



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

***SIMULACIÓN MATEMÁTICA DE LA RED DE TUBERÍAS
DE AGUA POTABLE DE CIUDAD UNIVERSITARIA PARA
OPTIMIZAR EL PROCESO DE DISTRIBUCIÓN***

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

PRESENTA

JAVIER OMAR JIMÉNEZ FLORES

DIRECTOR DE TESIS

DR. MARTÍN SALINAS VÁZQUEZ



MÉXICO D.F.

2011

AGRADECIMIENTOS.

Este breve espacio es un pequeño homenaje a todos aquellos que han sido parte fundamental en mi vida y que han hecho posible la realización de este trabajo, a quienes solo me queda decirles con profundo afecto GRACIAS.

A Dios por ser el causante de todo y permitirme llegar a esta meta.

A mis padres, Margarita y Javier por brindarme su amor, su comprensión, su confianza y apoyo incondicional y ser los maestros más importantes en mi vida.

A mis hermanas Paulina y Adriana que supieron desde niño darme un gran ejemplo y cuidarme con cariño.

A mi Lupis, por su amor y apoyo que llegaron en el momento justo para ser parte fundamental en este logro. Mi más bella inspiración.

A mis abuelitos Paula y Ubaldo, que fueron como mis segundos padres y que siempre inculcaron en mi el ejemplo del trabajo y esfuerzo, a ellos un especial reconocimiento donde quiera que se encuentren.

A la UNAM, mi segunda casa, y a todos mis profesores que en las aulas de esta institución me dejaron valiosas enseñanzas, en especial al Dr. Martin Salinas Vázquez, mi asesor de tesis.

SIMULACIÓN MATEMÁTICA DE LA RED DE TUBERÍAS DE AGUA POTABLE DE CIUDAD UNIVERSITARIA PARA OPTIMIZAR EL PROCESO DE DISTRIBUCIÓN.

ÍNDICE

Agradecimientos.....	4
Capítulo 1: Introducción.....	5
1.1) Antecedentes.....	5
1.2) Planteamiento del problema.....	5
1.3) Características de la red de distribución de agua potable en Ciudad Universitaria.....	6
1.4) Objetivos y Alcance.....	13
1.5) Metodología.....	14
Capítulo 2: Teoría de cálculo y método de solución del programa Pipe Flow Expert.....	15
2.1) Tipos de Flujo.....	15
2.1.1) Viscosidad del fluido.....	16
2.1.2) Números de Reynolds.....	16
2.1.3) Factores de fricción.....	17
2.2) Pérdidas de carga.....	18
2.2.1) Cálculo de pérdida de carga por accesorios.....	18
2.2.2) Cálculo de pérdida total de presión.....	19
2.2.3) Líneas de energía y flujo.....	20
2.3) Estado de flujo equilibrado.....	21
2.3.1) Bucles, nodos y tuberías.....	22
2.3.2) Solución de valores desconocidos.....	23
2.3.3) Sistema de cálculo de tolerancias.....	23
2.4) Componentes del sistema.....	24
2.4.1) Válvula Reductora de Flujo.....	24
2.4.2) Válvula Reductora de Presión.....	25
2.4.3) Válvulas de control.....	28
2.4.4) Bombas.....	30
2.4.4.1) Bombas de caudal fijo.....	30
2.4.4.2) Bombas de carga fija/ de aumento de presión.....	31
2.4.4.3) Carga de Succión Positiva Neta Disponible.....	31
Capítulo 3: Simulación matemática.....	32
3.1) Modelación estática o de flujo permanente.....	33
3.2) Modelación dinámica o de flujo no permanente.....	33
3.3) Diseño del trazo de la red de distribución de agua potable de Ciudad Universitaria dentro del software Pipe Flow Expert.....	34
3.3.1) Características de tubos.....	36
3.3.2) Piezas especiales.....	38
3.3.3) Pozos de absorción.....	42
3.3.4) Tanques reguladores.....	42
3.3.5) Bombas.....	45
3.3.6) Altimetría.....	46

Capitulo 4: Análisis de resultados.	48
Conclusiones.	63
Bibliografía.	66

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.

