



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

*“SIMULACIÓN NUMÉRICA TRANSITORIA DE LA RED DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN CU”*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

BERTÍN LAGUNAS RAMÍREZ

DIRECTOR DE TESIS: *DR. MARTÍN SALINAS VASQUEZ*

MÉXICO, CIUDAD UNIVERSITARIA

2012



DEDICADO A:

A mis padres Mary y Hermelando, a mis hermanos Elizabeth y Adrian, Fernando y Gerardo que siempre me han apoyado a lo largo de mi vida; a Denise que me acompañó y ayudó en este trayecto.

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que han sido parte fundamental en mi vida y que sin ellas no sería posible la realización de este trabajo.

A Dios por ser el que me permite hacer todo.

A mi familia que siempre está conmigo en los buenos y malos momentos.

A mi tutor Dr. Martín Salinas Vázquez por todo el apoyo brindado.

A mis sinodales William Vicente y Rodríguez, Eliseo Martínez, Jesus Javier Cortes Rosas y Eduardo Medina Hernandez.

INDICE

1 INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 Antecedentes.....	4
1.2 Suministro de Agua.....	5
1.3 Tanques de almacenamiento.....	11
1.4 Red de distribución.....	15
2 MODELO DE SISTEMA.....	20
2.1 Componentes físicos.....	20
2.1.1 Conexiones.....	20
2.1.2 Depósitos.....	21
2.1.3 Tanques.....	21
2.1.4 Emisores.....	22
2.1.5 Tuberías.....	22
2.1.6 Método de resolución.....	25
2.1.7 Pérdidas.....	27
2.1.7.1 Pérdidas primarias.....	27
2.1.7.2 Pérdidas secundarias.....	28
2.1.8 Bombas.....	33
2.1.9 Válvulas.....	34
2.2 Componentes no físicos.....	34
2.2.1 Curvas.....	34
2.2.2 Patrones de tiempo.....	39
2.3 Fugas.....	40
3 RESULTADOS.....	46
3.1 Generalidades.....	46
3.2 Planteamiento de problema.....	47
3.3 Descripción del sistema.....	47
3.4 Resultados.....	49
4 CONCLUSIONES.....	63
5 BIBLIOGRAFÍA.....	66

RESUMEN

En los últimos años en Ciudad Universitaria se ha venido acrecentando considerablemente el consumo de agua por lo que se considera imperativo tomar acciones que ayuden a reducir el problema de suministro de agua.

La simulación de la red de distribución de agua puede ser de gran ayuda para entender la situación que se vive actualmente y por medio de ésta realizar las modificaciones pertinentes para el buen abastecimiento del líquido.

En este trabajo se presenta un modelo numérico, para la representación de las principales características de la red de distribución de agua en Ciudad Universitaria. El modelo del sistema se desarrolla utilizando la ecuación de Hazen-Williams para la obtención de pérdidas y toma en cuenta las características de los componentes: rugosidad, altura de nodos, diámetro de tuberías, longitud de tuberías, curvas de bombas, etc. Los coeficientes de la ecuación de Hazen-Williams fueron asignados según su material.

El modelo se realizó utilizando EPANET, un software especializado en fluidos desarrollado por la "Water Supply and Water Resources Division" que es una agencia de protección del medio ambiente en Estados Unidos.

La simulación consiste en una red compuesta por tuberías de distintos diámetros y materiales, bombas, tanques de almacenamiento y reservorios según las observaciones que se han realizado en campo. La red se alimenta por medio de los reservorios que con un sistema de bombeo llenan los tanques de almacenamiento y después se distribuye el agua por medio de las tuberías que van a lo largo y ancho de ciudad universitaria.

El modelo proporciona información sobre el estado de la red, presión, velocidad y flujo de agua; estos datos dependen de la posición y la hora del proceso.

Objetivo

Simular la red de distribución de agua potable en CU por medio de un programa de simulación de Fluidos (EPANET) utilizando datos proporcionados por PUMAGUA para reproducir las condiciones generales del sistema de distribución de agua durante un lapso de 24 horas, los resultados se analizarán proponiendo posibles modificaciones tanto en componentes como en procesos de operación.

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La Ciudad Universitaria tiene una creciente población estudiantil por lo tanto la demanda de agua también aumenta constantemente. El hecho de tomar acciones que ayuden a reducir el consumo de agua así como optimizar la distribución de la misma es de gran importancia y beneficiaría no solo a la población de CU sino a todo el país ya que se procuraría la distribución de información relacionada al buen uso del líquido. Se ha referido que la situación del agua en Ciudad Universitaria es, a menor escala, similar a la existente en la Ciudad de México.

Según estudios realizados por PUMAGUA actualmente la población en Ciudad Universitaria se mantiene en alrededor de 131, 832 personas donde se incluye a personal administrativo, docentes y estudiantes en general. Esta población se incrementa constantemente es por eso que entre más pronto se tomen acciones para resolver el problema más agua estaríamos ahorrando con el paso del tiempo.

Tabla 1.1 Registro de población para consumos de agua potable, Ciudad Universitaria.

Tipo de Población	Población
Personal Académico	21,899
Personal Administrativo	9, 541
Estudiantes	100,242
Multifamiliar de Maestros	150
TOTAL	131,832

Está población tiene una demanda de agua de 120 litros por segundo de los cuales la mitad es decir 60 litros por segundo es desperdiciada en fugas.

La red de tubos en ciertas zonas tiene una edad de hasta 50 años lo que hace que en estas zonas la cantidad de fugas sea incluso mayor al 50%, en tuberías con menor edad el porcentaje de fugas es menor pero está alrededor de 35% lo cual sigue siendo preocupante.

El sistema de distribución de agua en Ciudad Universitaria se compone de suministros de agua, tanques de almacenamiento y una red de distribución, estos tres elementos funcionan de manera coordinada para satisfacer las necesidades de agua en el Campus Universitario.

1.2 SUMINISTROS DE AGUA

El Campus Principal de la UNAM se abastece mediante tres pozos: Química, Multifamiliar y Vivero Alto; los cuales son de uso exclusivo para el consumo de Ciudad Universitaria. En total, de los tres pozos se extraen como máximo 170 l/s, siendo los pozos Multifamiliar y Vivero Alto los que funcionan diariamente, y actualmente el pozo Química se mantiene como reserva. Las características de cada uno de ellos se muestran en la Tabla 1.2, Las bombas de los pozos Química y Multifamiliar son sumergibles a diferencia de la del pozo Vivero Alto que es vertical (Figura 1.1), el mantenimiento que reciben anualmente es de limpieza, cada 5 años se realiza un mantenimiento completo, que implica tratamiento químico y eliminación de incrustaciones en el ademe mediante cepillado y limpieza. Mensualmente se miden los niveles dinámicos y estáticos de cada uno de los pozos con la finalidad de monitorear la recuperación de los mismos.

Tabla 1.2 Características generales de los pozos en Ciudad Universitaria (Cortesía PUMAGUA)

Pozo	Gasto (l/s)	Profundidad (m)	Potencia Bomba (HP)
Química	31	132	125
Vivero Alto	48	157	250
Multifamiliar	91	193	250

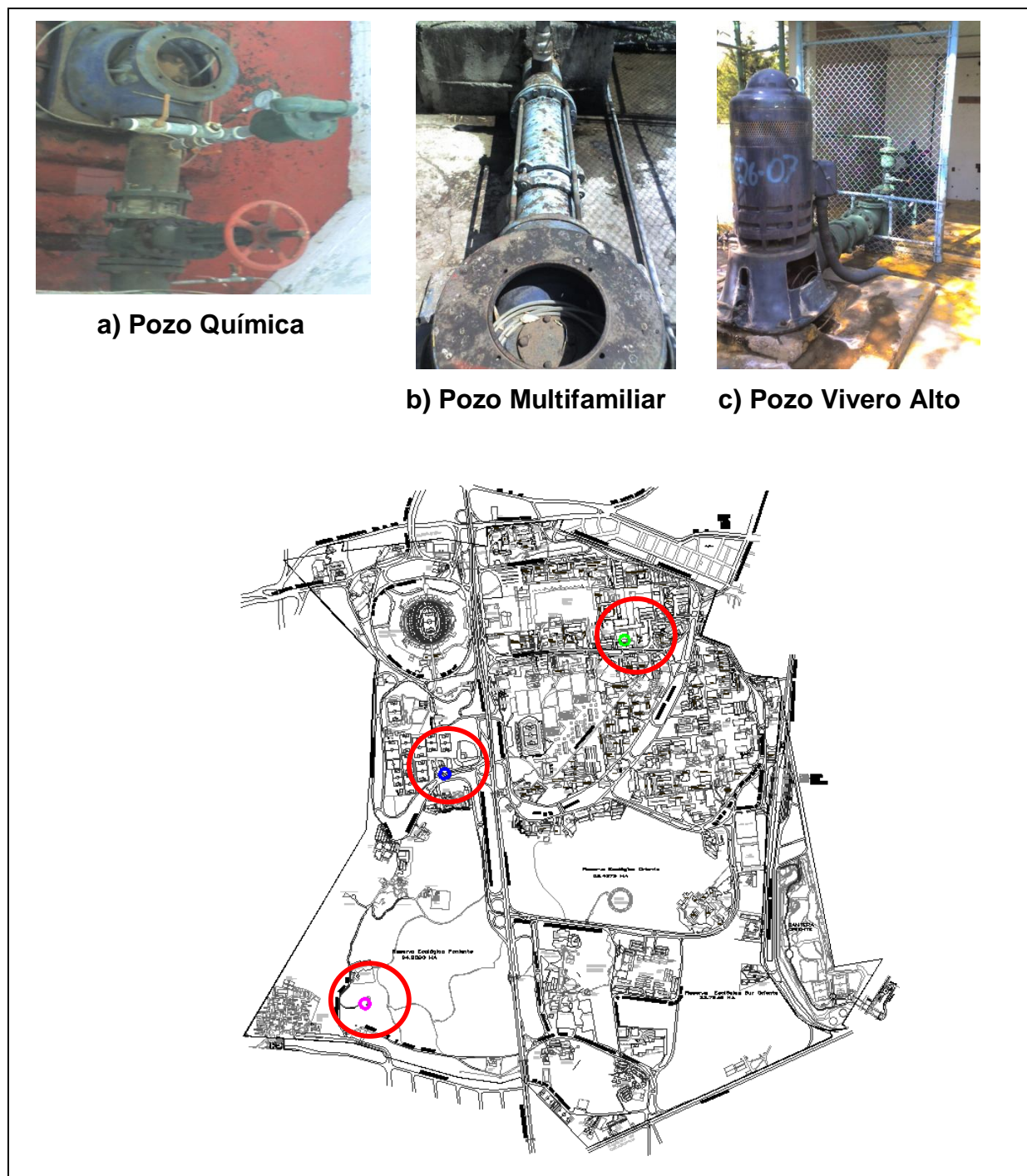


Figura 1.1 Bombas de los pozos en Ciudad Universitaria (Cortesía PUMAGUA)

En cada pozo se encuentra instalado un medidor de propela, (con número de inventario de la CONAGUA). A esta entidad se debe reportar mensualmente la extracción total por cada

pozo; para lo cual se lleva un registro diario que consta de la toma de lectura en el medidor cada hora durante el tiempo que operan las bombas.

Es importante aclarar que existen tres turnos que operan los pozos durante las 24 horas del día. Se observó que cada turno tiene sus políticas de operación, que aunque no son excesivamente diferentes una de otra, no corresponden a una política común que haya sido obtenida a través de la medición y análisis de la demanda de agua, sino en función de la experiencia y costumbre de cada operario.

En la Figura 1.2 se presenta la evolución del volumen de extracción mensual para cada uno de los tres pozos de Ciudad Universitaria para el 2007; siendo la extracción total de 2,459,692 m³. Se observa un incremento de volumen de agua extraído durante los meses de agosto a diciembre (periodo de riego), así como un descenso considerable en el mes de julio (vacaciones).

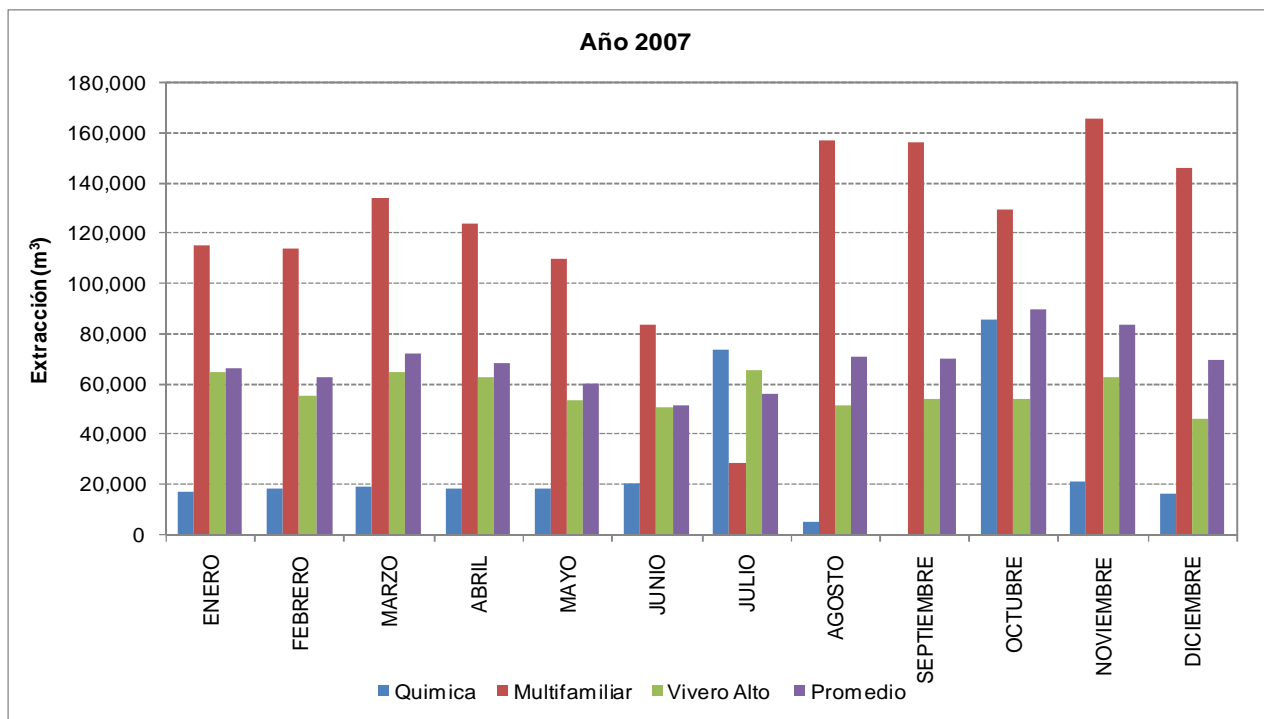


Figura 1.2 Extracción mensual por pozo en el año 2007 (Cortesía PUMAGUA)

Como se mencionó anteriormente la forma de operar los pozos no es homogénea, por lo cual se realizaron análisis estacionales aleatorios para definir el suministro, en la Figura 1.3

se presenta la extracción para dos meses de 2008 (marzo y julio) de los pozos Multifamiliar y Vivero Alto; observándose una modificación en la operación de los pozos debido a la instalación de un bypass en la Facultad de Química, lo que ha permitido que dicho pozo no tenga que operar todos los días y por lo tanto se pueda mantener de reserva (para cuando se da mantenimiento a alguno de los 2 pozos principales); por otro lado, las derivaciones directas a la red apoyan al sistema en la temporada de mantenimiento a los tanques de almacenamiento.

Actualmente, en promedio la extracción es de 120 l/s al día; el sistema de pozos opera generalmente de la siguiente manera: (a) el suministro en la Zona Cultural se obtiene directamente del pozo Vivero Alto, el agua restante se bombea al Tanque Vivero Alto; a lo largo de la tubería que une estos dos componentes se tienen algunas derivaciones directas hacia la red; (b) en Ciudad Universitaria se abastece del Tanque alto, el cual a su vez recibe el agua del pozo multifamiliar, (c) algunos días del mes se utiliza el pozo de Química (para evitar inactividad en éste y posible contaminación), se envía agua al Tanque Bajo, de ahí se encuentra un sistema de rebombeo el cual manda el agua hacia el Tanque Alto; además, se tiene una derivación directa a la red.

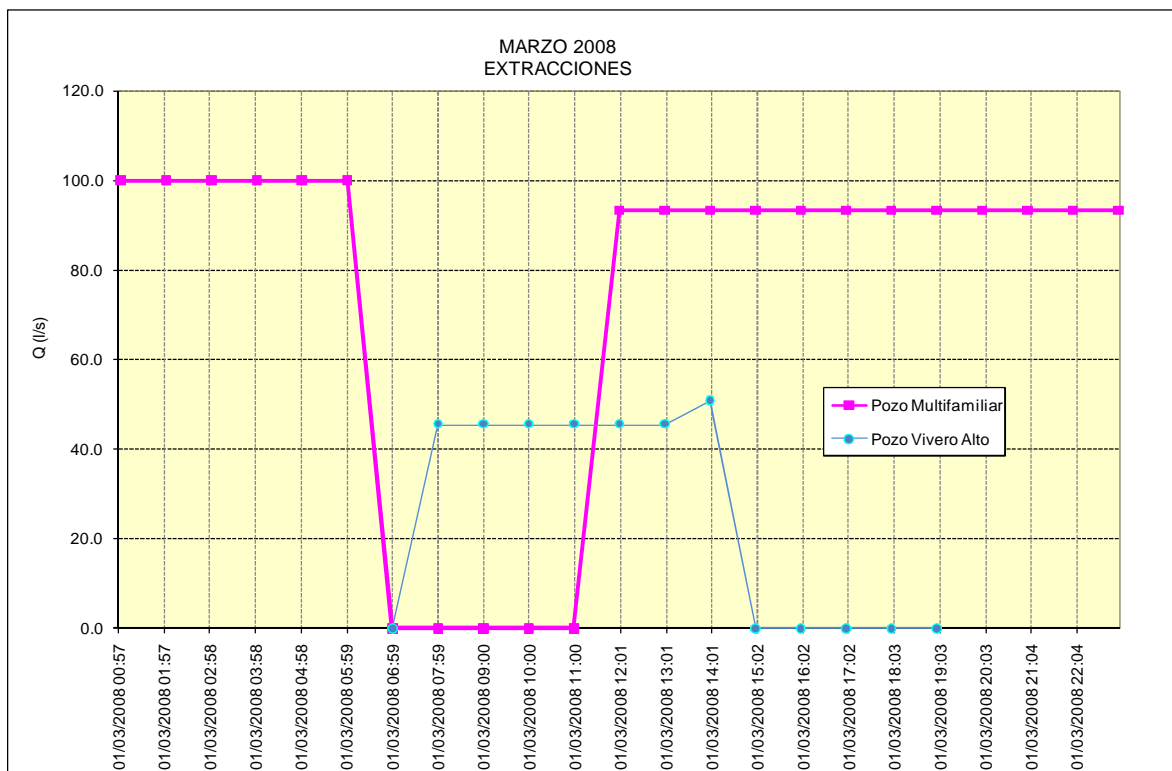
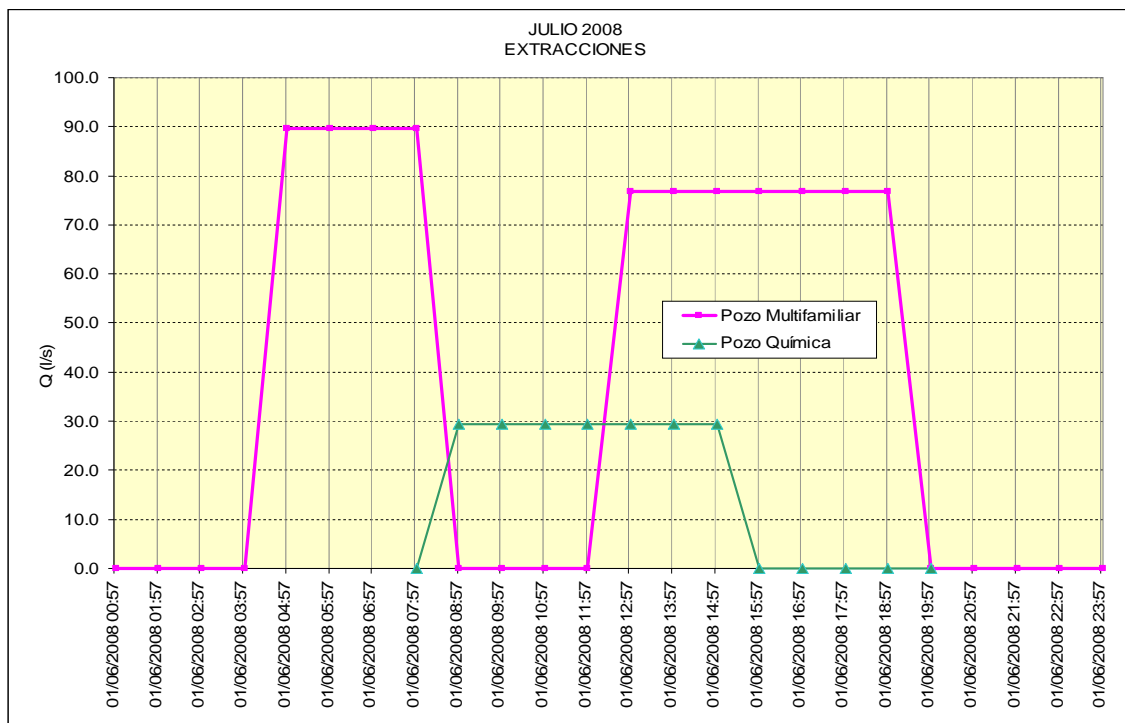


Figura 1.3a Extracción en los pozos Vivero Alto y Multifamiliar (Marzo 2008)



Extracción en los pozos Química y Multifamiliar (Julio 2008)

Figura 1.3b Operación de los pozos en diferentes meses del año (Cortesía PUMAGUA)

En las políticas de operación actuales no se considera el consumo de la energía eléctrica y más aún el costo que implica operar el sistema en las horas pico, por lo anterior, se calculó el costo de la electricidad en un día en el que funcionaron todos los equipos de bombeo, esto es, los tres pozos y el rebombeo que se encuentra ubicado en el Tanque Bajo. Se tomó la tarifa horaria HM que establece la Comisión Federal de Electricidad para la región central de México y definida por horario base, intermedio y punta.

