018). Diagnóstico logros y desafíos, México, SACMEX.

Sistema de aguas de la Ciudad de México (2012). El gran reto del agua en la ciudad de México. Pasado, presente y prospectivas de solución para una de las ciudades más complejas del mundo. México, SACMEX. Zubicarag Viejo, Manuel (1979). Bombas, teoría, diseño y aplicaciones Ed. Limusa. 2 Ed.

Apuntes de clase.

Franco, C. Clase de "Suministro y distribución de agua potable". Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Posgrado de Hidráulica, Ciudad de México, Ciudad de México. Apuntes de clase del semestre 2020-1.

Jiménez, M. Clase de "Abastecimientos de agua potable". Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Nezahualcóyotl, Estado de México. Apuntes de la clase de la semana 2-8 semestre 2016-1.

López, C. Clase de "Captaciones y conducciones" Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Posgrado de Hidráulica, Ciudad de México, Ciudad de México. Apuntes de clase de la semana 1-3, del semestre 2020-2.

Martínez, S. Clase de "Impacto ambiental". Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Nezahualcóyotl, Estado de México. Apuntes de la clase de la semana 1 del semestre 2014-2.

Pomposo, L. Clase de "Hidrología". Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Nezahualcóyotl, Estado de México. Apuntes de la clase de la semana 2-3 del semestre 2016-1.

Solorio, F. Clase de "Hidráulica aplicada" Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Posgrado de Hidráulica, Ciudad de México, Ciudad de México. Apuntes de clase de la semana 2-6, del semestre 2020-1.

Referencias en internet.

CONAPO (2019). Proyecciones de la población de México y de las Entidades Federativas, 2016-2050 y Conciliación Demográfica de México, 1950-2015. Rescatado del 23 de Octubre del 2019. www.gob.mx/conapo/acciones-y-programas/conciliacion-demografica-de-mexico-1950-2015-y-proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-y-de-las-entidades-federativas-2016-2050

Gobierno de la Ciudad de México, (2021). Registra gobierno capitalino avance de casi 35 por ciento en sectorización de agua en la Ciudad de México. Rescatado el día 2 de octubre del 2021.

<https://www.jefaturadegobierno.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/registra-gobierno-capitalino-avance-de-casi-35-por-ciento-en-sectorizacion-de-agua-en-la-ciudad-de-mexico>

Gobierno de México (2019). Agua en el mundo. Recuperado del 4 de marzo del 2021. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/agua-en-el-mundo>

Lewis, A. (2002). EPANET 2 Manual del Usuario, Rescatado del 15 de marzo del 2014. https://epanet.es/wp-content/uploads/2012/10/EPANET_Manual_Usuario.pdf

Maguay H. (2018). Más del 80% del agua se va en uso agrícola y de la industria. Rescatado del 15 de abril del 2020. <https://www.gaceta.unam.mx/crisis-agua-industria/#:~:text=A%20nivel%20mundial%2C%20la%20industria,es%20de%20alrededor%20de%2010%25>.

Plaza, J. (2017). Ejercicios prácticos en EPANET. Rescatado del 15 de febrero del 2020. www.unipiloto.edu.co/descargas/LibroEpanet.pdf

SEDESOL, CONEVAL (2015). Informe Anual Sobre la Situación de Pobreza y Rezago Social. Recuperado del 2 de febrero del 2020. www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/47641/Zacatecas_049.pdf

Sistema de información del agua potable y saneamiento. (2019). Evolución de la legislación de aguas en México. México. COLMEX. Recuperado de siaps.colmex.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=71evolucion-de-la-legislacion-de-aguas-en-mexico&catid=49legislacion-del-agua&Itemid=95

Soto N. (2019). La ciudad que secó sus lagos y hoy enfrenta la escasez de agua. Ciencia UNAM. Rescatado del 13 de agosto del 2021. <http://ciencia.unam.mx/leer/848/la-ciudad-que-seco-sus-lagos-y-hoy-enfrenta-la-escasez-de-agua->