1.1) Antecedentes

Desde el comienzo de la existencia del hombre, el agua ha jugado un factor vital para el origen y desarrollo de civilizaciones ante su presencia, no obstante también ha sido elemento de destrucción y grandes catástrofes en su ausencia.

El constante crecimiento y desarrollo de las poblaciones, aunado a un inminente cambio climático han propiciado un estado de escasees de agua mundial, razón por la cual cada vez más personas en los cinco continentes se ven involucradas en la realización de actividades de mejora del manejo y optimización de tan importante recurso.

Vemos con tristeza y preocupación como la tendencia de los problemas a causa de una mala planeación y a una actividad inmoderada del agua va en aumento. México es considerado como un país con baja disponibilidad del agua, pues solamente el 0.1% del agua dulce accesible del planeta se encuentra aquí. Existen zonas como el centro y el norte donde la situación se ha vuelto crítica debido que la cantidad de agua que se extrae de los mantos acuíferos es mayor a la que se recarga. Por ello, es de suma importancia concientizar a toda la población para actuar de manera responsable, para que en un futuro próximo el vital líquido no nos falte.

1.2) Planteamiento del problema.

En la actualidad se están tomando medidas para el uso y manejo eficiente del agua, tanto a nivel internacional como nacional, y en nuestra máxima casa de estudios no es la excepción. Desde el año 2007, por mandato del Consejo Universitario, se puso en marcha el PUMAGUA, Programa Universitario de uso eficiente del agua, no sólo como respuesta a los problemas asociados al crecimiento constante de sus instalaciones, sino también como ejemplo de hacer uso del conocimiento universitario en la solución de los problemas prioritarios del país. Dicho programa tiene tres objetivos principales a cumplir para el año 2011: reducir en un 50% el consumo de agua potable en CU; mejorar la calidad del agua potable y tratada para cumplir con las normas sanitarias más estrictas y lograr la participación de toda la comunidad universitaria.

Así pues, el correcto planteamiento de este proyecto y la solución de sus problemas conforme a consideraciones técnicas es absolutamente necesario como base para realizar una obra satisfactoria.

1.3) Características de la red de distribución de agua potable en Ciudad Universitaria.

La Ciudad Universitaria de la UNAM es un campus que da servicio a 132 000 personas, se encuentra ubicado en la zona sur del Distrito Federal y mide alrededor de 730 hectáreas. El sistema de distribución de agua potable en Ciudad Universitaria se divide principalmente en suministro, almacenamiento y distribución, a continuación se describe cada uno de los elementos que lo componen.

Suministro

El Campus Principal de la UNAM se abastece mediante tres pozos: Química, Multifamiliar y Vivero Alto; los cuales son de uso exclusivos 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. En la tabla siguiente se muestran las características principales de cada pozo.

Tabla 1.1. Características generales de los pozos en Ciudad Universitaria

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

Las bombas de los pozos Química y Multifamiliar son sumergibles a diferencia de la del pozo Vivero Alto que es vertical, el mantenimiento que reciben anualmente es de limpieza, y 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.