En la Figura 1.4 se muestran los costos de energía más elevados cuando los equipos funcionan en el horario de punta, tomando en cuenta la tarifa HM, (de 18 a 22 h); lo cual, no implica que sean aquellas horas en donde se presente la máxima extracción; bajo este esquema de operación el costo total de la energía utilizada sería de \$9,797.34 pesos por un día, de \$293,920.14 al mes y de \$3,576,028.39 al año.

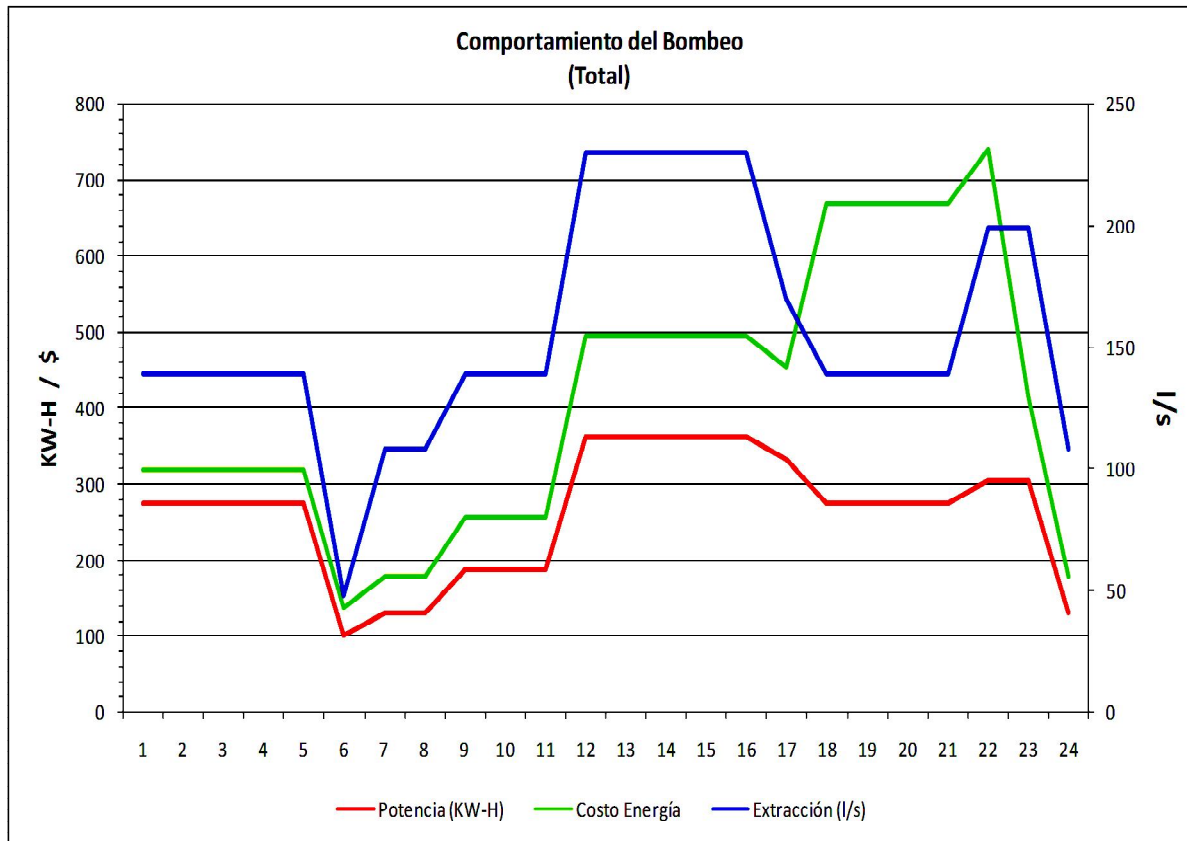


Figura 1.4 Consumo de energía en el equipo de bombeo y costos (Cortesía PUMAGUA)

El paro y arranque de los pozos se hace de manera manual y está en función de los niveles mínimos que se manejan en los tanques de almacenamiento, lo cual es criterio del operador en turno (ya que actualmente esta actividad se realiza manualmente), lo anterior implica que algunas veces si existe una disminución constante del nivel en los tanques; por ejemplo, debido a una fuga en la red principal, la operación del pozo es permanente, el operador deja funcionando las bombas sin evaluar si existe un desperfecto en el sistema de distribución de agua, además sin tener en cuenta el horario y el consumo de energía.

1.3 TANQUES DE ALMACENAMIENTO

El sistema de distribución de agua potable consta de tres tanques de almacenamiento: Tanque Bajo, Tanque Alto, y Tanque Vivero Alto. En total el sistema tiene una capacidad de almacenamiento de 12,000 m³, estos tanques son abastecidos por los pozos Química, Multifamiliar y Vivero Alto respectivamente, la Tabla 1.3 se muestra las características de los tanques y la capacidad de cada uno de ellos.

Tanque	Ancho (m)	Largo (m)	Altura (m)	Capacidad (m ³)
Bajo	23	29	3	2,000
Alto	25	40	4	4,000
Vivero Alto (4)	20	25	3	6,000

Tabla 1.3 Características generales de los tanques en Ciudad Universitaria (Cortesía PUMAGUA)

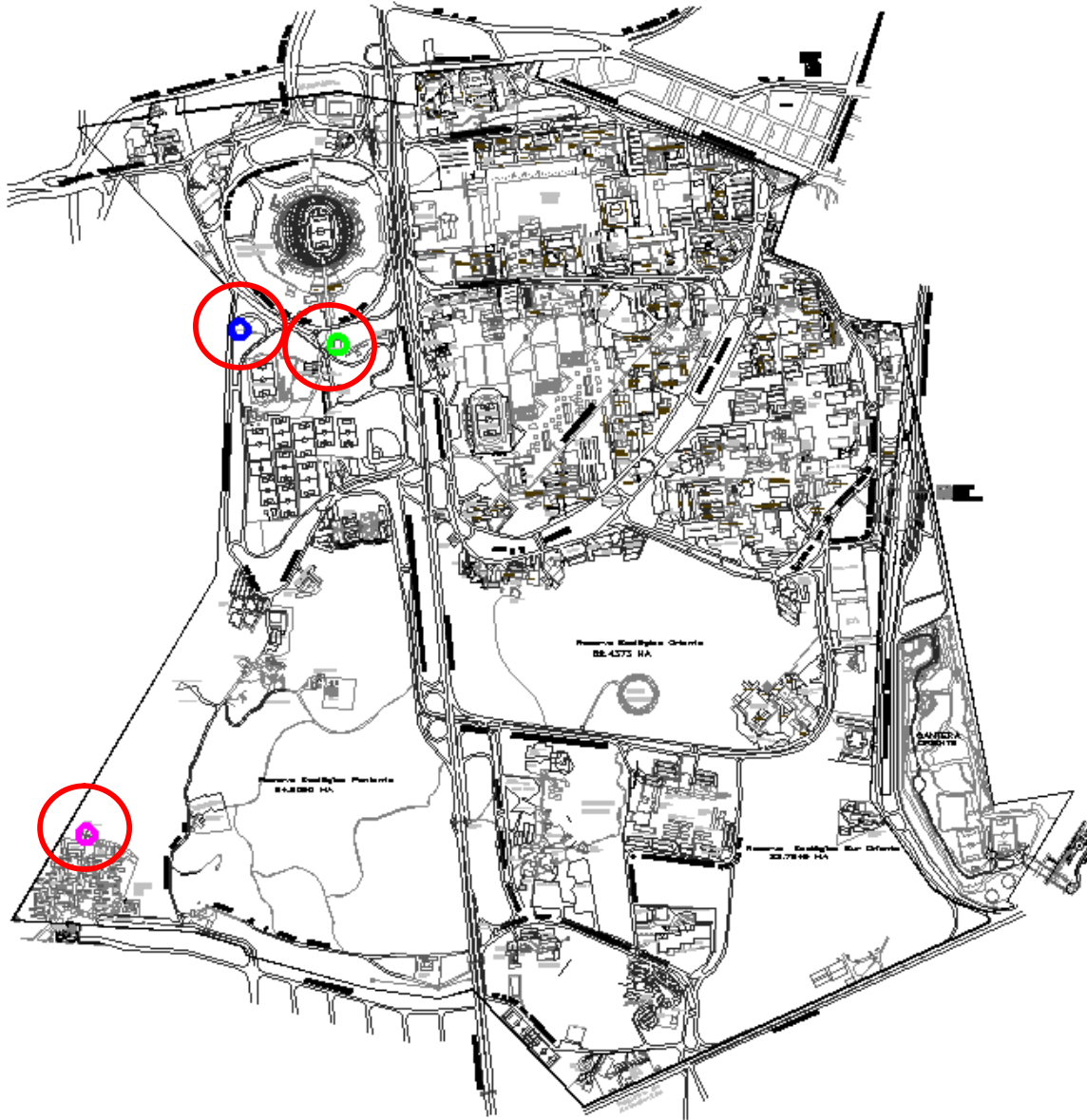


Figura 1.5 Localización de los tanques en Ciudad Universitaria (Cortesía PUMAGUA)

El tanque Bajo es abastecido por el pozo de Química y su función es apoyar al tanque Alto (mediante un equipo de rebombeo); esto cuando el pozo Multifamiliar esta en mantenimiento. El tanque Alto es abastecido por el pozo Multifamiliar y cuando está en mantenimiento también lo puede apoyar el Tanque Vivero Alto. El Tanque Vivero Alto se

alimenta del pozo Vivero Alto; este tanque está formado por cuatro tanques pequeños que se comunican entre si.



Figura 1.6 Tanques de almacenamiento en Ciudad Universitaria (Cortesía PUMAGUA)

El mantenimiento de los tanques se realiza dos veces por año, en periodo vacacional; consiste en lavarlos, pintarlos y monitorear la calidad del agua. Se lleva un registro de forma manual de los niveles en los mismos, el cual radica en tomar la lectura visualmente, con ayuda de una regleta que está pintada en el interior del tanque y que tiene una precisión de 5 cm, esto es cada hora durante todos los días del año (ver Tabla 1.4). Con la información histórica proporcionada por la Coordinación de Conservación, que implicó la digitalización de los registros, se realizó un análisis de los niveles en los tanques para determinar su funcionamiento y a la vez la demanda que en éstos se presenta. Esta investigación indica, por un lado, el consumo nocturno que se presenta en Ciudad Universitaria y por otro, el consumo aproximado durante el día; pudiendo detectarse fugas de gran caudal en la red.

Tabla 1.4 Registro del funcionamiento del pozo y tanque Vivero Alto (Cortesía PUMAGUA)

FECHA	MARTES 1	DE ENERO DE 2008
HORA	NIVEL EN METROS	M3 DE AGUA EN EL TANQUE
01:00	-	-
02:00	-	-
03:00	-	-
04:00	-	-
05:00	-	-
06:00	-	-
07:00	2.5	779998
08:00	2.5	780061
09:00	2.55	780233
10:00	2.6	780405
11:00	2.65	780577
12:00	2.7	780749
13:00	2.75	780921
14:00	2.8	781093
15:00	2.85	781264
16:00	2.9	781435
17:00	2.95	781606
18:00	3	781632
19:00	-	-
20:00	-	-
21:00	-	-
22:00	-	-
23:00	-	-
00:00	-	-

En la tabla 1.4 se observa la variación del nivel en el Tanque Vivero Alto (TVA) para un día de operación, se presenta un abatimiento (disminución de nivel) de 50 cm durante la noche, obteniendo así un consumo nocturno para la Zona Cultural de 20.2 l/s. En el Tanque Alto (TA), cuando el nivel de agua baja de la cota 3.0 m se activa el pozo Multifamiliar lo que permite restablecer el nivel en el tanque y abastecer la demanda nocturna de la parte central de CU, que en promedio es de 38.6 l/s. En total, el gasto nocturno que se obtiene es de 58.8 l/s, el cual corresponde a un mínimo consumo por instalaciones como laboratorios y pequeños usuarios, la gran mayoría sugiere fugas en la red.

Es importante comentar, que los registros históricos deben tomarse con reserva pues existen algunos errores de apreciación en las lecturas de los niveles en los tanques así como también en la lectura de los medidores de los pozos; por otro lado es indispensable medir aquellas derivaciones directas a la red de distribución que se encuentran ubicadas sobre las líneas que conducen de los pozos a los tanques.

1.4 RED DE DISTRIBUCIÓN

La red de distribución de agua potable de Ciudad Universitaria tiene una longitud aproximada de 54 Km. y consta de tuberías compuestas por diversos materiales: acero, asbesto, fierro fundido, PVC y PEAD (Figura 1.7), las tuberías de acero tienen 54 años de antigüedad. La red está dividida en diámetros comerciales de 1, 1 ½, 2, 2 ½ pulgadas para algunas derivaciones hacia los edificios y tomas de riego, en su mayoría se cuenta para éstas con diámetros entre 3 y 6 pulgadas; en las líneas de conducción primaria se presentan diámetros de 3 a 8 pulgadas y para las líneas de conducción, que van de los pozos a los tanques, existen diámetros de 10 y 12 pulgadas; sólo hay una línea de 20 pulgadas que va del tanque Vivero Alto a la red de distribución de la Zona Cultural (Figura 1.8). En la figura 1.10 se muestran los porcentajes de diámetros utilizados en la red.

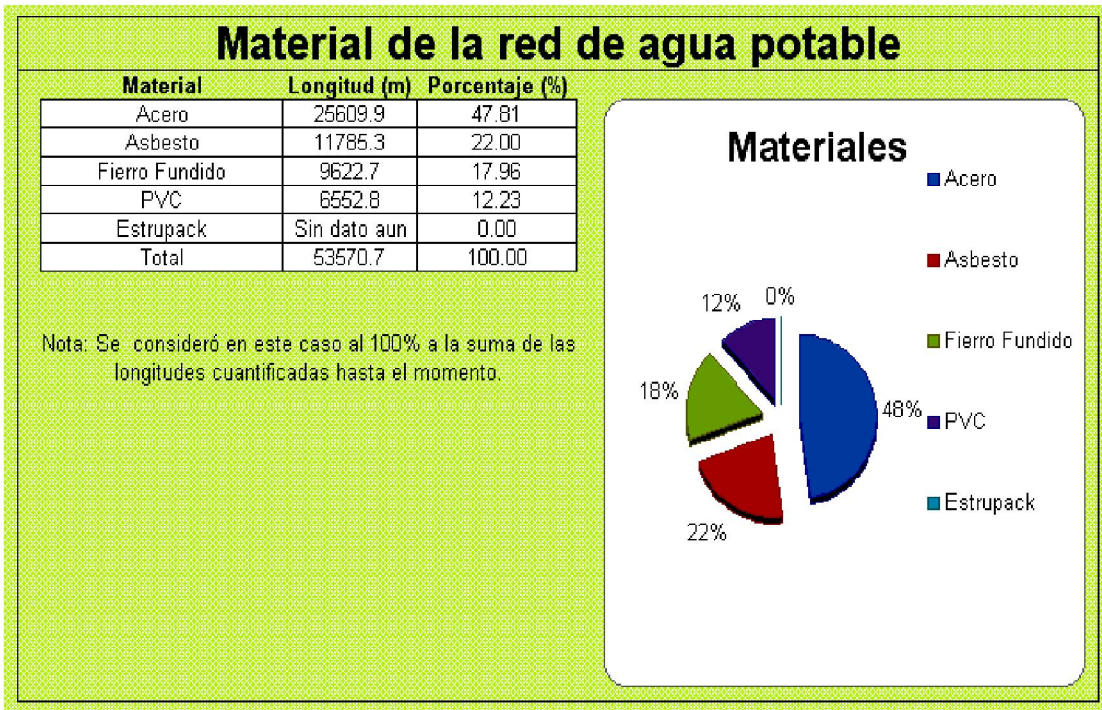


Figura 1.7 Porcentaje de los diferentes materiales de la red de distribución (Cortesía PUMAGUA)



Figura 1.8 Distribución de la red de tuberías en Ciudad Universitaria (Cortesía PUMAGUA)

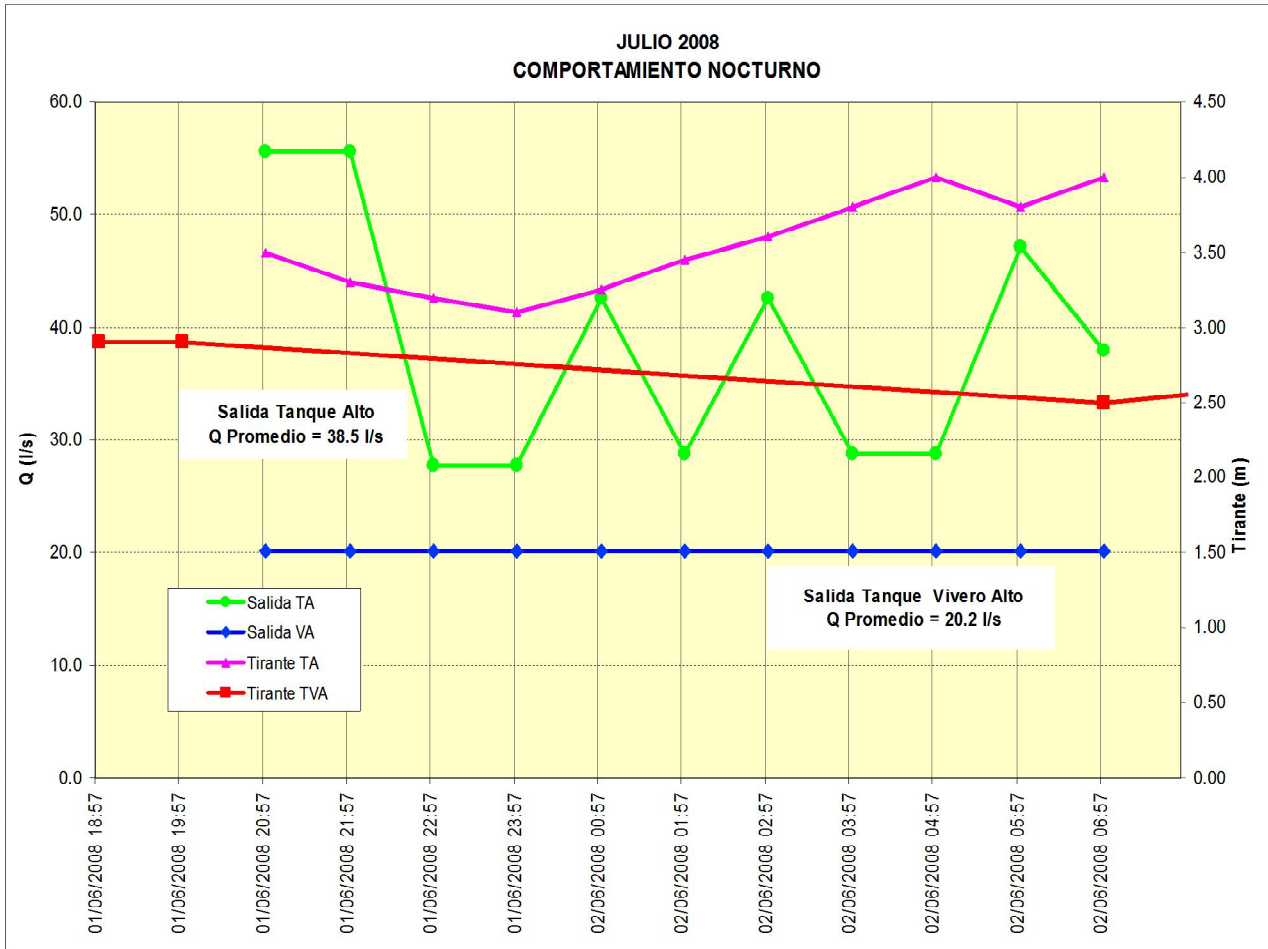


Figura 1.9 Tanques de almacenamiento en Ciudad Universitaria (Cortesía PUMAGUA)

La población que se debe abastecer en Ciudad Universitaria es de 132,000 usuarios, los cuales se clasifican en personal académico, personal administrativo, estudiantes y Multifamiliar de maestros (vivienda). Atendiendo al manual de diseño de la CONAGUA, el consumo para esta población es en promedio de 38 l/s, es decir, 3,262 m³/día. Otro aspecto importante de la red de distribución es el riego de áreas verdes, actualmente se riegan 120 Ha con agua potable, se considera que esta demanda es aproximadamente de 23 l/s.