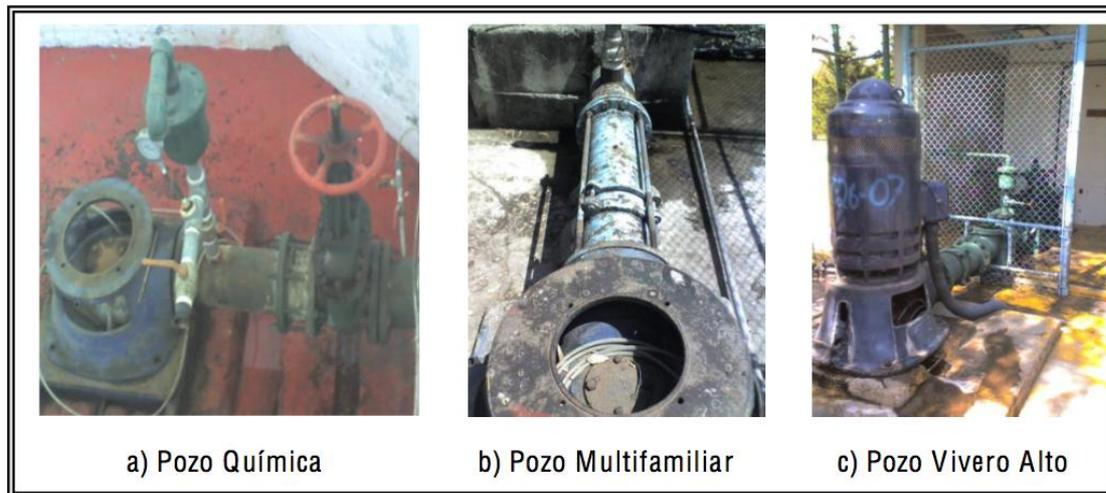


Figura 1. Bombas de los pozos de Ciudad Universitaria.

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.

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, en la siguiente tabla se muestra las características de los tanques y la capacidad de cada uno de ellos.

Tabla 1.2 Características generales de los tanques en Ciudad Universitaria

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

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 esta 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. A continuación se presenta un reporte fotográfico así como mapa de la ubicación de cada uno de ellos.



Figura 1.2. Tanques de almacenamiento en Ciudad Universitaria.

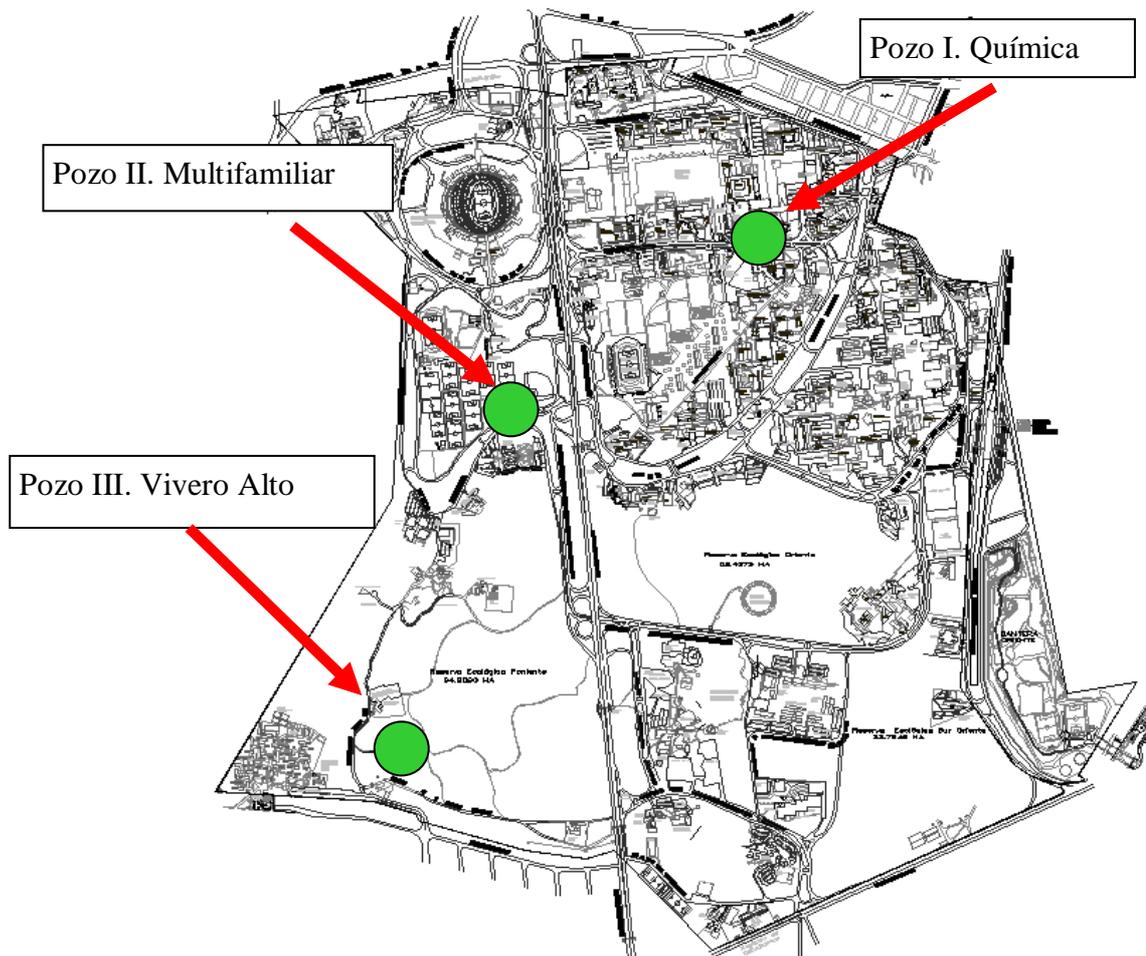


Figura 1.3. Mapa de la ubicación de los pozos en Ciudad Universitaria.

El 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.

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, 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 éstos 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.

Como ya se mencionó anteriormente, la población que se debe abastecer en Ciudad Universitaria es de 132,000 usuarios, los cuales se clasifican en personal académico, personal administrativo, personal docente, 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.

A continuación se presenta un plano de la configuración actual de la red realizado en Autocad, el cual muestra también el detalle de los materiales.