Los datos anteriores deben tomarse con reserva ya que no existe actualmente un sistema de micromedición en CU, se cuenta con datos medidos de extracciones, caudal de agua tratada y niveles en los tanques, y éstos a su vez tienen cierto grado de error por el sistema de lectura ya comentado; por lo anterior, es imperativo instrumentar la red mediante un

sistema de macro y micro medición. Actualmente se tienen instalados 36 medidores de propela, los cuales, en su mayoría no funcionan por falta mantenimiento; al inicio de este proyecto se detectaron en funcionamiento 3 medidores, los mismos que han sido permanentemente monitoreados.

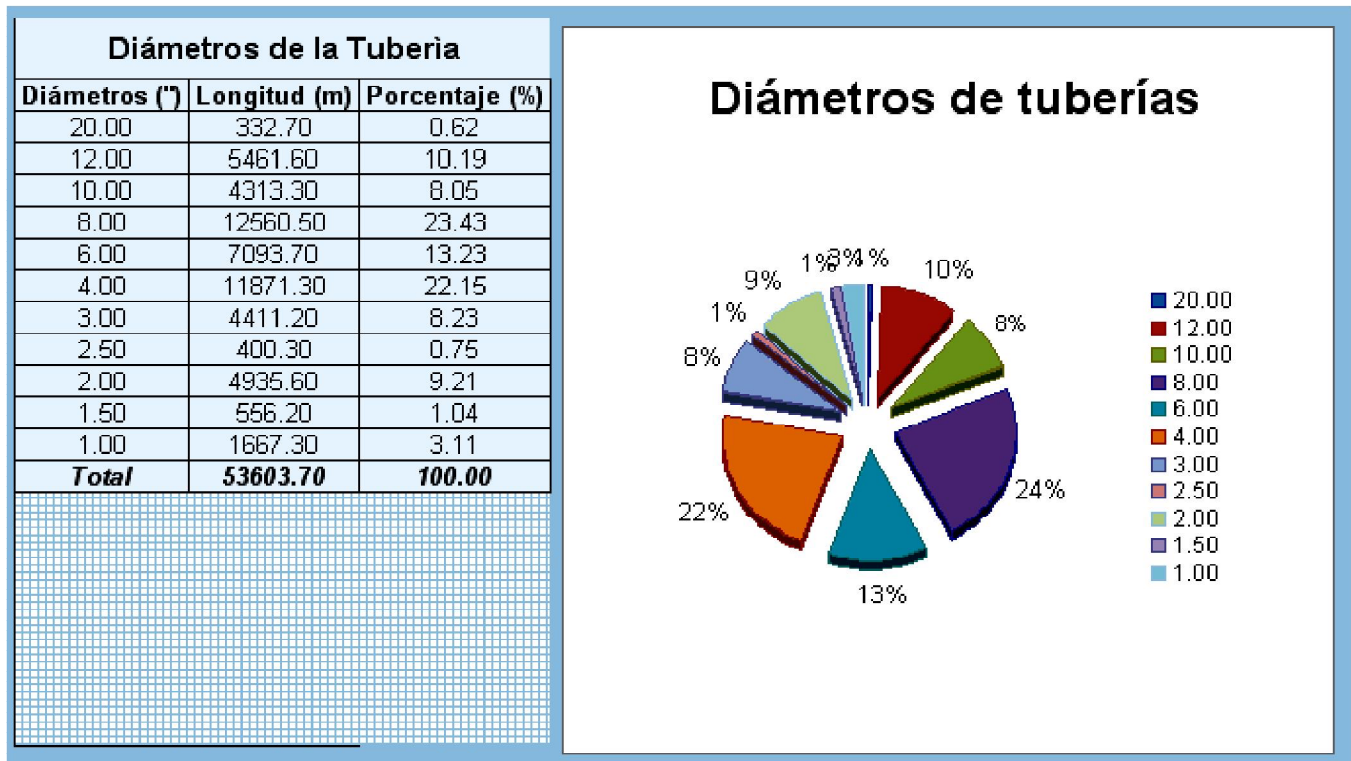


Figura 1.10 Porcentaje de los diámetros que comprende la red de distribución (Cortesía PUMAGUA)

En la Figura 1.8 se muestra la configuración actual de la red, la cual se tuvo que digitalizar en Auto CAD del plano original que manejan los operadores de la red; cabe mencionar, que este plano data de 1989, y aunque no siempre se hace, debe corregirse con verificaciones en campo. Lo anterior se debe a que a lo largo de los años se ha modificado la red debido a la construcción de edificios en las diferentes Facultades, Institutos, Centros y Escuelas; los cuales no son notificados a la Dirección General de Obras y Conservación. Las correcciones se hacen en las líneas principales (ubicación y materiales), ubicación de cruceros y su numeración, válvulas y manómetros nuevos, derivaciones y cancelaciones de líneas deterioradas.

El operador de la red es la Dirección General de Obras y Conservación por medio de la Coordinación de Conservación y el Taller de Agua Potable cuya función es operar los pozos y tanques, darle mantenimiento a la red y reparar fugas en red principal. Actualmente tienen un programa de instalación de manómetros, sustitución de válvulas de seccionamiento que están deterioradas y detección de fugas en red principal. Cabe señalar que este taller cuenta con un equipo de 13 personas. En ocasiones el Taller de Conservación realiza reparaciones en red secundaria o en el interior de edificios y esto se debe a que los encargados del mantenimiento en las propias instituciones no conocen las instalaciones y registros que controlan el suministro a las mismas o bien no cuentan con el personal capacitado para llevar a cabo estas actividades.

El Taller de Conservación, actualmente, no cuenta con el equipo suficiente y adecuado para realizar las reparaciones en la red; por ejemplo, herramientas para hacer cortes y soldar, además de que el personal no tiene equipo de seguridad. Con respecto a las fugas, no tienen equipo para su detección, posteriormente se explicarán los métodos de detección y reparación de las mismas.

Se ha considerado imperativo adoptar medidas concretas para lograr el uso y manejo eficiente del agua en todo el Campus, sin embargo antes de proponer y realizar cambios y mejoras en las políticas de un sistema de distribución de agua potable es necesario conocer su funcionamiento actual, es por eso que se simuló el sistema de distribución de agua tal como está actualmente y con esto tener un diagnóstico de su situación.

Capítulo 2. EL MODELO DEL SISTEMA

EPANET es un programa para PC que realiza simulaciones en periodo extendido del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de distribución a presión. En general una red consta de tuberías, nodos (conexiones entre tuberías), bombas, válvulas y tanques de almacenamiento o depósitos. EPANET determina el caudal que circula por cada una de las conducciones, la presión en cada uno de los nodos, el nivel de agua en cada tanque y la concentración de diferentes componentes químicos a través de la red durante un determinado periodo de tiempo.

2.1 Componentes físicos

El modelo hidráulico desarrollado contiene varios tipos de objetos cada uno con sus propias características. EPANET modela un sistema de distribución de agua como una serie de líneas conectadas a nodos. Las líneas representan tuberías, bombas, válvulas. Los nodos representan conexiones, tanques y depósitos

2.1.1 Conexiones

Las conexiones son puntos de la red donde se unen las líneas o por donde entra y sale el agua de la red. La información básica que se requiere para las conexiones es:

- Cota, normalmente sobre el nivel del mar
- Demanda de agua (régimen de evacuación desde la red)

Los resultados que se obtienen de las conexiones a lo largo de toda la simulación son:

- Altura piezométrica (energía interna por unidad de masa del fluido)
- Presión
- Calidad de agua

Además las conexiones pueden:

- Tener una demanda que varíe con el tiempo.
- Contener emisores o aspersores haciendo que el caudal descargado dependa de la presión.

2.1.2 Depósitos

Los depósitos son nodos que representan una fuente infinita o un sumidero para el sistema.

La principal característica de un depósito es su altura, que es la altura por encima del nivel del mar. Ya que un depósito es un punto frontera de la red sus características no se ven afectadas por lo que ocurra en el resto del sistema, sin embargo podemos variar su altura con el tiempo.

2.1.3 Tanques

Los tanques son nodos con capacidad de almacenamiento, donde el volumen de agua almacenada puede variar con el tiempo a lo largo de la simulación. Las características principales para los tanques son:

- Cota, (donde el nivel de agua es cero)
- Diámetro
- Valores iniciales máximos y mínimos del nivel de agua

Los principales valores que se piden a lo largo del tiempo son:

- Nivel de la superficie libre de agua.

Los tanques operan siendo limitados por sus valores máximo y mínimo. EPANET detiene el aporte de caudal si el nivel del tanque está al mínimo y detiene el consumo de caudal si el nivel del tanque se encuentra en su máximo.

2.1.4 Emisores

Los emisores son dispositivos asociados con los nodos que modelan el flujo a través de una boquilla o un orificio que descarga a la atmósfera. La tasa de flujo a través del emisor varía como función de la presión disponible en el nodo:

$$q=Cp^\gamma \quad (1)$$

Donde q = caudal (l/s), p = presión (bar), C = coeficiente de descarga (caudal/presión) y γ = exponente de presión (generalmente es 0.5).

Normalmente los emisores son usados para simular aspersores en un sistema de irrigación pero en este caso un emisor se usa para simular fugas en una unión.

2.1.5 Tuberías

Las tuberías son líneas que llevan el agua de un punto de la red a otro. EPANET asume que todas las tuberías encuentran completamente llenas en todo momento. La dirección de caudal va desde el extremo con altura piezométrica (energía interna por unidad de peso de agua) mayor hacia el extremo de la conducción con menor altura siguiendo siempre el destino de la conducción con menor altura. Los parámetros hidráulicos más importantes para las tuberías son:

- Nodos de entrada y salida
- Diámetro
- Longitud
- Coeficiente de rugosidad (para determinar pérdidas)
- Estado del nodo (abierto, cerrado o con una válvula).

Los resultados que podemos obtener son:

- Caudal
- Velocidad
- Pérdidas.

Las pérdidas de carga en la conducción debido a la rugosidad de las paredes de la tubería pueden medirse utilizando tres métodos diferentes:

- Método de Hazen – Williams.
- Método de Darcy – Weisbach.
- Método de Chezy – Manning.

Hazen – Williams es el método que se usa en este caso y es la fórmula que más se utiliza para medir la pérdida de carga de un flujo en un tubo debido a la fricción, dicha fórmula no puede ser usada para un líquido diferente al agua y fue desarrollada originalmente solo para flujo turbulento.

Cada método utiliza la siguiente ecuación para medir la pérdida de carga entre el nodo final y el inicial en un tubo:

$$h_L = Aq^B \quad (2)$$

Donde h_L = pérdida de carga (m)

q = velocidad de flujo (l/s)

A = coeficiente de resistencia

B = exponente del flujo.

Fórmulas de Pérdida de Carga para tubería llena:

Tabla 2.1 Coeficientes de resistencia

Fórmula	Coeficiente de Resistencia (A)	Expon. Caudal (B)
Hazen-Williams	$10.674C^{-1.852}d^{-4.871}L$	1.85
Darcy-Weisbach	$0.0827fd^{-5}L$	2
Chezy-Manning	$10.294n^2d^{-5.33}L$	2

Donde: C = Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams

f = Factor de fricción

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

d = Diámetro de la tubería (m)

L = Longitud de la tubería (m)

Los valores necesarios del coeficiente de rugosidad de Hazen – Williams para los materiales usados en la red de tubos se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 2.2 Coeficientes de rugosidad según el material

Material	C Hazen-Williams
Fundición	130 – 140
Hormigón	120 – 140
Hierro Galvanizado	120
Plástico	140 – 150
Acero	140 – 150
Cerámica	110

2.1.6 Método de resolución

Planteando la distribución de agua como el transporte de agua desde el punto de almacenamiento hasta la llegada a los distintos sectores donde se requiere la demanda (facultades, institutos, etc.). Este transporte se efectúa mediante tuberías donde el agua ocupa toda la sección y circula con un determinado gradiente de presión. Si asumimos que en un abastecimiento el flujo se considera incompresible, ya que es agua, y que va a circular con movimiento permanente tenemos que diferenciar dos posibles regímenes de movimiento dentro de las tuberías mediante el número de Reynolds definido por la ecuación:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (3)$$

Donde Re: número de Reynolds (adimensional), v : velocidad media (m/s), ν : viscosidad cinemática del líquido en servicio (m^2 / s), D: diámetro de la tubería (m).

De esta manera diferenciamos entre:

- Régimen Laminar ($Re < 2000$).
- Régimen Turbulento ($Re > 4000$).

En la mayoría de abastecimientos de agua se trabaja con régimen turbulento ya que el valor del número de Reynolds usualmente está entre:

$$1 \cdot 10^5 < Re < 1 \cdot 10^6 \quad (4)$$

A medida que el agua va circulando se producen pérdidas debidas a la fricción por el interior de los caños. Son las llamadas pérdidas de carga y dependen de la cota (z), velocidad y material de la tubería. El trinomio de Bernoulli (B) como se muestra en la ecuación nos relaciona estos parámetros y nos define la energía mecánica total del fluido que circula por la tubería por unidad de peso en un punto del recorrido en unidades de

longitud. Al tener unidades de longitud es fácilmente representable gráficamente y visualizar la línea de energía.

$$B = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

Supongamos una tubería horizontal de diámetro constante D por la que circula un fluido cuya velocidad media es v. En dos secciones del recorrido (secciones A y B respectivamente) la energía se va a conservar, por lo tanto aplicando el trinomio de Bernoulli a las dos secciones del recorrido solo nos queda como incógnita la pérdida en el tramo AB como se muestra en la ecuación

$$z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2g} = z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{v_B^2}{2g} + I \cdot \Delta L_{AB} \quad (6)$$

Haciendo consideraciones llegamos a la siguiente ecuación:

$$z_A + \frac{P_A}{\gamma} - z_B + \frac{P_B}{\gamma} = I \cdot \Delta L_{AB} \quad (7)$$

De esta manera vemos que para calcular la presión (B) del recorrido necesitamos la presión del primer punto (A), la distancia entre ambas y un nuevo término “ I ” llamado pendiente motriz. “ I “ se define como la pérdida de energía por unidad de peso y unidad de longitud en una conducción, que coincide con el pendiente de la línea de energía de flujo. Así vemos que para conocer las pérdidas de carga tenemos que resolver la parte $I \cdot \Delta L_{AB}$ de la ecuación. La pendiente motriz ” I “ se define como se muestra en la siguiente ecuación:

$$I = \frac{f}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

Para conocer el coeficiente de rozamiento en las paredes de la tubería se necesita conocer el valor f conocido como coeficiente de Darcy-Weisbach, que caracteriza el rozamiento del fluido (agua) con las paredes de la tubería. Para el caso de régimen turbulento, una de las ecuaciones disponibles para obtener el valor es la de Colebrook & White como se anuncia en la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (9)$$

Donde f : coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach, k : rugosidad absoluta (mm), D : diámetro de la tubería (mm) y Re : número de Reynolds.

2.1.7 Pérdidas

2.1.7.1 Pérdidas primarias

El término $I \cdot \Delta L_{AB}$, obtenido de la ecuación de Bernoulli, lo podemos expresar de la siguiente forma:

$$I \cdot \Delta L_{AB} = f \frac{L \cdot v^2}{D \cdot 2g} = h_f \quad (10)$$

El término h_f representa las pérdidas por fricción en tuberías y también lo podemos encontrar en la ecuación de Hazen-Williams expresada de la siguiente manera:

$$h_f = \frac{10.679}{C^{1.852}} \cdot \frac{L}{D^{4.87}} \cdot Q^{1.852} \quad (11)$$

2.1.7.2 Pérdidas secundarias

Estas pérdidas tienen lugar en los cambios de sección y dirección de la corriente, en las contracciones y ensanchamientos, ensanchamientos, codos, diafragmas válvulas de diferentes tipos, etc... Estos elementos producen una perturbación de la corriente que origina remolinos y desprendimientos, que intensifican las pérdidas. Por lo general si la longitud de la tubería es mayor que 1, 000 diámetros el error en que se incurre, despreciando las pérdidas secundarias, es muy pequeño.

Las pérdidas secundarias se pueden calcular por dos métodos usando la ecuación fundamental de pérdidas secundarias:

$$H_{rs} = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (12)$$

Donde H – pérdida de carga secundaria, ζ - coeficiente adimensional de pérdida de carga secundaria, v – velocidad media en la tubería si se trata de un codo o una válvula.

Si se trata de un cambio de sección como contracción o ensanchamiento, suele tomarse la velocidad en la sección menor. Lo correcto en un manual de hidráulica sería indicar el valor de ζ y la velocidad de v que hay que tomar en cada caso.

El coeficiente ζ depende del tipo de accesorio, del número de Reynolds, de la rugosidad y de la configuración de la corriente antes del accesorio. En general antes y después del accesorio en que se produce la pérdida existe una sección de tubería recta al menos de 4 a 5D (D – diámetro de la tubería).

Coeficiente total de pérdidas ζ_t

La ecuación fundamental de las pérdidas secundarias tiene la misma forma que la ecuación de las pérdidas primarias, si se desarrolla esta última

$$\lambda \frac{L}{D} = \zeta \quad (13)$$

En una conducción ordinaria las pérdidas primarias y secundarias suelen suceder unas a otras. Por lo tanto conviene definir el coeficiente total de pérdidas primarias y secundarias, ζ_t .

Si la conducción es de sección constante se utiliza la siguiente ecuación:

$$H_r = \sum H_{rp} + \sum H_{rs} = (\zeta_1 + \zeta_2 + \dots + \zeta_n + \lambda \frac{L}{D}) \frac{v^2}{2g} \quad (14)$$

Donde H_r es la pérdida total y $\zeta_1 + \zeta_2 + \dots + \zeta_n$ son los coeficientes de los distintos accesorios.

Finalmente

$$H_r = \zeta_t \frac{v^2}{2g} \quad (15)$$

Donde

$$\zeta_t = \zeta_1 + \zeta_2 + \dots + \zeta_n + \lambda \frac{L}{D} \quad (16)$$

ζ_t es el coeficiente total de pérdidas.