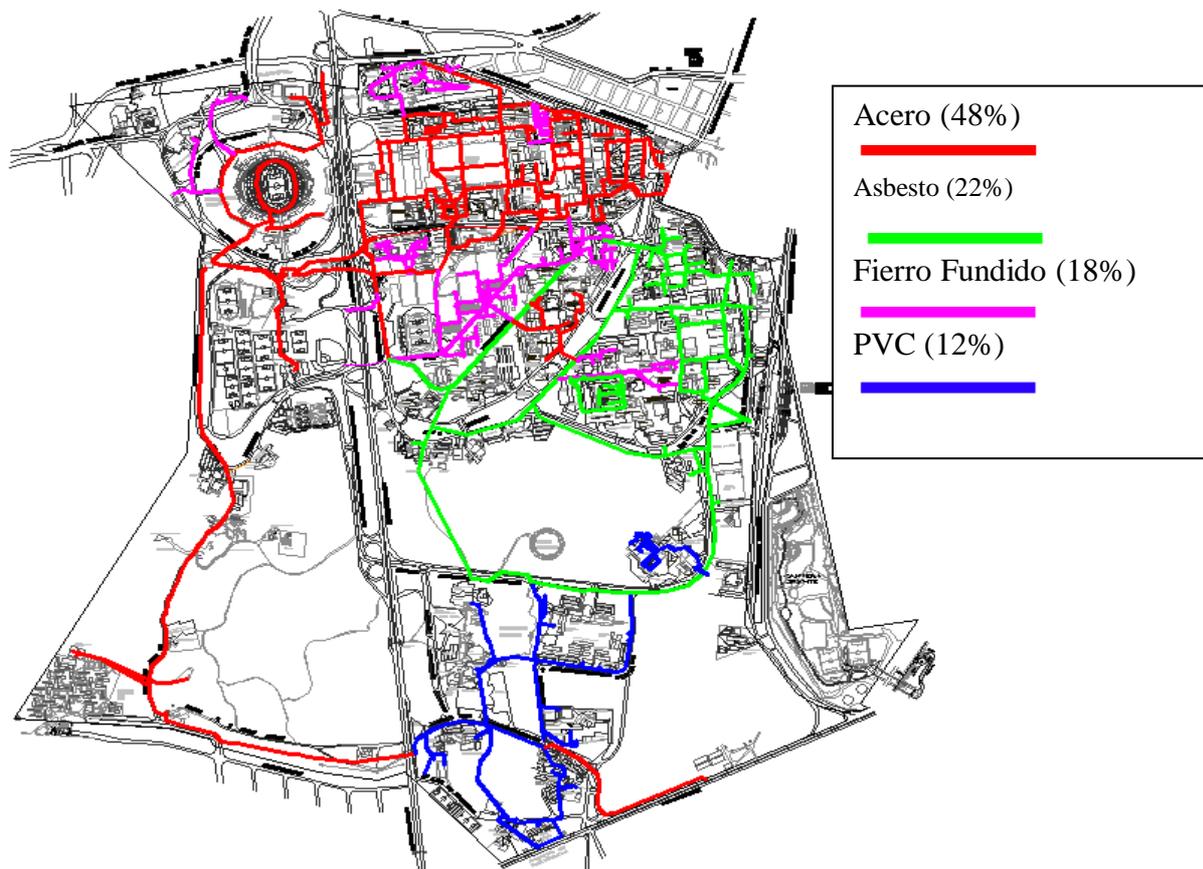


Figura 1.4. Materiales de la red.

El esquema básico de la red de distribución de Ciudad Universitaria es de tipo combinado, ya que incluye configuraciones cerradas (o circuitos) y abiertas. Cabe destacar que la configuración de la red se refiere a la red primaria, ya que es la que rige el funcionamiento hidráulico de la misma. Un circuito es un conjunto de tuberías conectadas en forma de polígono, donde el agua que parte de un punto puede volver al mismo después de fluir por las tuberías que lo componen. Cuando una red es cerrada (o tiene forma de malla), sus tuberías forman al menos un circuito. La ventaja de las redes cerradas es que en caso de falla, el agua puede tomar trayectorias alternas para abastecer una zona en particular de la red. Una desventaja de las mismas es que no es fácil localizar las fugas.

La red abierta, por el contrario, se compone de tuberías que se ramifican sin formar circuitos (forma de árbol). Esta configuración de la red se utiliza cuando la planimetría y la topografía son irregulares dificultando la formación de circuitos. Este tipo de red tiene desventajas debido a que en los extremos muertos pueden formarse crecimientos bacterianos y sedimentación; además, en caso de reparaciones se interrumpe el servicio más allá del punto de reparación; y en caso de ampliaciones, la presión en los extremos es baja.

Una red de distribución se divide en dos partes para determinar su funcionamiento hidráulico: la red primaria, que es la que rige el funcionamiento de la red, y la red secundaria o "de relleno".

La red primaria permite conducir el agua por medio de líneas troncales o principales y alimentar a las redes secundarias. El diámetro mínimo de las tuberías correspondientes a la red primaria en Ciudad Universitaria es de 100 mm (4") y en el caso de la red secundaria diámetros menores a este, los cuales constituyen los diámetros de las tomas.

La forma de distribución en Ciudad Universitaria es en forma "mixta" debido a que tanto se suministra agua por gravedad, así como por bombeo directo a la red. En la distribución por gravedad el agua de la fuente se conduce o bombea hasta un tanque desde el cual fluye por gravedad hacia las entidades. Este es el método más confiable y se utilizó para el caso de Ciudad Universitaria debido a que se dispone de cotas de terreno suficientemente altas para la ubicación de tanques de regularización, así como para asegurar las presiones requeridas en la red; sin embargo, en el caso de distribución por bombeo, son las bombas las que abastecen directamente a la red y la línea. Este es el sistema menos deseable pues al variar el consumo en la red, la presión en la misma cambia también. Así, al considerar esta variación, se requieren varias bombas para proporcionar el agua cuando sea necesario. Las variaciones de la presión suministrada por las bombas se transmiten directamente a la red, lo que puede aumentar el gasto perdido por las fugas. La experiencia de operación en México ha mostrado que esta forma de distribución no es adecuada.

De acuerdo con la información disponible, el consumo per cápita en Ciudad Universitaria es de 20 l/usuario/día, el servicio de agua potable se proporciona durante las 24 hrs del día los 365 días del año, la presión media en la red de distribución de Ciudad Universitaria es de 35 Kg/cm².

Los más de 50 años de operación de la red ponen en evidencia algunos problemas derivados del tiempo, como lo son las incrustaciones, además, la fluctuación de presiones con incrementa el desgaste de la tubería y la aparición de fugas en las zonas más bajas.

Con todo lo anterior, el suministro de agua dentro de CU pareciera que siempre esta garantizada, ello por la disponibilidad del vital líquido con el que se cuenta en los distintos recintos, donde podemos observar agua en abundancia en los baños y el riego constante de los jardines cuando no llueve. Los usuarios de los laboratorios en los institutos y centros de investigación, facultades

y demás dispositivos que para su funcionamiento requieren de agua, disponen siempre del líquido necesario. Y entonces se piensa que el problema del recurso hídrico no afecta a nuestro campus, cuando la realidad es otra.

En la red de distribución de CU se pierde alrededor del 50% del agua potable en fugas y alrededor de la cuarta parte del agua que entra a cada dependencia se desperdicia.

El manejo adecuado del agua, en el contexto de las instalaciones alojadas en los distintos Campus de la UNAM, requiere conocer con precisión las distintas variables del “balance hídrico”. Esto es, desde los caudales que ingresan a las redes de distribución, hasta los que se alimentan a cada una de las instalaciones y los que retornan en forma de aguas residuales al sistema de alcantarillado. Estos caudales están determinados a su vez por los patrones de uso (baños, cocinas, laboratorios, albercas, gimnasios, riego de jardines y otros), así como por las condiciones físicas de las redes de distribución y de las instalaciones hidráulicas de los edificios, mismas que explican la posible presencia de fugas.

El conjunto de acciones requeridas para establecer con precisión el balance hídrico, en cantidad y calidad, se conoce internacionalmente como “auditoría de agua”, misma que se sustenta en la medición continua y sistemática de las distintas variables que determinan el balance hídrico, incluidos los análisis y determinaciones de la calidad del agua potable y de las aguas residuales. Todo lo anterior, complementado con visitas técnicas, encuestas y entrevistas que permitan conocer con detalle la “tecnología de uso del agua” en las distintas instalaciones de la UNAM.

Nosotros como miembros de la comunidad universitaria debemos jugar un papel trascendental en la búsqueda de soluciones y alternativas a los problemas hídricos que atañen a nuestro recinto, de este modo, teniendo en cuenta lo anterior y metiéndome de lleno con la responsabilidad social que me corresponde, me doy a la labor de incorporarme a las actividades para hacer de nuestra Universidad un ejemplo nacional del trato óptimo que debe darse a tan preciada fuente de vida que es el agua.

1.4) Objetivos y alcance

Este trabajo tiene como finalidad, empleando distintas herramientas de análisis (software, métodos informáticos, instrumentación, técnicas analíticas) determinadas para el tratamiento de la información derivada del trabajo de campo y de las investigaciones de gabinete, la búsqueda

de soluciones integrales para la optimización de toda la red de suministro de agua dentro del campus, así como la implantación de tecnologías y prácticas mejoradas para satisfacer todas las necesidades de la comunidad universitaria, con menos agua y con la calidad adecuada.

1.5) Metodología.

Se realizó la simulación de toda la red de distribución de agua potable en el software PipeFlow con los datos de investigación de campo que anteriormente se habían recolectado. Se dotó a la simulación con todas las características y especificaciones de la información mencionada, se corrió una primera simulación y se prosiguió a la interpretación de resultados arrojados por el software.

Una vez analizada la información se tomaron en cuenta distintas consideraciones para mejorar el diseño de la red, por ejemplo, la sectorización de la red así como la adición de accesorios que ayudarían homogeneizar la presión en los distintos sectores, se verificaron los sectores con mayor número de problemas y se dio paso a la toma de decisiones para combatirlos. Al tener establecidas las medidas a tomar, se generaron las opciones para la optimización de la red y éstas se incluyeron en una nueva simulación, dando lugar a un marco de comparación entre el estado de la red original y el estado de la red que se desea con la aplicación de las nuevas modificaciones que se incluyeron en la segunda simulación.