Si la conducción no es de sección constante se produce análogamente, pero utilizando además la ecuación de continuidad, resultando:

$$\zeta = \left[\zeta_1 + \lambda_1 \frac{L_1}{D_1} + \left(\zeta_2 + \lambda_2 \frac{L_2}{D_2} \right) \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 + \left(\zeta_3 + \lambda_3 \frac{L_3}{D_3} \right) \left(\frac{D_1}{D_3} \right)^2 + \dots \right] \frac{v_1^2}{2g} \quad (17)$$

El método utilizado por EPANET para resolver las ecuaciones de continuidad y de pérdidas que caracterizan el estado hidráulico de una red de abastecimiento en un punto dado en el

tiempo puede llevarse a un término con una aproximación híbrida nudo-malla conocida como “Método del Gradiente”.

Suponiendo que tenemos un sistema de tuberías con N conexiones nudo y NF nudos fijos (tanques y depósitos). Nos permitimos expresar la relación pérdidas-caudal en la tubería entre los nudos i y j de la siguiente forma:

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \quad (18)$$

Donde H = altura en el nodo, h =pérdidas, r =coeficiente de resistencia, Q =caudal, n =exponente del caudal, y m =coeficiente de pérdidas menores. El valor del coeficiente de pérdidas dependerá de la ecuación de pérdidas utilizada. Para las bombas, las pérdidas pueden representarse con la siguiente ley:

$$h_{ij} = -\omega^2 (h_0 - r(Q_{ij} / \omega)^n) \quad (19)$$

Donde h_0 es la altura de corte para la bomba, ω es la velocidad relativa, y r y n son los coeficientes de la curva característica. El segundo conjunto de ecuaciones que debemos satisfacer son las ecuaciones de continuidad para todos los nudos:

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \quad \text{para } i=1, \dots, N. \quad (20)$$

Donde D_i es la demanda del caudal en el nudo i y por el convenio, el caudal entrante en un nudo es positivo. Para un conjunto de alturas conocidas en los nudos fijos, buscaremos una solución en para todas las alturas H_i y caudales Q_{ij} que satisfagan las ecuaciones (18) y (20).

La solución del método del gradiente comienza con un valor estimado inicial de caudales en cada tubería que no tiene porque satisfacer las ecuaciones de continuidad. En cada

iteración del método, se encontrarán nuevas alturas en los nodos resolviendo la ecuación matricial:

$$\mathbf{AH}=\mathbf{F} \quad (21)$$

Donde \mathbf{A} = matriz Jacobiana (NXN), \mathbf{H} = vector de las alturas incógnita en los nodos (NX1), y \mathbf{F} = vector de los términos del lado derecho de la igualdad (NX1).

Los elementos en la diagonal principal de la matriz Jacobiana son:

$$A_{ij} = \sum_j p_{ij} \quad (22)$$

Mientras que los términos fuera de la diagonal, no negativos, son:

$$A_{ij} = -p_{ij} \quad (23)$$

Donde p_{ij} es la inversa de la derivada parcial con respecto del caudal de las pérdidas en la línea entre los nodos i y j. Para las tuberías,

$$p_{ij} = \frac{1}{nr|Q_{ij}|^{n-1} + 2m|Q_{ij}|} \quad (24)$$

Mientras que para las bombas:

$$p_{ij} = \frac{1}{n\omega^2 r(Q_{ij} / \omega)^{n-1}} \quad (25)$$

Cada término del lado derecho de la igualdad consiste en el desequilibrio del caudal neto en el nudo más un factor de corrección del caudal: a cualquier línea que une un nodo i a un nudo fijo y el factor de corrección de caudal y_{ij} es:

$$F_i = \left(\sum_j Q_{ij} - D_i \right) + \sum_j y_{ij} + \sum_f p_{if} H_f \quad (26)$$

Donde los últimos términos los aplicamos a cualquier línea que une un nodo i a un nudo fijo y el factor de corrección de caudal y_{ij} es:

$$y_{ij} = p_{ij} (r |Q_{ij}|^n + m |Q_{ij}|^2) \text{sgn}(Q_{ij}) \quad (27)$$

Para tuberías

$$y_{ij} = -p_{ij} \omega^2 (h_0 - r(Q_{ij} / \omega)^n) \quad (28)$$

Y para bombas, donde el $\text{sgn}(x)$ es 1 si $x > 0$ y -1 en caso contrario. (Q_{ij} siempre es positivo para las bombas.)

Después de que las nuevas alturas son calculadas resolviendo la ecuación (6), los nuevos caudales se encuentran con:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - (y_{ij} - p_{ij} (H_i - H_j)) \quad (29)$$

Si la diferencia entre la suma de los caudales absolutos y el caudal total en todas las líneas es mayor que alguna tolerancia (por ejemplo, 0.001), entonces las ecuaciones (21) y (29) se resuelven una vez más. La ecuación de actualización de caudal (29) siempre cumple con la continuidad alrededor de cada nudo después de la primera iteración.

Después de que una solución es encontrada en el actual intervalo de tiempo, el intervalo de tiempo para la siguiente solución es el menor de los siguientes:

- tiempo hasta que un nuevo intervalo de demandas empiece,
- el menor tiempo para que un tanque se llene o se vacíe,
- el menor tiempo hasta que el nivel de un tanque alcance el punto que provoca un cambio de estado de alguna línea (es decir, abre o cierra una bomba) como se estipula en un control simple,
- el siguiente momento hasta que un control simple de tiempo en una línea se active,
- el siguiente momento al cual un control programado causa un cambio de estado en algún lugar del sistema.

El tiempo avanza al siguiente intervalo de cálculo, se encuentran nuevas demandas, los niveles de los tanques se ajustan en función de la solución actual de caudales, y los controles de las líneas cambian de estado.

Empieza un nuevo conjunto de iteraciones con las ecuaciones (21) y (29) y el conjunto de caudales actuales.

2.1.8 Bombas

Las bombas son elementos que aportan energía al fluido incrementando su altura piezométrica. Las características principales para una bomba son su entrada, su salida y su curva característica (relación entre altura y caudal de la bomba).

Los parámetros de salida más importantes son el caudal y la carga. El caudal fluye unidireccionalmente dentro de la bomba y EPANET no permite que una bomba trabaje fuera del rango que determina su curva característica.

Al igual que las tuberías, las bombas pueden activarse o desactivarse en determinados momentos establecidos por el usuario o bien cuando existan ciertas condiciones en la red. El modo de operación de la bomba puede describirse asignándole un patrón de tiempo.

2.1.9 Válvulas

En EPANET las válvulas son representadas como líneas, estas limitan el caudal y la presión en puntos específicos de la red. Sus principales parámetros son:

- Nodo de entrada y salida
- Diámetro
- Estado (abierto o cerrado).

Los valores de salida suelen ser caudal y pérdidas.

2.2 Componentes no físicos

Además de los componentes físicos EPANET utiliza tres tipos de objetos informativos – curvas, patrones y controles - que describen el comportamiento y los aspectos operacionales de un sistema de distribución.

2.2.1 Curvas

Las curvas son objetos que representan la relación existente entre pares de datos por medio de dos magnitudes o cantidades. Dos o más objetos pueden formar parte de una misma curva. Un modelo de EPANET puede utilizar los siguientes tipos de curvas:

- Curva característica de una bomba
- Curva de rendimiento

- Curva de volumen
- Curva de pérdidas.

Curva característica de una bomba

La curva característica representa la relación entre la altura y el caudal que puede desarrollar a su velocidad nominal. La altura es la energía que la bomba aporta al agua y se representa en el eje vertical (Y) en metros. El caudal se representa en el eje horizontal (X) en unidades de caudal. Una curva característica válida debe disminuir la altura a medida que aumenta el caudal.

La siguiente gráfica representa al rebombeo del tanque bajo al tanque alto

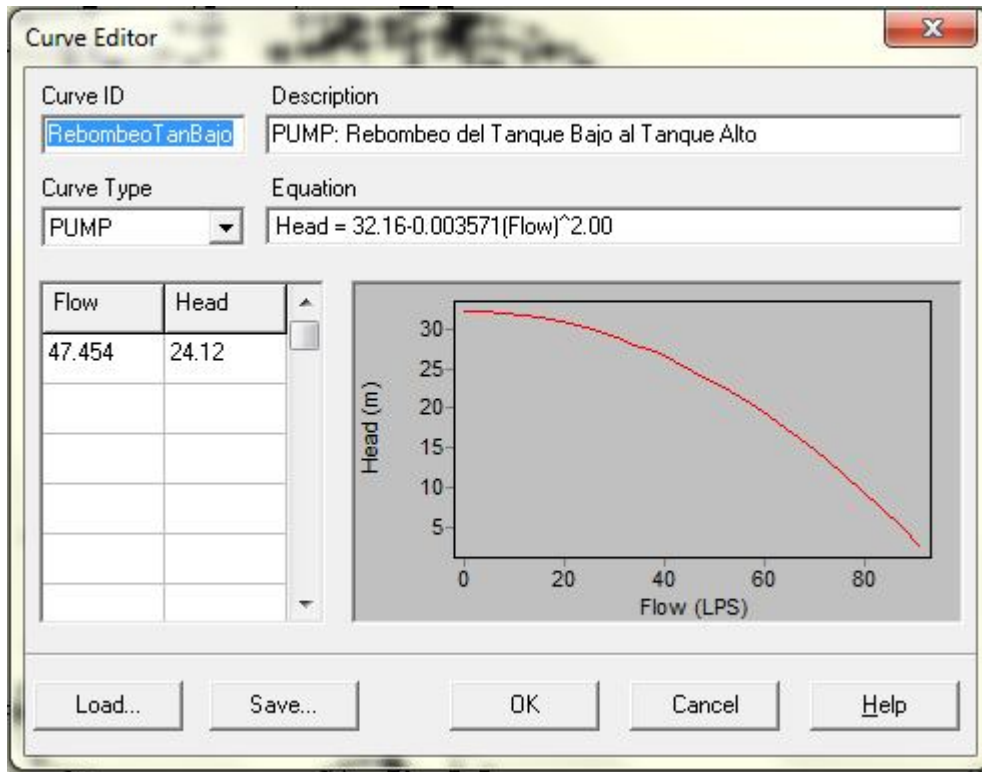


Figura 2.1 Curva del rebombeo del tanque bajo al tanque alto

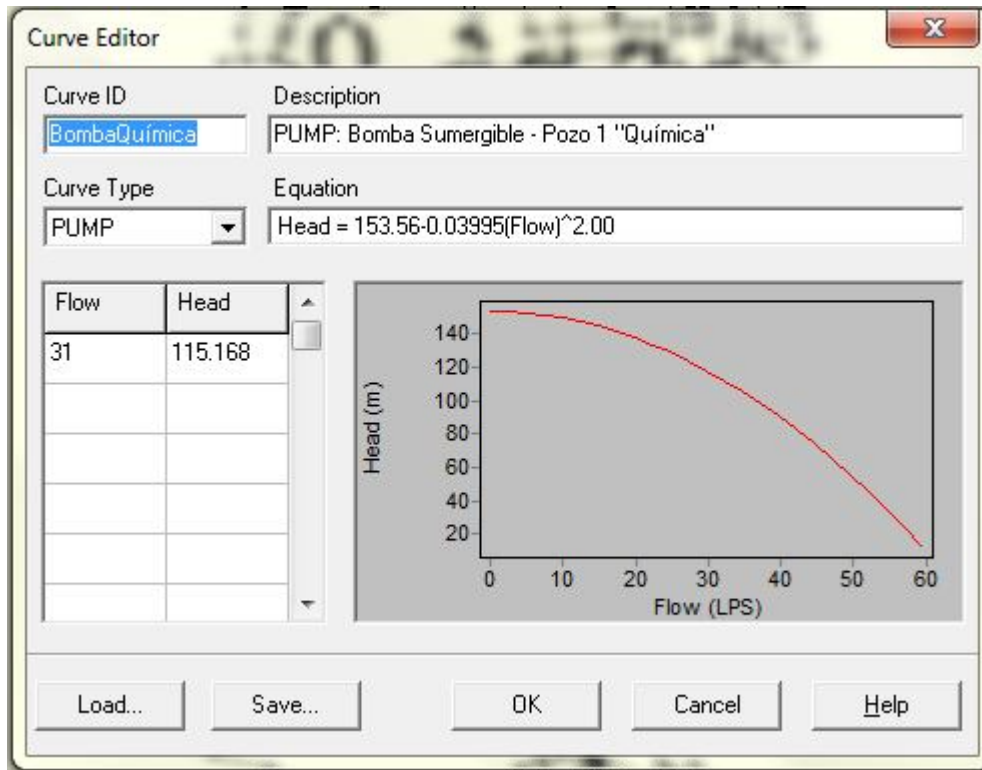


Figura 2.2 Curva de la bomba del pozo de química

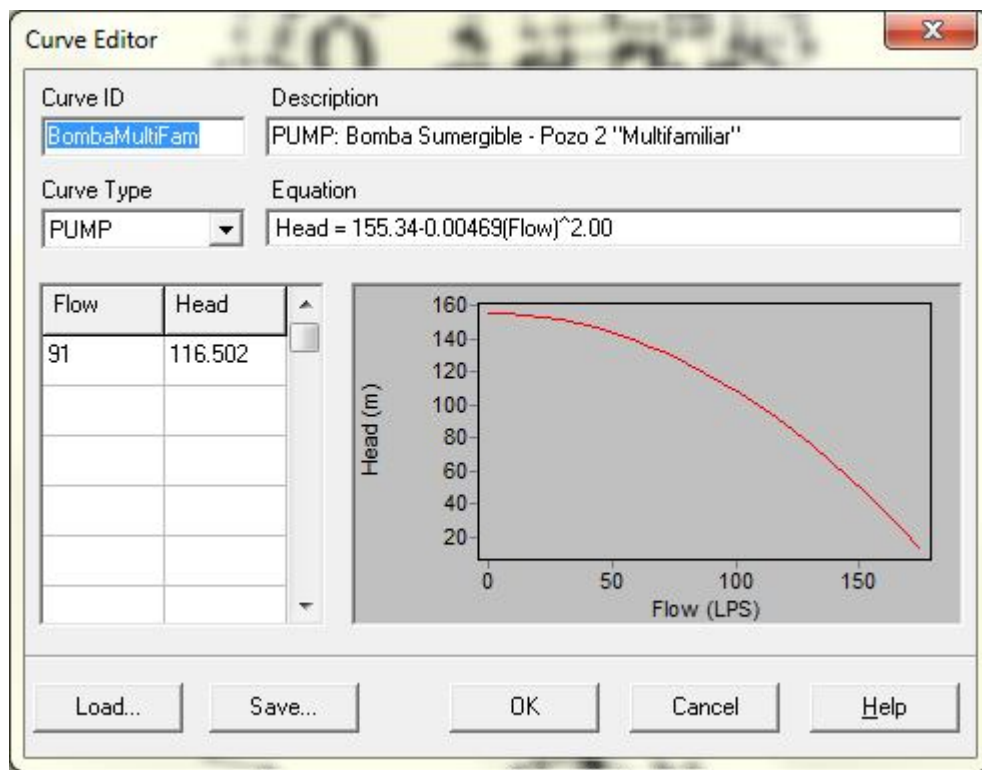


Figura 2.3 Curva de la bomba multifamiliar

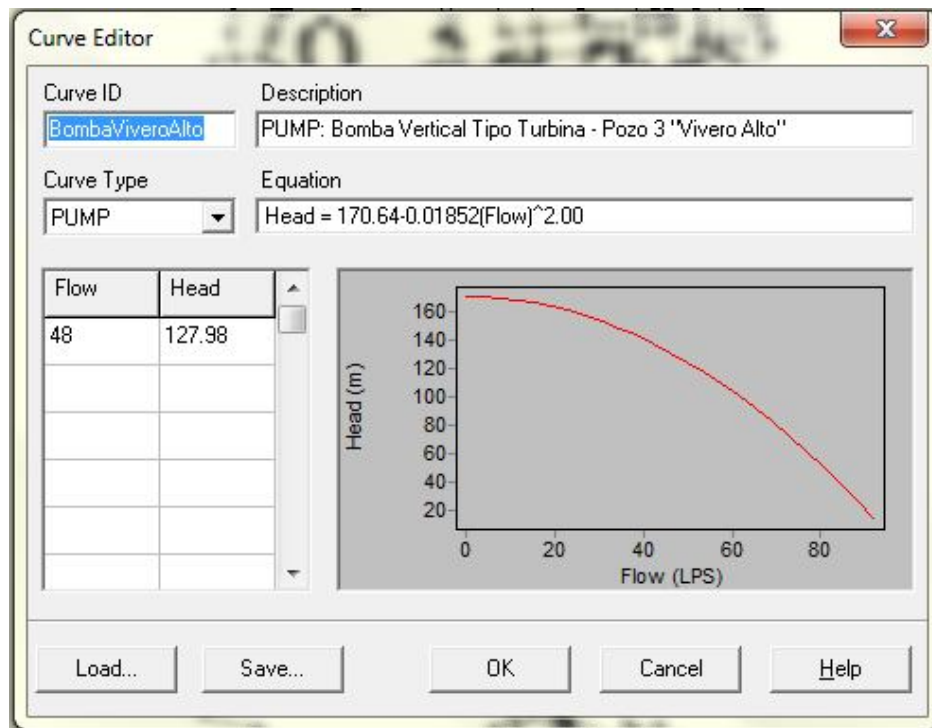


Figura 2.4 Curva de la bomba vivero alto

Estas curvas son asignadas con respecto a sus bombas correspondiente y están ubicadas como se muestra en la siguiente figura:

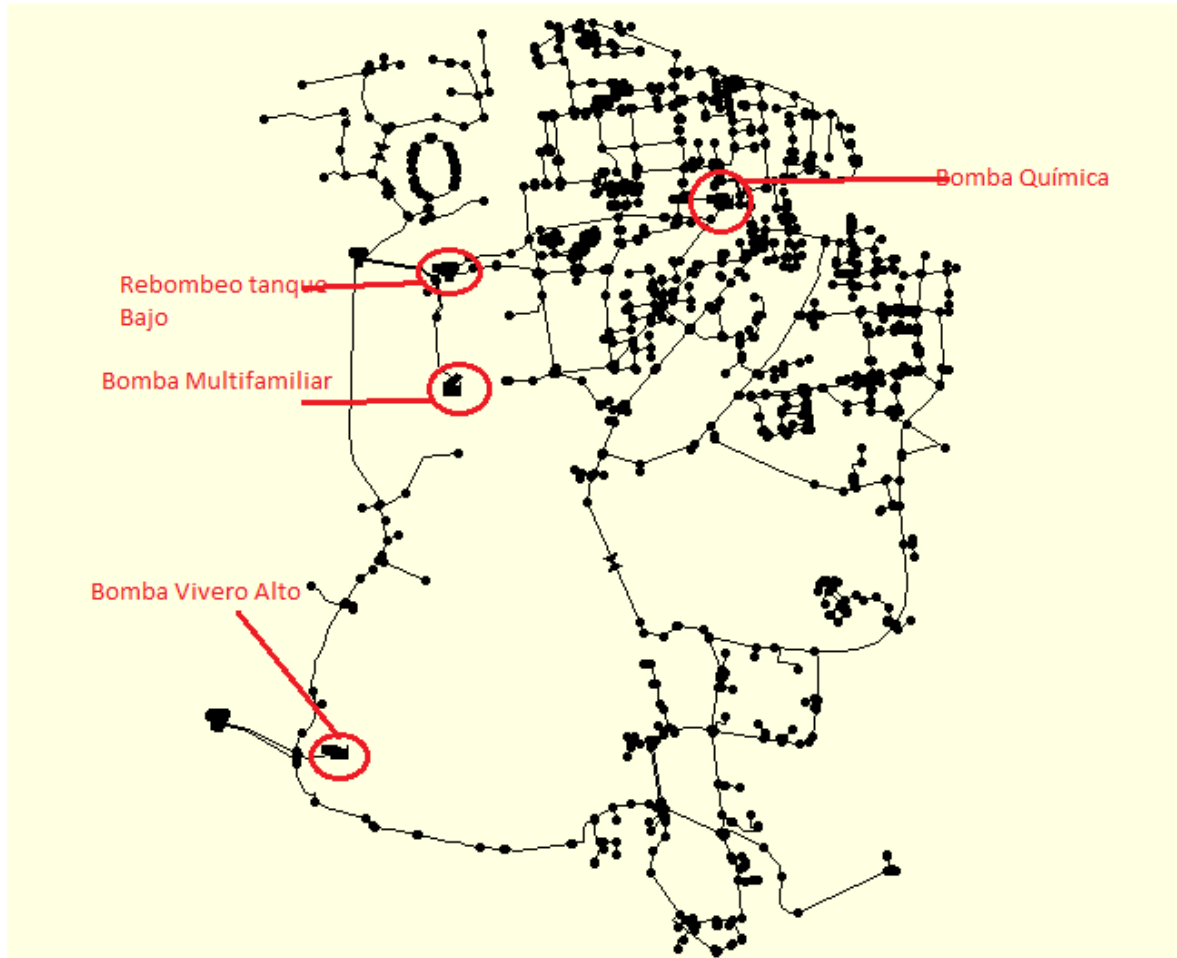


Figura 2.5 Localización de las bombas en la red de distribución

Curva de rendimiento

La curva de rendimiento determina el rendimiento de la bomba (eje Y en %) como función del caudal de la bomba (eje X en unidades de caudal). Esta curva se usa únicamente para cálculos energéticos. Si no determinamos la curva de rendimiento se usará una curva de rendimiento genérica prefijada.