Capítulo 2. TEORIA DE CÁLCULO Y MÉTODO DE SOLUCION

Para llevar a cabo la simulación de la red de agua de Ciudad Universitaria se empleó el software especializado Pipe Flow Expert, el cual permite dibujar un sistema complejo de tuberías y analizar sus características cuando el caudal se está produciendo. Pipe Flow Expert Expert calcula el flujo balanceado continuo y las condiciones de presión del sistema, permitiendo así obtener un reporte de resultados que incluye los caudales para cada tubería, las velocidades del fluido en cada tubería, los números de Reynolds, los factores de fricción, pérdidas de presión por fricción en cada una de las tuberías, accesorios, pérdidas de presiones, presión en los puntos de unión (nodos), puntos de operación de bombas, etc.

El sistema de tuberías es modelado mediante la representación de los puntos de unión y las conexiones con las tuberías en un panel de dibujo. Las tuberías pueden colocarse siguiendo líneas verticales, horizontales y diagonales para conectar un nodo con otro.

Entonces, los datos físicos del sistema se incorporan, y estos incluyen usualmente:

- Diámetro interno, rugosidad interna y longitud de cada una de las tuberías conectadas.
- Elevación de cada uno de los puntos de conexión (nodos).
- El flujo de entrada y el flujo de salida en cada nodo (si así se requiere)
- La elevación, nivel de líquido y presión superficial para cada tanque.
- Los datos de funcionamiento para cada bomba.

2.1) Tipos de flujo.

Fluidos en movimiento están sujetos a varias fuerzas de resistencia, que son debido a la fricción. La fricción puede ocurrir entre el fluido y la tubería de trabajo, pero la fricción también ocurre dentro del fluido como el deslizamiento entre las capas adyacentes de éste.

La fricción dentro del fluido es debido a la viscosidad de éste. Cuando los fluidos tienen una viscosidad alta, la velocidad del flujo tiende a ser baja, y la resistencia a fluir llega a ser casi totalmente dependiente de la viscosidad del fluido. Esta condición es conocida como “Flujo laminar”.

Los fluidos que tienen una baja viscosidad son usualmente movidos a altas velocidades. Las características del flujo cambian, pequeños remolinos ocurren dentro de la corriente, y la fricción entre la tubería de trabajo y el fluido llega a ser un factor de consideración. Este tipo de flujo es conocido como “Flujo turbulento”

2.1.1) Viscosidad del fluido.

La viscosidad del fluido puede ser descrita por su viscosidad dinámica (algunas veces llamada viscosidad absoluta) o su viscosidad cinemática. Estas dos expresiones de la viscosidad no son las mismas pero se relacionan mediante la densidad del fluido.

$$\text{Viscosidad Cinemática} = \frac{\text{Viscosidad Dinámica}}{\text{Densidad del fluido}}$$

Viscosidad Dinámica

Agua @ 20 °C tiene una viscosidad de 1.00×10^{-3} Pa·s ó 1.00 Centipoise

Viscosidad Cinemática.

Agua @ 20 °C tiene una viscosidad de 1.004×10^{-6} m²/s ó 1.004 Centistokes.

El software Pipe Flow Expert cuenta para el análisis con una base de datos de viscosidades y densidades de los fluidos más comunes.

2.1.2) Números de Reynolds.

El número de Reynolds (Re) describe la relación entre la velocidad del fluido, el diámetro interno de la tubería y la viscosidad cinemática del fluido.

$$\text{Número de Reynolds} = \frac{\text{Velocidad del fluido} \times \text{Diámetro interno de la tubería}}{\text{Viscosidad Cinemática}}$$

Nota: La Viscosidad Cinemática (no Viscosidad Dinámica) debe ser usada para calcular el número de Reynolds. Generalmente es aceptado que el punto de transición entre el flujo laminar y el flujo turbulento, en una tubería circular, ocurre cuando el número de Reynolds (Re) es aproximadamente 2100.

Es decir. El Flujo laminar ocurre cuando el Re es menor que 2100. El Flujo turbulento ocurre cuando el Re es mayor que 2100.

2.1.3) Factores de fricción.