Curva de volumen

Una curva de volumen determina como el volumen de agua en el tanque (eje Y en metros cúbicos) varía en función del nivel de agua (eje X en metros). Se usa cuando es necesario representar exactamente tanques cuya sección transversal varía con la altura.

2.2.1 Patrones de tiempo

EPANET necesita un patrón de tiempo para simular de forma transitoria. Un patrón de tiempo es una colección de factores que pueden aplicarse a una cantidad para representar que varía a lo largo del tiempo, como demandas en los nodos y alturas de depósitos. El intervalo de tiempo en todos los patrones es un valor fijo, determinado en las opciones de tiempo del proyecto. Dentro de este intervalo de tiempo la cantidad asociada permanece constante igual al producto de su valor nominal y el factor en este periodo de tiempo. Todos los patrones deben utilizar el mismo intervalo de tiempo, aunque cada uno puede tener un diferente número de periodos en el patrón. Cuando el reloj de la simulación exceda el número de periodos en el patrón, el patrón se reiniciará de nuevo al primer periodo.

El patrón de demanda aplicado a cada uno de los nodos es el siguiente:

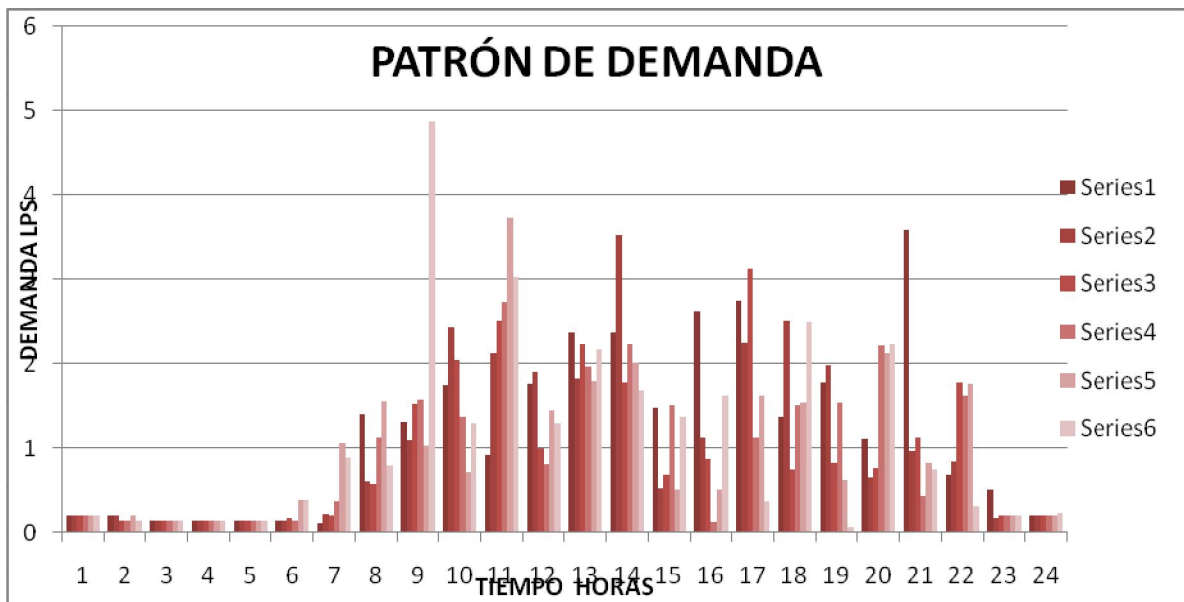


Figura 2.6 Patrones de Tiempo

Se aplicó una demanda diferente cada 10 minutos, como se podrá observar los horarios con mayor demanda son en horas de labores mientras que la menor demanda existe en

horarios nocturnos, este consumo se debe a la demanda de agua que presentan instalaciones como laboratorios, por poner un ejemplo, pero se cree que la mayor parte del consumo en este horario se debe a fugas de la red de distribución. De esta forma es como se ha podido estimar la cantidad de agua perdida en fugas de la red.

2.3 FUGAS

Una fuga se define como una salida no controlada del agua en cualquiera de los elementos del sistema de distribución de agua potable.

Las fugas pueden variar dependiendo de: tipo de suelo, calidad de agua, especificaciones, calidad de construcción, materiales utilizados, edad de las instalaciones, prácticas de operación y mantenimiento. Las fugas también pueden ocurrir en los tanques de regularización y cisternas, debido al agrietamiento de las estructuras, o al rebose de las mismas.

En la red, las fugas pueden presentarse como consecuencia del agrietamiento transversal, aplastamiento y agrietamiento longitudinal. El primer caso se debe a esfuerzos y vibraciones producidas por cargas superficiales; el segundo es resultado de una construcción defectuosa y el tercero se debe a la fatiga de los materiales, defectos de fabricación o golpe de ariete. Fenómenos como la corrosión pueden incrementar este problema, o bien, otros como el junteo defectuoso de tubos o fallas en válvulas.

Las fugas pueden traducirse en pérdidas económicas para la Universidad debido a que generan: desperdicio de agua, contaminación de agua, aumento en el consumo de cloro, aumento en el consumo de energía eléctrica y aumento del riesgo de la infraestructura.

Estudios realizados por el IMTA muestran que 90% de las fugas se presentan sobre las acometidas de agua, en tanto que el 10% restante sobre la red de distribución. Los

caudales de las fugas por el contrario, son mayores en las redes que en las tomas. Por ejemplo, una gotera en una llave de 20 ml/seg representa 72 l/hora o bien, en 4 días 15 horas lo equivalente a una pipa de 8000 litros; por el contrario, suponiendo una fuga sobre una línea primaria de 900 l/hora la misma pipa de agua se llena en tan sólo 9 horas.

Se han desarrollado una serie de métodos que buscan la detección y localización de fugas, entre los que destacan: a) Presión Diferencial, b) Sectores Hidráulicos, c) Reportes de Usuarios y d) Empleo de equipos electrónicos indirectos y directos. El primer método consiste en medir presiones sobre tramos de tuberías en las que es posible localizar una fuga, de manera que en los tramos en donde exista una caída de presión es probable localizarla. El segundo método consiste en seccionar la red de agua, de modo que el suministro se haga sólo por un solo punto y colocando en este sitio algún equipo de medición que permita identificar los suministros nocturnos que, en la mayor parte de los casos, son indicio de existencia de fugas tanto en la red como al interior de los edificios. Los reportes de usuarios son más bien un método de tipo correctivo y se enfocan principalmente a la reparación de fugas visibles, la experiencia por parte de los organismos operadores muestran que una gran parte de las fugas no lo son. De cualquier modo, su ubicación espacial puede ayudar a visualizar las zonas o sectores con mayor incidencia de éstas. El empleo de equipos electrónicos requiere de personal altamente especializado. Los equipos normalmente utilizados son el geófono y correladores, ambos basados en el sonido característico que produce una fuga. La manera más efectiva de detectar y localizar fugas es combinar los diferentes métodos existentes.

Mientras que las fugas en las ciudades en México representan entre el 30% y el 50% del agua suministrada con presiones entre 1 y 2 kg/cm², las fugas en redes en buenas condiciones (París, Barcelona, Singapur, Nagoya, etc.) fluctúan del 10% al 15% del suministro; pero con presiones de 4 ó 5 kg/cm². Los programas de reducción de fugas han sido muy poco o nada eficaces por una estrategia inadecuada; en el caso de una red extensa y muy deteriorada: si no se controlan las presiones es ineficiente o inútil todo lo demás que se haga. Todo lo demás quiere decir: (a) Nuevos suministros, (b) Ahorros de consumo y (c) Reparación o sustitución de red. (Capella V. Antonio. El problema de las fugas de agua)

En Ciudad Universitaria, el procedimiento que actualmente sigue el Taller de Agua Potable para la detección, localización y reparación de fugas se basa sólo en los reportes de usuarios y en menor medida por el método de presiones diferenciales. El procedimiento empleado es el siguiente:

1. Reporte por parte de usuarios de alguna dependencia de falla o falta del servicio o de transeúntes si la fuga se ha manifestado en la superficie.
2. Visita del personal de la DGOCC al sitio para la verificación del problema.
3. Control de la fuga, en caso de conocer su alimentación.
4. Búsqueda mediante objetos metálicos que se ponen en contacto con la tubería con el objetivo de escuchar el correr del agua y detectar alguna irregularidad.
5. Localización mediante excavaciones en el sitio supuesto de la fuga
6. Reparación de la fuga o inhabilitación de la línea de conducción una vez descubierta y controlada.

Es importante mencionar que el equipo de detección es la misma herramienta que utilizan para la reparación, esto es, desarmadores, barretas, picos, palas, etc.; método que no es eficiente, ya que la reparación de una fuga que no es visible o superficial les lleva mucho tiempo, (pueden ser semanas o meses). Cuando la fuga se ha manifestado en la superficie, se recibe un reporte o se nota con un cambio en la presión de la tubería en donde se tienen manómetros instalados. Se hace una excavación en el sitio del manifiesto y se repara la fuga de inmediato o se inhabilita el tramo hasta su reparación. Con frecuencia no se conoce la ruta que sigue la tubería y eso dificulta la localización. Para esto, se hacen excavaciones con la continuidad y tamaño necesarios para seguir la tubería; se buscan registros (cajas de válvulas) con el mismo fin. Todos los viernes últimos de mes se acostumbra hacer revisiones de rutina a las líneas de conducción principales, bajo el procedimiento descrito anteriormente. Estos recorridos resultan de gran utilidad, ya que a raíz de los resultados que se obtienen, se le da mantenimiento a la Red. Sin embargo, existen problemas no evidentes que pueden pasar desapercibidos por los encargados de dichos recorridos.

En Ciudad Universitaria las fugas son visibles y ocultas. Las visibles brotan a la superficie y humedecen el terreno. La mayoría de estas fugas las reportan los propios usuarios o personal de cada entidad. Las fugas ocultas se filtran en el suelo y no se sabe donde están. A veces estas fugas entran a los drenajes, cajas de válvulas y son difíciles de encontrar. Muchas fugas ocultas son pequeñas cuando ocurren, pero crecen con el tiempo. Así, el promedio de vida de estas fugas puede ser de días, semanas y hasta de años. Las fugas se presentan en distintas formas. Algunas de ellas se presentan en los accesorios de las tuberías y en el cuerpo de la tubería, pudiendo ser estas rajaduras y agujeros. En las válvulas la falla más común se encuentra en la base de su volante y en las juntas. Particularmente en los tanques superficiales y cisternas, las fugas ocurren debidas al agrietamiento de las estructuras o al rebose de las mismas. Por otro lado, se ha elaborado un estudio histórico sobre la incidencia de fugas en la red para los años 2007, 2008 y hasta Junio de 2009. De este estudio se concluye que durante el año 2007 se reportaron un total de 236 fugas, mientras que en 2008 250 y, hasta el 30 de Junio de 2009 se habían presentado 128 reportes de fugas. Un hecho importante que muestra la incidencia de fugas es que éstas se presentan con mayor frecuencia en los meses con alta ocupación en Ciudad Universitaria (Febrero, Marzo, Abril, Mayo, Junio, Septiembre, Octubre y Noviembre), mientras que la frecuencia de éstas disminuye hasta en un 60% durante Julio, Agosto, Diciembre y Enero, meses considerados como de baja ocupación (Figura 2.7). De acuerdo a su origen, se determinaron las principales causas de fugas en Ciudad Universitaria: a) Fluctuación de presiones, b) Mala calidad de materiales, c) Excedencia en la vida útil del material, d) Efectos ambientales en los materiales, e) Impactos accidentales, f) Asentamientos del terreno y g) Actos de vandalismo.

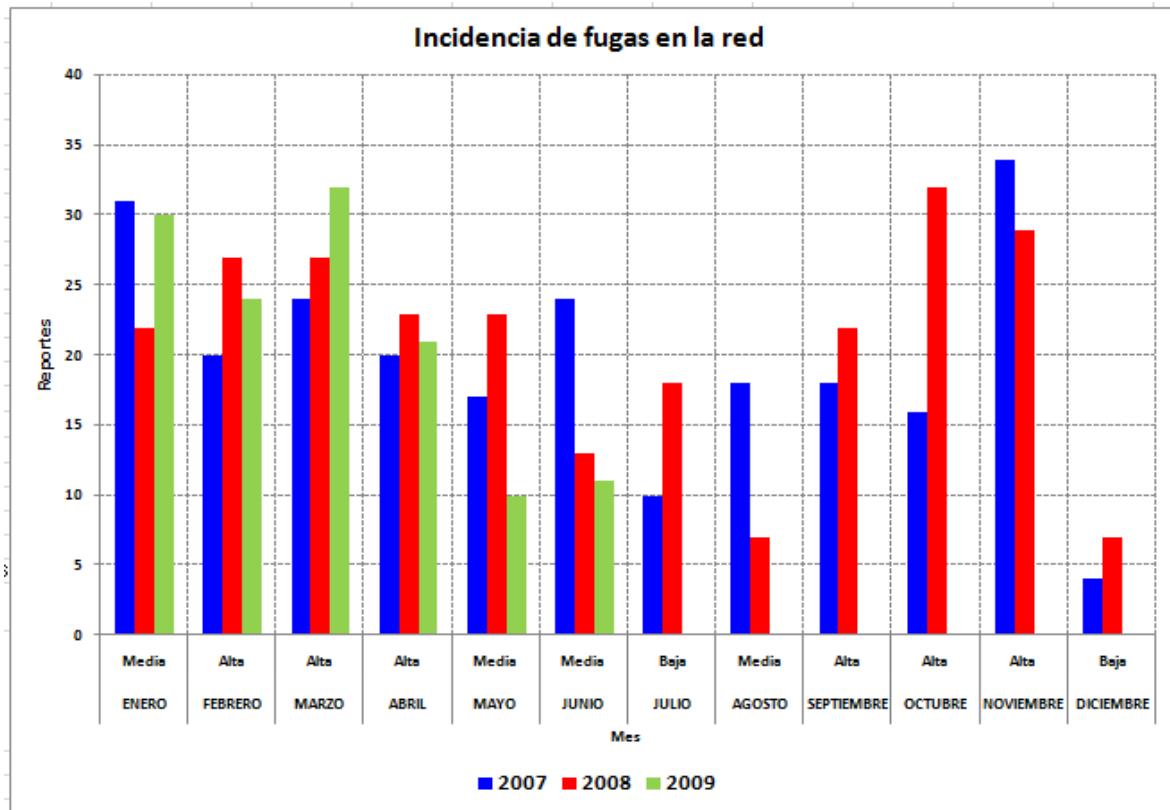


Figura 2.7 Incidencia de fugas en la red de agua potable según la ocupación en CU.
(Cortesía PUMAGUA)

La incidencia de fugas visibles en los materiales muestra que un 41% de ellas se presenta en el acero galvanizado (material del 85% de las tomas de agua), seguido del PVC con 11.57 % y el acero al carbón y cobre con 11.45%. La Tabla 2.3, resume los porcentajes de incidencias de fugas en los materiales de la red de agua potable de Ciudad Universitaria de la UNAM.

MATERIAL	PROMEDIO ANUAL
AC/GALV	41.089%
AC/CAR	11.449%
ASBESTO- CEMENTO	1.430%
COBRE	11.184%
EXTRUPACK	13.134%
FIER/FUND	8.580%
PVC	11.572%
BRONCE	1.563%

Tabla 2.3 Incidencia de fugas en Materiales de la red de agua potable. (Cortesía PUMAGUA)

3. ANALISIS DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN

La simulación fue terminada tomando en cuenta todas las características proporcionadas por PUMAGUA: material, longitudes, diámetros, demandas de agua, elevaciones.

En este capítulo se muestran los resultados de la simulación, las consideraciones que se tomaron en cuenta para obtener los resultados deseados, así como los resultados obtenidos en los nodos y tubos simulados en la red.

3.1 Generalidades

La simulación numérica presenta la distribución a lo largo de red, el almacenamiento, rebombeo y flujo a lo largo de las tuberías.

Para el modelado de la red se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se utiliza la ecuación de Hazen-Williams que es un método sencillo para obtener las pérdidas de carga en tuberías por donde fluye agua a temperaturas ordinarias.
- Se tienen tres principales funciones en la red: suministro por medio de tres pozos, almacenamiento en tres tanques y distribución por medio de las tuberías.
- Los materiales utilizados en las tuberías son: acero, asbesto, fierro fundido y PVC.
- Se representó la altura del terreno a lo largo de la red.
- Se utilizó un patrón de tiempo para representar las demandas que se tienen a distintas horas del día.
- Se hizo una lista en excel de las coordenadas de cada una de las tuberías y se organizó tomando en cuenta los diámetros, el tipo de material y la longitud, después esta lista se exportó a EPANET.

3.2 Planteamiento del Problema

Durante los últimos años la demanda de agua en Ciudad Universitaria se ha venido incrementando y las características de la red permanecen sin cambios significativos que ayuden a mejorar las condiciones de la distribución, por el contrario el paso de los años y la mala planeación de operación provoca que se deteriore constantemente teniendo como resultado cada vez más fugas de agua y menor calidad en el servicio.

El caso que se va a simular consiste en un sistema de tuberías, tanques y pozos que conforman la red de distribución de agua en CU, estos componentes operan de manera conjunta para representar las condiciones actuales de operación, y con esto proponer modificaciones que mejoren el funcionamiento del sistema.

3.3 Descripción del Sistema

El programa realizado se ejecuta simulando en un lapso de 24 horas, representando un día, y este se repite indefinidamente. Es importante observar de qué manera quedó terminada la red de distribución de agua, sus características principales como son: diámetros de tuberías, rugosidades, longitudes, alturas del mapa.

El cálculo de la pérdida de carga se puede representar considerando un arreglo como el siguiente:

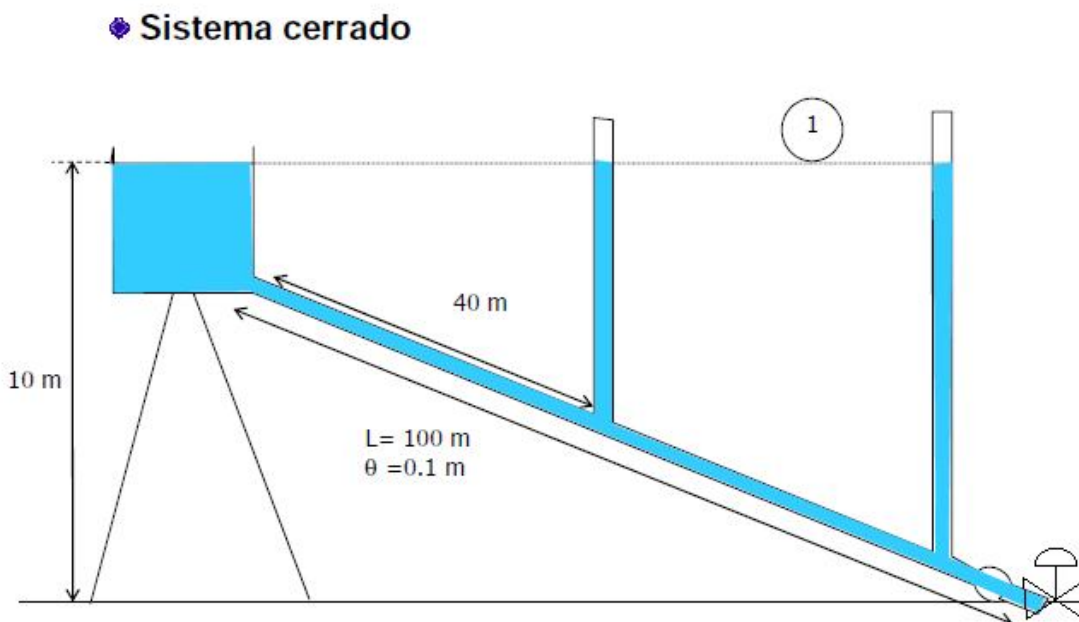


Figura 3.1 Sistema Cerrado

Abriendo toda la llave la carga se agota por fricción como se observa en la figura 3.2.

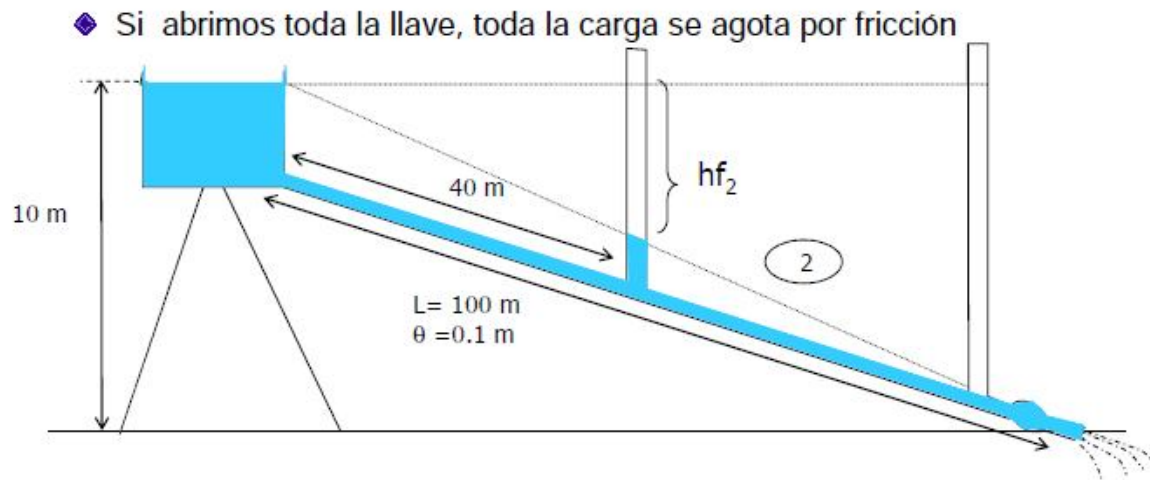


Figura 3.2 Sistema abierto

La fórmula de Hazen-Williams se aplica de la siguiente manera:

$$h_f = \frac{10.679}{C^{1.852}} \cdot \frac{L}{D^{4.87}} \cdot Q^{1.852} \quad h_f = 10 \text{ m}, L=100\text{m}, C=140; D=0.1\text{m}$$

$$h_f = \frac{10.679}{140^{1.852}} \cdot \frac{100}{0.1^{4.87}} \cdot Q^{1.852}$$

$$Q = 0.026 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Utilizando el piezómetro ubicado a los 40m obtenemos pérdida:

$$h_{f_2} = \frac{10.679}{140^{1.852}} \cdot \frac{40}{0.1^{4.87}} \cdot 0.026^{1.852}$$

$$h_{f_2} = 3.88\text{m}$$

Las tuberías pueden abrirse o cerrarse en determinados instantes de tiempo o cuando existan unas condiciones específicas, como por ejemplo cuando el nivel de tanque cae o llega a determinado punto o cuando la presión en los nodos cae o llega a determinados valores.

3.4 Resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en la simulación, los cuales son comparados con valores establecidos de condiciones óptimas en una red de distribución de agua.

En la figura 3.4 se muestra de que manera quedaron distribuidas las longitudes de las tuberías.

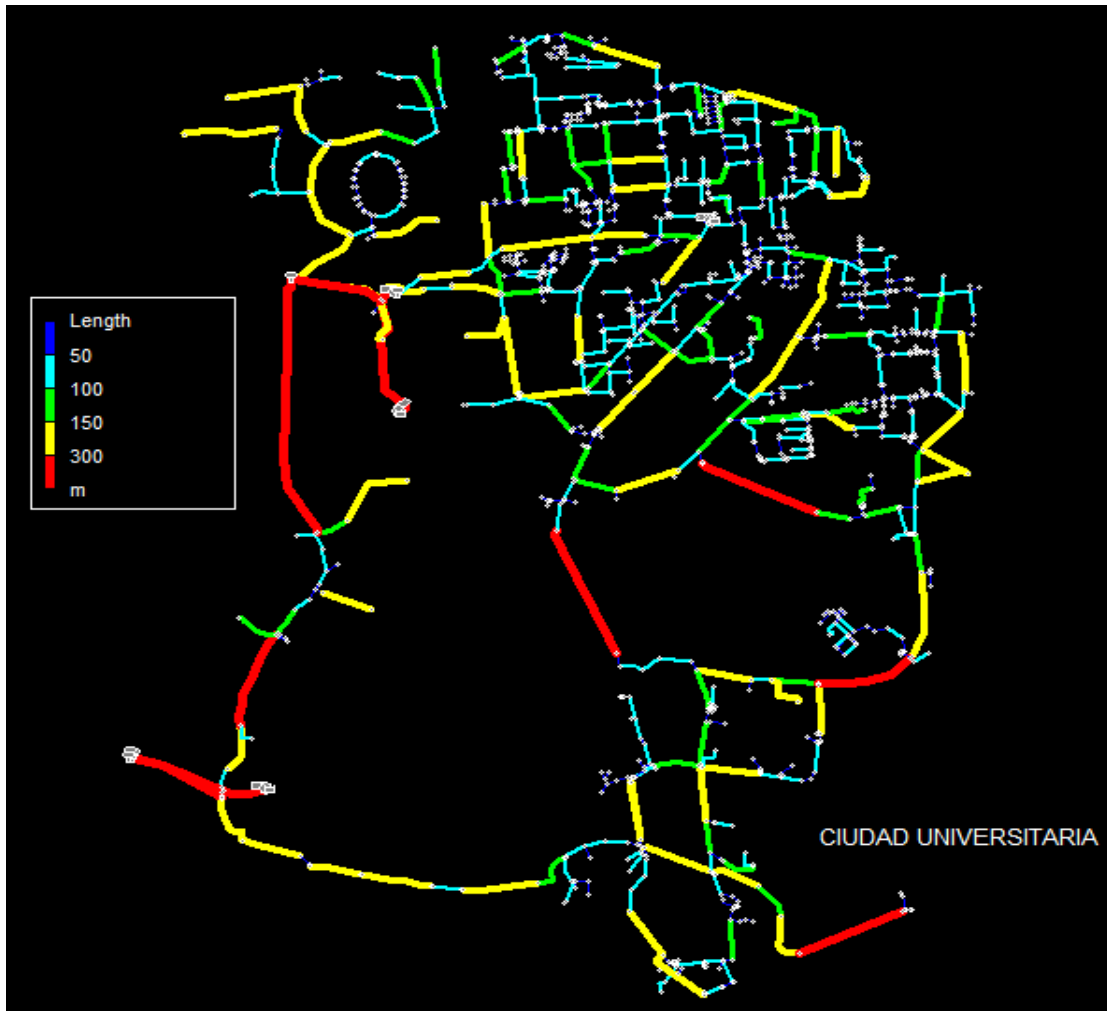


Figura 3.4 Distribución de las tuberías según su longitud.

En la siguiente figura se observa la distribución de los diámetros utilizados en cada uno de los tubos colocados en la red. EPANET solo cuenta con 5 opciones para visualizar los distintos diámetros por lo que no es posible identificar por medio de la imagen cada uno de ellos sin embargo en la figura 3.5 se muestra el porcentaje de diámetros utilizados en la red.



Figura 3.5 Distribución de las tuberías según el diámetro.

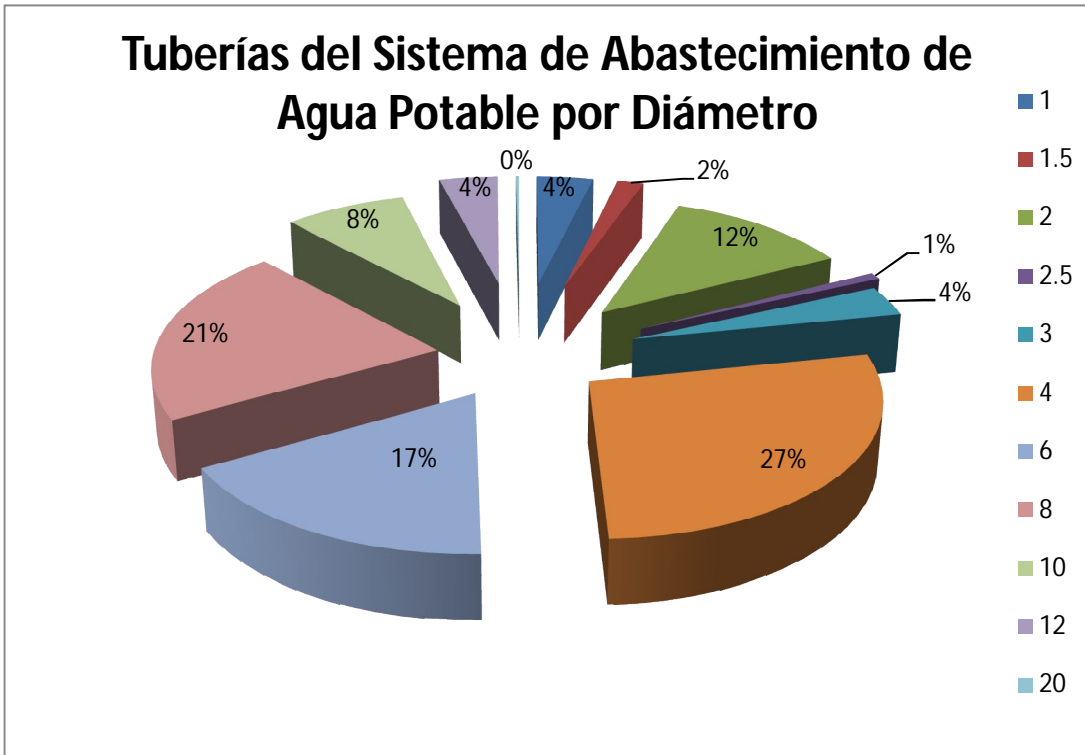


Figura 3.6 Tuberías de Ciudad Universitaria por diámetro.

El siguiente mapa nos muestra las curvas de elevación (m) que se tienen en la red, cabe mencionar que todos los datos correspondientes a elevaciones no fueron modificados en lo absoluto así que son los mismos que proporcionó PUMAGUA al inicio de este proyecto, y son los mismos que se han tenido como información desde que se creó la red de distribución de agua en CU.

Se puede ver claramente como el terreno va elevándose de derecha a izquierda y que hay una diferencia de aproximadamente 60 m entre el punto más bajo y el punto más elevado. La zona escolar, que es donde se tiene la mayor demanda de agua, se encuentra a una altura entre los 2270 m y los 2290 m sobre el nivel del mar.

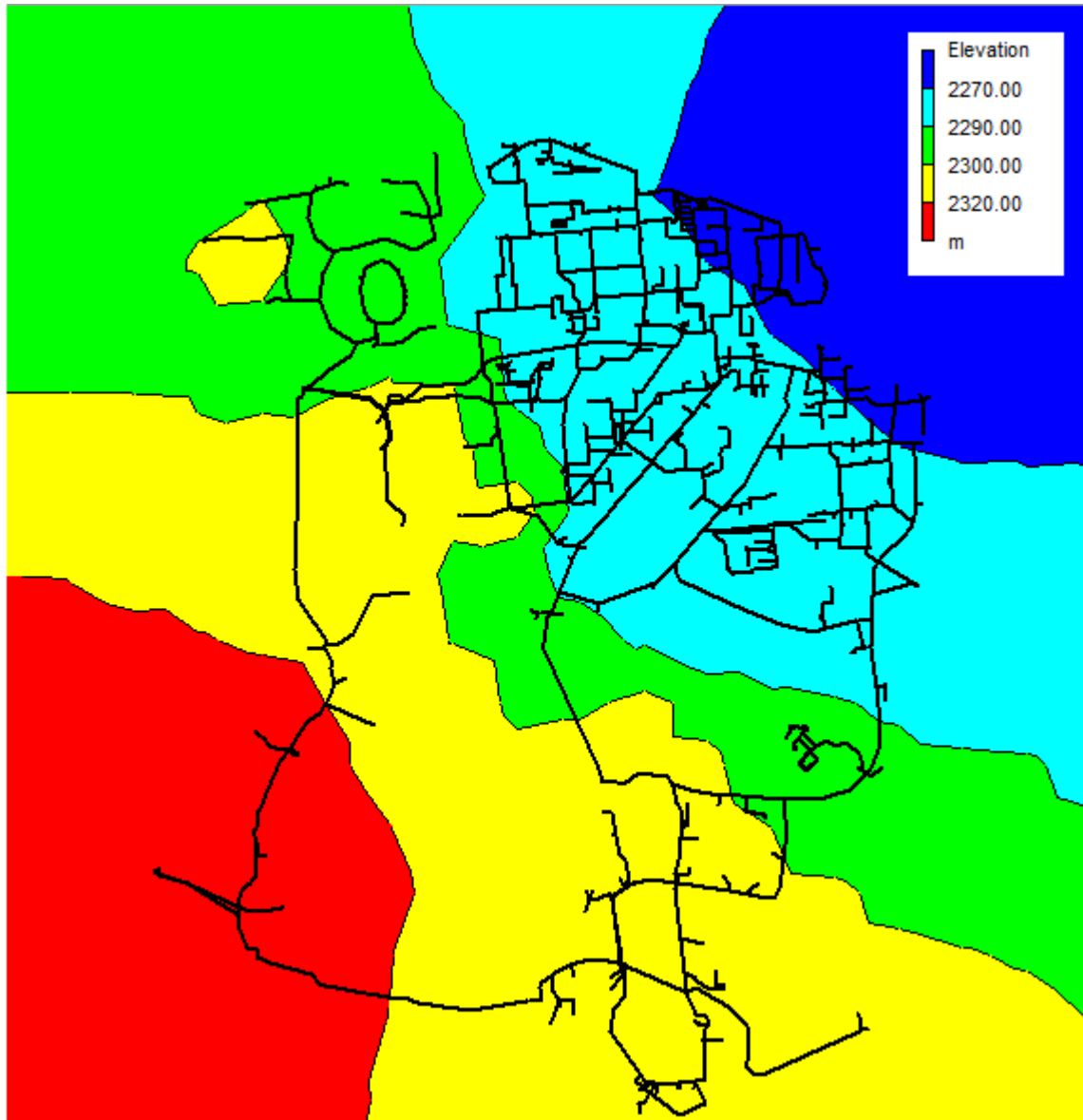


Figura 3.7 Curvas de elevación en Ciudad Universitaria.

Es posible observar más datos mostrados directamente en el mapa como los anteriores, sin embargo, se omiten ya que éstos son los que se consideran de mayor importancia para un mejor entendimiento de los resultados finales.

Para llegar a una simulación final fue necesario realizar simulaciones previas utilizando tal cual los datos de la red proporcionados por PUMAGUA, sin embargo, al utilizar dichos datos el software arrojaba resultados no válidos, por tal motivo se tuvo la necesidad de sustituir cierta información pero siempre teniendo en cuenta los datos originales.

El primer dato que fue modificado es en la sección de los tanques de “Vivero Alto”, originalmente se encuentran 4 tanques con un diámetro de 25m cada uno, estos se sustituyeron por un solo tanque de 50 m de diámetro que tiene la misma función.

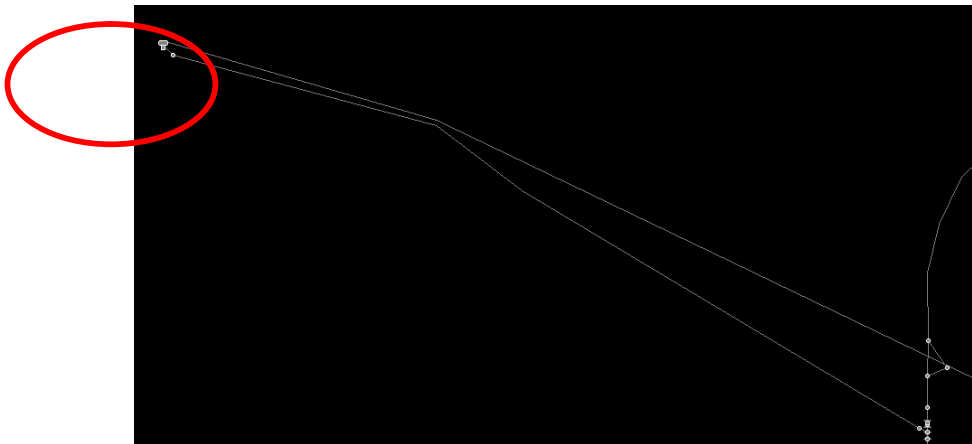
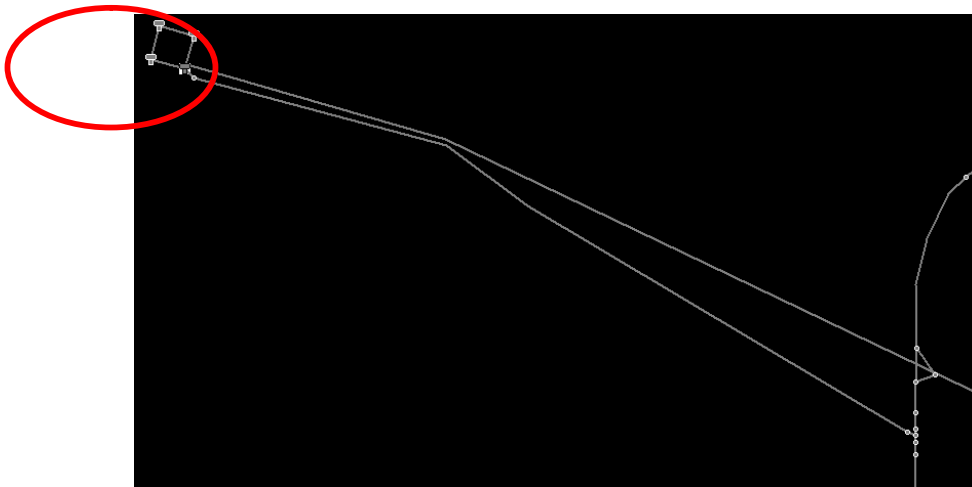


Figura 3.8 Modificación del tanque de almacenamiento “Vivero Alto”

Lo que se logró con esto es una distribución uniforme del agua que se extrae del pozo “Vivero Alto”, ahora es posible apreciar en una sola gráfica la variación en el nivel de agua dentro del tanque.

Es importante mantener un control del agua que se extrae de los pozos y se distribuye a la red. En el sector de “Vivero Alto” se tenía un exceso de distribución al dejar fluir libremente el agua almacenada en los tanques por lo que en un principio fue necesaria la colocación de válvulas de control de flujo (FCV), sin embargo al utilizarlas la velocidad del flujo caía considerablemente y quedaba muy por debajo de las velocidades recomendadas.

En la siguiente imagen se observa donde se colocaron las FCV y los valores que se le dieron a cada una.

El tanque de “Vivero Alto” entrega agua a dos sectores de la red: la zona cultural y al “Tanque Alto”, por lo tanto se colocaron dos FCV una con un parámetro de 20 lps y la segunda con un parámetro de 30 lps.

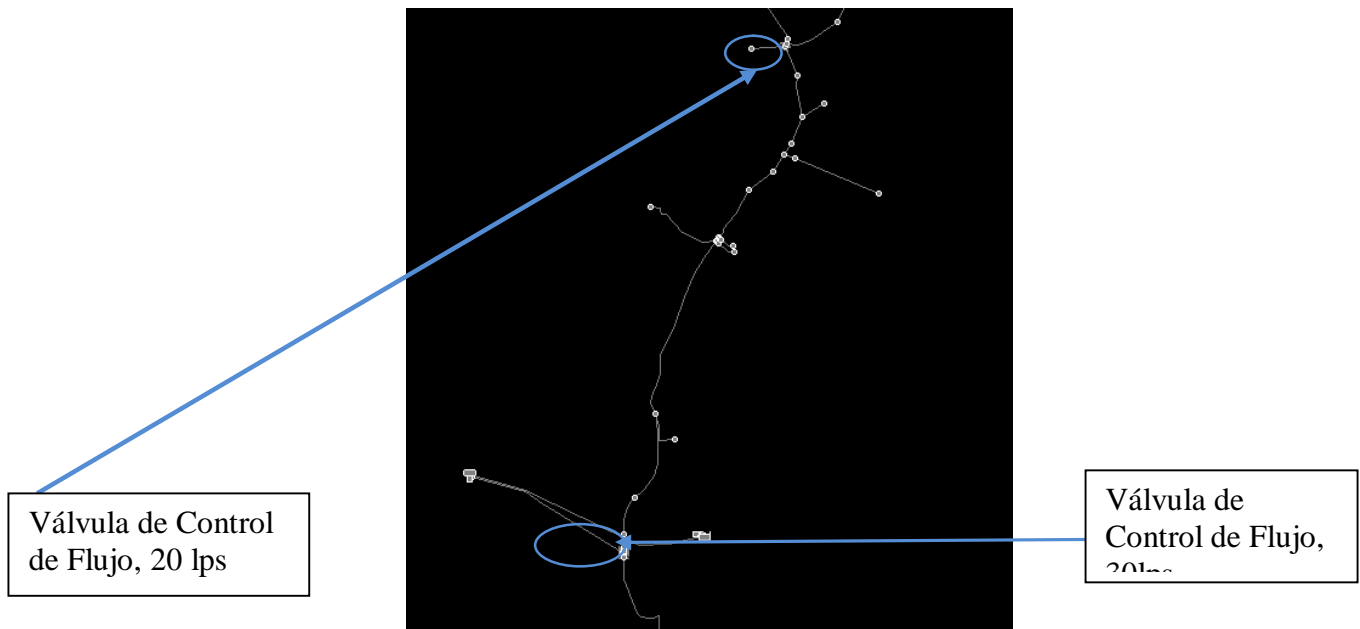


Figura 3.9 Posición de las FCV

Otro detalle que se debía solucionar es el sentido del flujo de agua, las tuberías pueden cambiar libremente el sentido del flujo según las presiones en cada uno de sus nodos sin embargo en algunos tubos esto no debe ocurrir. Para tuberías en EPANET se tiene una opción “Check Valve” (CV) que permite flujo en un solo sentido.

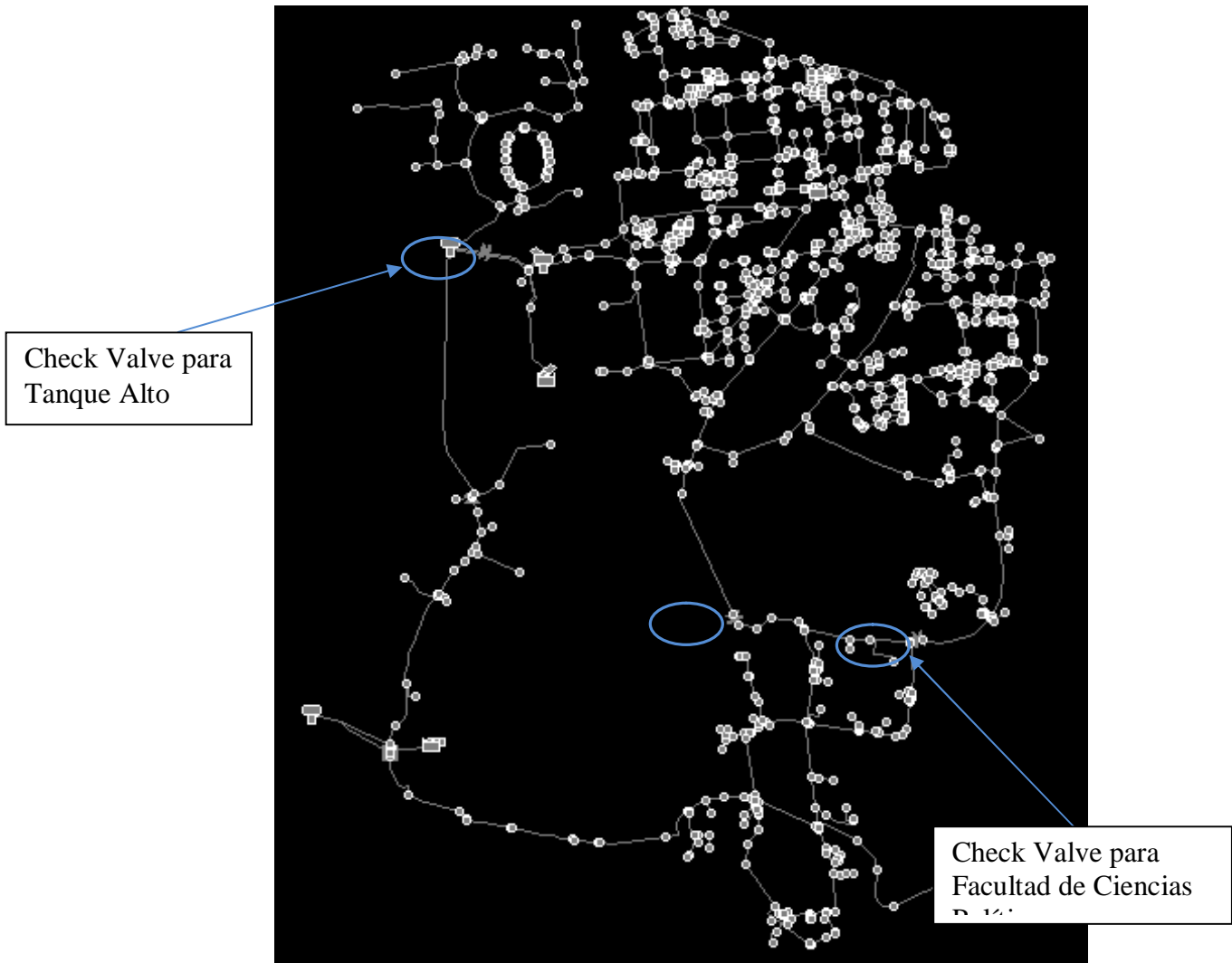


Figura 3.10 Ubicación de tubos Check Valve

El primer tubo “Check Valve” se colocó en la salida del “Tanque Alto” con esto se logró que el agua fluyera solo del tanque hacía la zona escolar y no en sentido contrario, sin el CV el flujo era hacia el “Tanque Alto” ocasionando que se llenara rápidamente hasta su nivel máximo y generando presiones negativas en la zona del circuito escolar.

Antes de la colocación de las válvulas el tanque bajaba de nivel muy rápidamente y el bombeo del pozo “Vivero Alto” no era suficiente; al vaciarse el tanque se generaban presiones negativas en las áreas cercanas a este. Al utilizar FCV y CV se solucionó el problema pero la velocidad bajó en gran medida.

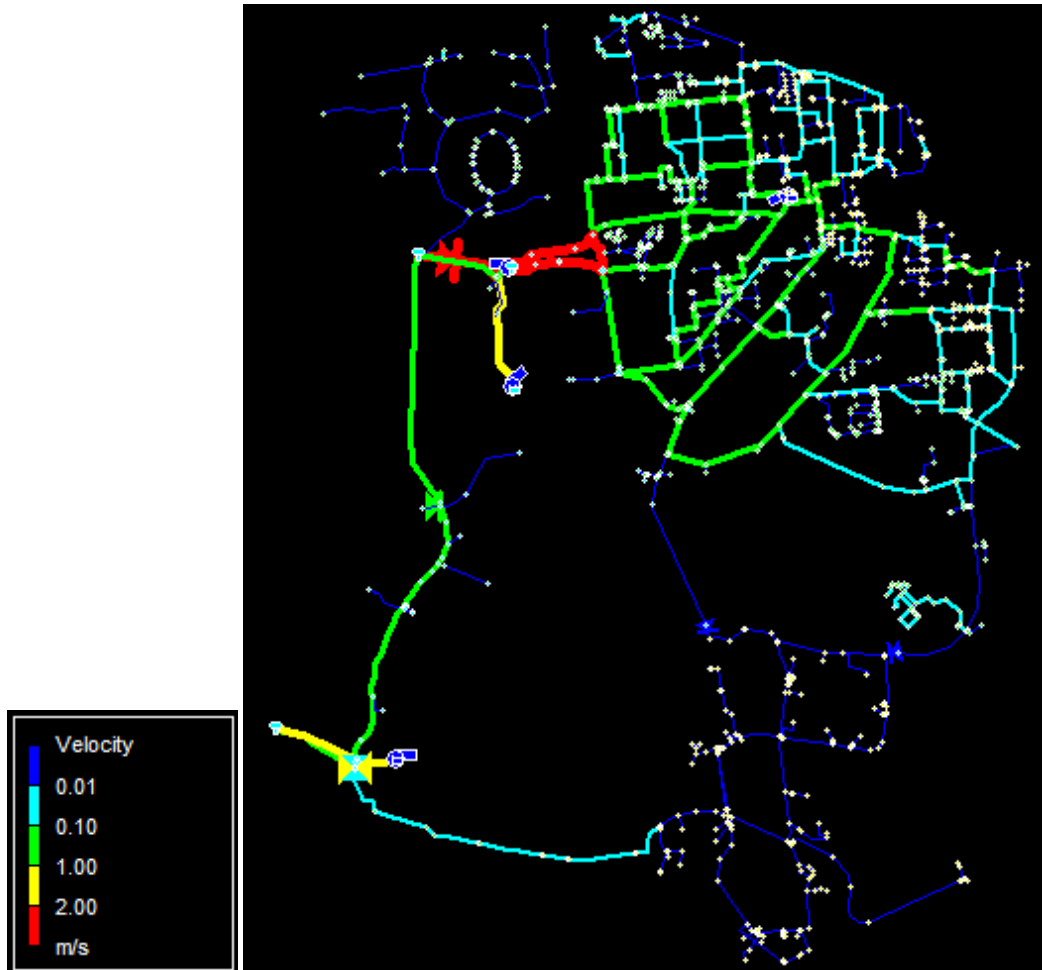


Figura 3.11 Mapa de velocidades en tuberías a las 9:00 hrs con uso de FCV

Debido a la disminución en la velocidad se optó por dejar de lado las FCV y las CV, excepto la de control de dirección del Tanque Alto al Tanque Bajo, y utilizar controles que ayudan a especificar el estado de los componentes de la red. El tubo Check Valve que va desde el Tanque Alto hasta el Tanque bajo se mantuvo ya que cumplió satisfactoriamente su propósito.

El siguiente cuadro nos muestra los controles que se utilizaron para lograr un funcionamiento óptimo de la red:

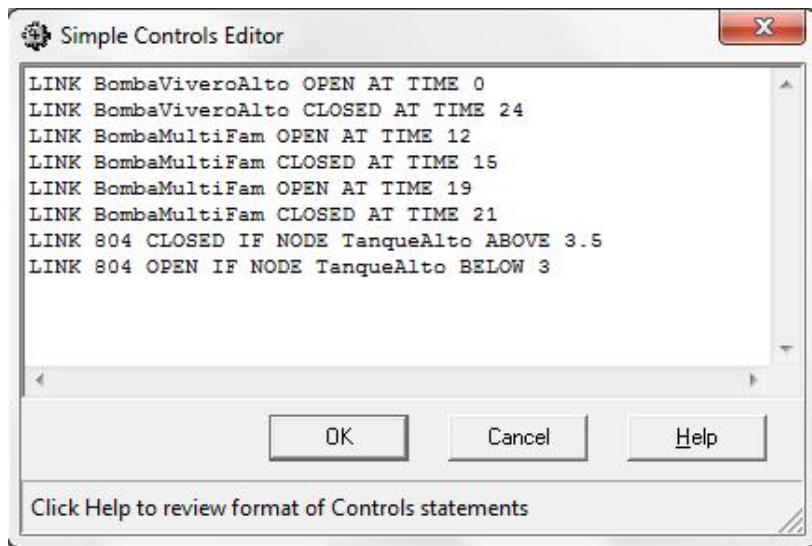


Figura 3.12 Controles utilizados para el control de Bombeo y cierre de tuberías

Las especificaciones dadas en los controles fueron obtenidas después de analizar las gráficas de niveles de agua y observar las presiones de los nodos directamente de la simulación, ya que un tanque al llegar al nivel máximo automáticamente cierra las tuberías que le abastecen de agua generando incrementos en la presión de los nodos conectados a la tubería.

Se utilizó la bomba de Vivero Alto que es donde inicia todo el flujo de agua ya que pertenece al tanque con diámetro mayor y mejor elevación, alimenta la zona cultural y también al Tanque Alto, estas dos demandas de agua provocan que se tenga una disminución muy rápida del nivel por lo que se debía controlar el flujo de agua por medio del cierre de la tubería que alimenta al Tanque Alto, se especificó un cierre en la tubería "804" cuando el tanque Alto se encuentra por encima de los 3.5 m de nivel y se abre cuando el tanque está por debajo de los 3 m de nivel, con esto mantenemos una estabilidad en el nivel de agua del Tanque Vivero Alto y evitamos incrementos repentinos de presión en la zona cultural.

La bomba Multifamiliar también ayuda a elevar los niveles de agua en el tanque Alto y en Tanque Bajo aunque solo se ocupó en algunas horas del día, cuando la demanda de agua se eleva, si se ocupa por más tiempo llena rápidamente a ambos tanques hasta el nivel máximo generando cierre de tuberías de abastecimiento y con esto incrementos de presiones de hasta 9 bar.

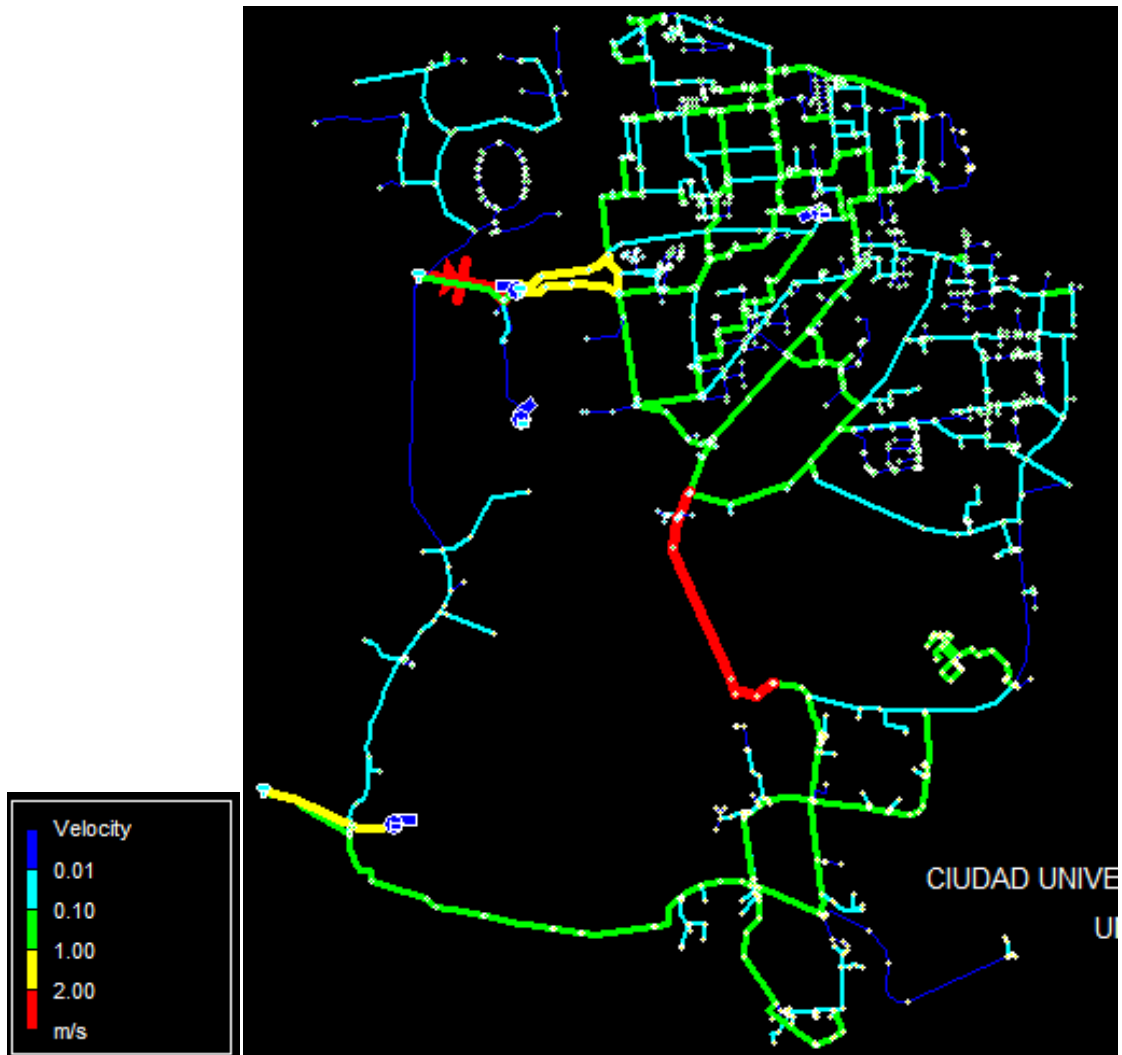


Figura 3.13 Mapa de velocidades en tuberías a las 9:00 hrs con uso de Controles

A continuación se muestran las gráficas del comportamiento del nivel de agua en cada uno de los Tanques

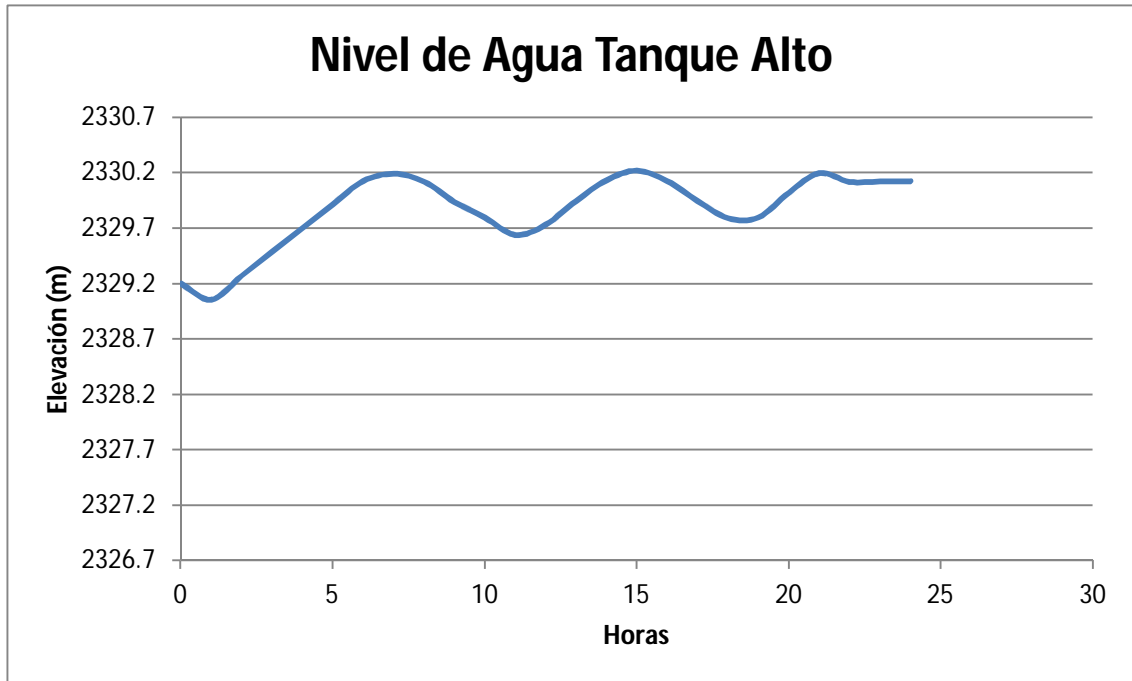


Figura 3.14 Variación del nivel de agua en el Tanque Alto.

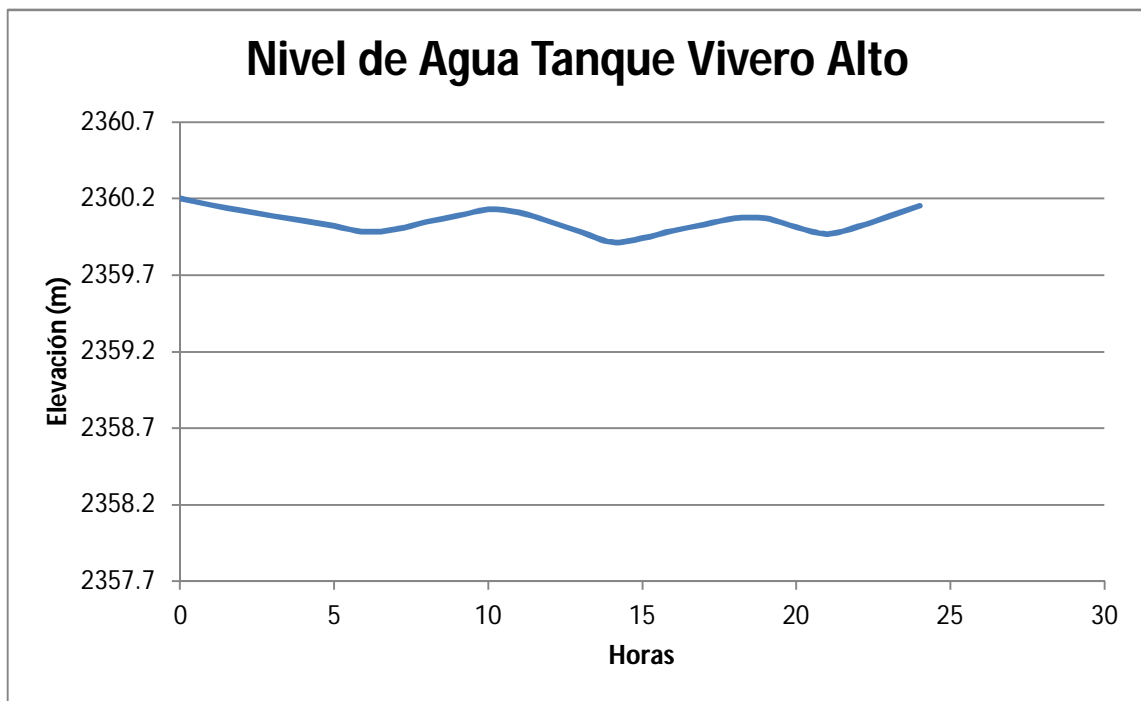


Figura 3.15 Variación del nivel de agua en el Tanque Vivero Alto.

En las gráficas anteriores se observa como corresponden los incrementos y decrementos del nivel de agua en ambos tanques gracias al control de la tubería "804", cuando esta se cierra a causa del nivel de agua superior a los 3.5 m en el tanque Alto el tanque Vivero

Alto deja de abastecerlo y va subiendo su nivel de agua disminuyendo así la del tanque Alto hasta llegar a los 3 m de nivel que es cuando la tubería se abre y permite el flujo desde el Tanque Vivero Alto, esta interacción continúa así a lo largo de las 24 hrs.

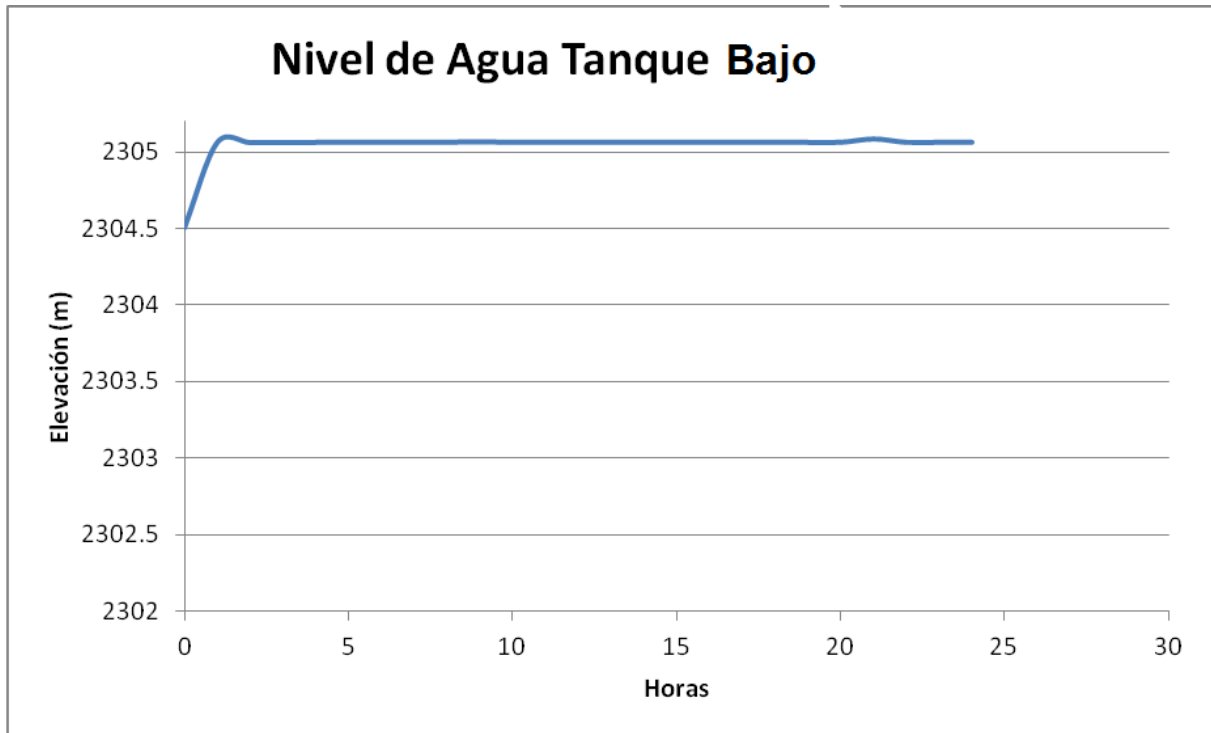


Figura 3.16 Variación de nivel de agua en el Tanque Bajo.

El tanque bajo se mantiene cerca de su nivel máximo sin embargo este se encuentra en constante operación y se ocupa más para el sistema de rebombado, conforme se está llenando, va abasteciendo al tanque Alto.

Los niveles de agua dentro de los tres tanques son estables y nunca llegan al nivel máximo ni mínimo, así que trabajan dentro de los rangos permitidos y no representan un problema en cuanto a nuestra simulación se refiere.

El pozo de Química no fue utilizado en ningún momento en la simulación ya que como se especificó antes, no se ocupa regularmente solo cuando se le da mantenimiento a alguno de los tanques o pozos de Ciudad Universitaria, además la simulación se ejecuta satisfactoriamente sin la necesidad de activarlo pues la demanda queda cubierta totalmente por el Pozo Vivero Alto y el Pozo Multifamiliar.

La presión en cada uno de los nodos es otro dato que se tomó mucho en cuenta para llegar a la simulación final, y fue un parámetro indispensable para la elección de los tiempos de operación de cada una de las bombas, colocación de CV, y controles para cierre de tubos. El **“Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable”** nos indica el rango de presiones en el cual deben trabajar los nodos de una red de distribución de agua y es 1 bar como mínimo y 5 bares como máximo.

A continuación se muestran gráficas que representan el porcentaje de presiones que encontramos en la red, es posible visualizar gráficas de cada hora simulada en la red sin embargo se muestran sólo las más representativas de un día, la primera nos representa un porcentaje de presiones a las 4:00 hrs:

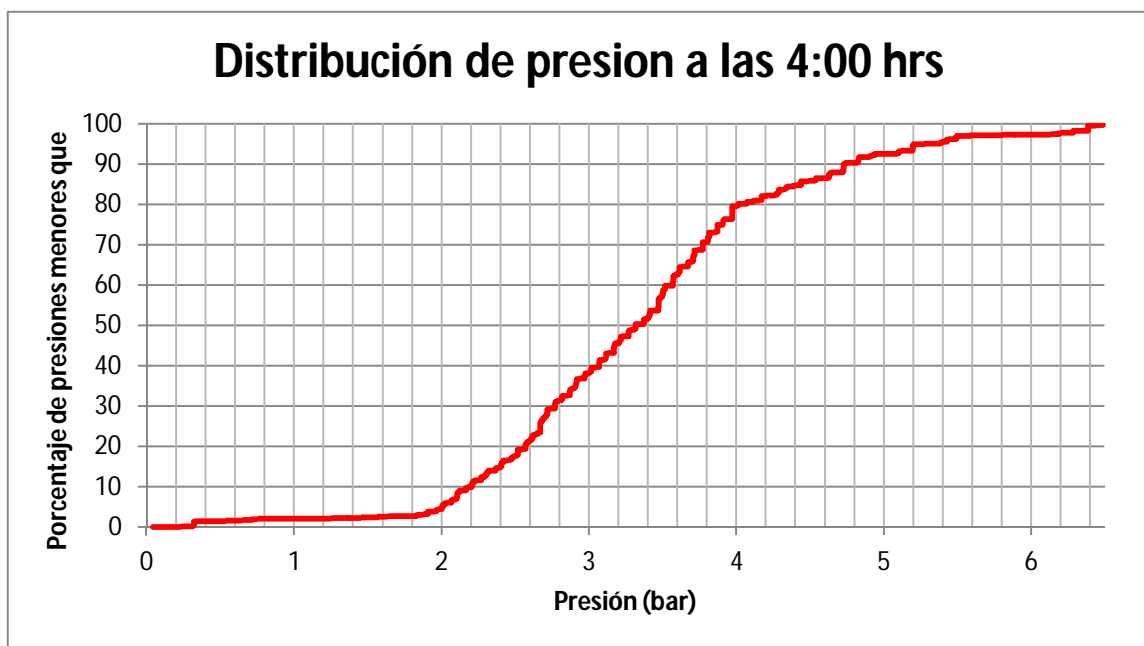


Figura 3.17 Distribución de presiones a las 4:00 hrs

Se observa como la mayor parte de las presiones se encuentra entre 1 bar y 5 bar, que son los parámetros recomendados, de hecho menos del 10% de las presiones son inferiores a 1 bar y aproximadamente 10% de las presiones superan los 5 bares, se considera entonces que son aceptables.

La siguiente gráfica muestra el porcentaje de presiones a las 9:00 hrs, es un momento importante ya que es el que tiene el valor más elevado en el patrón de demanda de agua

así que debe tener la suficiente presión a lo largo de la red para poder entregar el líquido a todos los puntos de extracción.

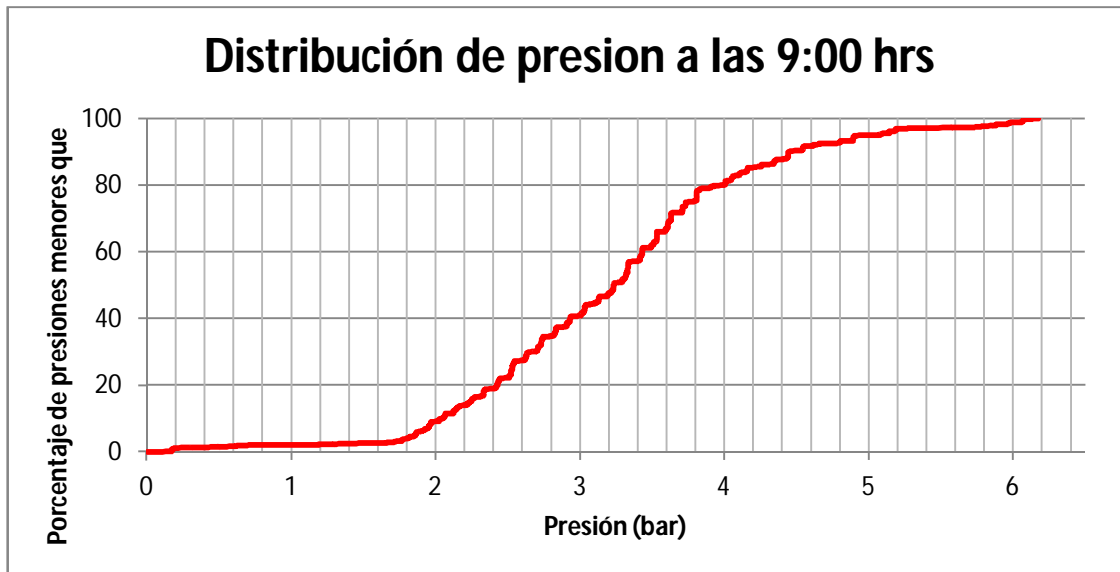


Figura 3.18 Distribución de presiones a las 9:00 hrs

De hecho se encontró que las presiones no varían mucho con respecto a las de la gráfica anterior, más del 80% de las presiones se encuentran dentro del rango de 1 bar como mínima y 5 bares como máxima. Solo un porcentaje menor al 20% sale del rango así que se considera también aceptable.

Al ir observando las gráficas de presión a lo largo del día se notó que en realidad la variación de presiones en cada instante es mínima y con las gráficas mostradas anteriormente queda representado el porcentaje de presiones en los nodos a lo largo del día por lo que no es necesario presentar gráficas en otros horarios. Con esto se entiende que el sistema tiene la capacidad de entregar agua con buena presión en cualquier horario sin importar el lugar en el que nos encontremos.

4. CONCLUSIONES

El agua representa el recurso natural más importante de la Tierra, es esencial para el funcionamiento y desarrollo de la vida en el planeta, además interviene en todo tipo de actividades humanas. Este elemento constituye el líquido más abundante en el planeta sin embargo el problema son las proporciones posibles de consumir: 97.5% es salada; 2.24% es dulce, congelada en los glaciares y únicamente el 0.26% es posible de usar en consumo humano.

El agua puede ser considerada como un recurso renovable cuando se controla cuidadosamente su uso, tratamiento, liberación y circulación. De lo contrario es un recurso no renovable en una localidad determinada.

Es primordial aumentar esfuerzos mediante los cuales podamos determinar el diagnóstico de la situación en que se encuentra este recurso y las posibles soluciones ante el obvio problema existente para lograr que dicho líquido sea mejor aprovechado, no se siga contaminando y se amplíe su distribución.

En la UNAM, la problemática existente no es diferente de cualquier otra zona del país. Se tiene una gran falta de conciencia respecto a los hábitos de consumo en la población, no existe una verdadera estrategia del manejo del recurso y son escasos los programas dedicados a mejorar el aprovechamiento y la distribución del agua.

Dentro del panorama de Ciudad Universitaria se ha logrado determinar que aproximadamente el 50% del agua se desperdicia por la mala calidad de la red abastecedora y dentro de las entidades universitarias ya que las instalaciones se encuentran en un mal estado físico y se tiene una operación deficiente del sistema de distribución.

El presente trabajo se realizó con la intención de tener un modelo del sistema de distribución de agua para poder observar el comportamiento del proceso de abastecimiento dentro de Ciudad Universitaria, consiste en una simulación numérica y transitoria que considera los principales componentes de la red actual como son: pozos, tanques, tuberías y válvulas. Se proporcionó información a cada componente para que simulara el sistema de la manera más real posible, se proporcionó un patrón de demandas en el tiempo que representa los consumos promedios que se tienen a lo largo de la red durante las 24 hrs de un día.

Esta simulación depende totalmente de los datos proporcionados por PUMAGUA al inicio del proyecto y estos datos no son del todo correctos pues algunas de las características de cada uno de los componentes de la red podrían ser diferentes ya que debemos tomar en cuenta que la información acerca de las características reales de la red es muy pobre y no se tiene un registro 100% fiable del comportamiento de la red. Un claro ejemplo de esto son los diámetros y materiales de que están compuestas las tuberías ya que sólo se pueden observar en ciertos puntos y obtener las características reales de ellas y en todos los sectores donde es imposible seguir la tubería se tuvo que suponer que las características no cambian de un punto de observación a otro, esto no siempre es cierto y genera un error en la información que influye de manera directa en los resultados. Otro aspecto importante a tomar en cuenta es que algunos sectores de la red tienen una edad de aproximadamente 50 años y es difícil saber las condiciones actuales en esas zonas. A pesar de estos problemas se tuvo gran cuidado de cubrir la información necesaria para lograr una simulación exitosa del sistema donde se encontraron buenos valores de presiones, velocidades y flujos a lo largo de la red.

Las presiones obtenidas en los resultados se encuentran dentro del rango establecido según el Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable (MIE) el cual nos indica que para la optimización del sistema hidráulico de una red de distribución, a partir del punto de suministro de agua al sector, la red de distribución debe ser capaz de entregar el gasto demandado en cada nodo con presiones mayores a 1.0 bar y menores a 5.0 bares, tanto en las condiciones máxima demanda como en las condiciones de operación media y mínima. Más del 80% de los resultados obtenidos en la simulación se encuentran dentro de estos valores.

Esto es útil para llevar a cabo acciones tales como: mejorar los patrones de tiempo de cada una de las bombas, sustituir diámetros o materiales de tuberías según sea conveniente, utilizar distintos tipos de válvulas para mejorar las presiones en ciertos sectores de la red, e incluso, como ya se ha estado pretendiendo, separar la red en varios sectores y operarlos de manera independiente. Todos estos son proyectos ambiciosos que no se logran con facilidad, se necesita de un trabajo perfectamente planeado donde se prevean todas las dificultades que se presenten a lo largo del proceso.

Con la simulación actual es factible realizar variaciones en ciertos parámetros para analizar el comportamiento de la red de tubos antes de realizarlos en campo y así estar seguros de que las modificaciones propuestas actuarán en beneficio del funcionamiento de la red total sin perjudicar alguno de los sectores.

La modificación de los patrones de tiempo es un muy buen ejemplo de los beneficios que se logran por medio de la simulación en EPANET, de hecho ya se utilizó. Previamente en la simulación se cargó un patrón de tiempo que era muy pobre de información, sólo manejaba seis demandas distintas para 24 horas de operación esto limitaba los resultados que proporcionaba la simulación y por lo tanto no eran siquiera cercanos a la realidad. El patrón de tiempo que se utilizó para la simulación final maneja demandas distintas cada 10 minutos, es decir 144 demandas diferentes a lo largo de 24 horas, obviamente este patrón de basa en un estudio muy preciso proporcionado por PUMAGUA y como resultado se obtienen un comportamiento de la red que se aproxima mucho más a la realidad y que se puede tomar como base para realizar modificaciones a la red.

Así pues, si bien es posible utilizar la simulación en EPANET para tener un panorama general de las posibles reacciones en la red según alguna modificación propuesta tampoco es tan confiable como para ejercer acciones de gran magnitud sin necesidad de realizar un análisis previo de los parámetros registrados en el campo real.

Bibliografía

- *EPANET, versión 2.0, Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, US Environment Protection Agency. Cincinnati, Ohio*
- *Claudio Mataix. Mecánica de Fluidos Y Máquinas hidráulicas. Alfaomega OXFORD, Segunda Edición 1982, 660 p.*
- *Comisión Nacional del Agua. Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable. SEMARNAT, Edición 2009, 227 p.*
- *Bruce E. Larock, Roland W. Jeppson, Gary Z. Watters. Hydraulics of Pipeline Systems. CRS Press LLC. 2000, 532 p.*
- *Henry Liu. Pipeline Engineering. Lewis Publishers. 2003, 411 p.*
- *Antonio Capella Vizcaíno. EL PROBLEMA DE LAS FUGAS DE AGUA.*
- www.gits.ws/08cyd/pdfs/A3-DistribucionSanLuis.pdf
03-Enero-2011
- www.fagro.edu.uy/~hidrologia/.../HIDRAULICA%20en%20TUBERIAS.pdf
10-Diciembre-2010
- *Informe PUMAGUA 2008*
- <http://www.miliarium.com/prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.htm>