Muchas fórmulas han sido desarrolladas para modelar el flujo de los fluidos. La formula Hazen-Williams ha sido un popular método para la estimación de la pérdida de carga en sistema de tuberías para un número de años. Sin embargo, esta fórmula empírica solo ofrece una precisión razonable si el fluido es agua a 15.5 °C o similar. Por lo tanto, la fórmula Hazen-Williams no es útil en el análisis de un sistema complejo de tuberías.

La fórmula de Colebrook-White se puede utilizar con confianza para calcular un factor de fricción exacto aplicable al flujo turbulento en fluidos. La fórmula de Colebrook-White es aplicable en una amplia gama de densidades de líquidos y viscosidades, siempre que el flujo del fluido sea turbulento.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log_{10} \left(\frac{e}{D} + \frac{9.35}{\text{Re} \sqrt{f}} \right)$$

f = factor de fricción.

e = rugosidad interna de la tubería.

D = diámetro interno de la tubería.

Re = número de Reynolds

Los factores de fricción para flujo turbulento calculado por Pipe Flow Expert están basados en la formula Colebrook-White.

El factor de fricción para flujo laminar se calcula a partir de

$$f = \frac{64}{\text{Re}}$$

2.2) Pérdidas de carga.

Las pérdidas de flujo son usualmente expresadas en la carga hidráulica. Esto es la altura de una columna de fluido que ejercería suficiente presión en el fluido en la parte inferior de la columna para hacer que el fluido fluya dentro del sistema.

Si el nivel del fluido (carga hidráulica) se incrementa en un contenedor de suministro, el volumen de fluido entrando en el sistema, desde el recipiente de suministro, se incrementará debido al aumento de presión (fuerza).

Las pérdidas de carga pueden ser calculadas mediante el uso de la fórmula de Darcy-Weisbach.

$$h_{\text{fluido}} = f \left(\frac{L}{D} \right) \times \left(\frac{v}{2g} \right)$$

f = factor de fricción

L = longitud de la tubería de trabajo

D = diámetro interno de la tubería de trabajo

v = velocidad del fluido

g = aceleración debido a la gravedad

Las pérdidas por carga hidráulica calculadas por Pipe Flow Expert están basadas en la fórmula de Darcy-Weisbach.

2.2.1) Cálculo de pérdidas de carga por accesorios.

La resistencia de la carga hidráulica a través de varios accesorios de las tuberías de trabajo puede ser calculada si el factor 'K' de los accesorios es conocido. Muchos fabricantes de accesorios para tuberías y válvulas publican los factores 'K' para sus productos.

La pérdida de carga hidráulica de estos accesorios pueden ser calculados a partir de:

$$h_{\text{fluido}} = \frac{K \times v}{2g}$$

'K'= factor 'K' publicado por el fabricante para el accesorio

v= velocidad del fluido

g= aceleración debido a la gravedad

En muchos sistemas donde las longitudes de las tuberías son relativamente grandes, el efecto de las pérdidas por accesorios puede ser considerado como una pérdida menor, y podría ser ignorada durante una evaluación inicial.

Si una válvula parcialmente abierta es parte del diseño, el efecto de la válvula debe ser siempre considerada ya que las pérdidas por válvula pueden ser grandes.

Pipe Flow Expert tiene una base de datos para válvulas y factores 'K' de accesorios, además de contar con asistentes de cálculo para:

Ampliaciones graduales

Contracciones graduales

Ampliaciones repentinas

Contracciones repentinas

Entradas redondeadas

Curvas de tubos largos.

2.2.2) Cálculo de pérdida total de presión.

La resistencia de la carga hidráulica puede también ser expresada en forma de presión.

Unidades métricas.

$$\text{bar} = \frac{h_{\text{fluido}} \times \rho \times g}{100000}$$

h= pérdida de carga [m]

ρ = densidad del fluido [kg/m³]

g= aceleración debido a la gravedad [m/s²]

2.2.3) Líneas de Energía y Flujo

Las Líneas de Energía y Flujo (LEF) son la representación gráfica de la suma de los tres términos de la ecuación de Trabajo-Energía ó del Teorema de Bernoulli:

Carga hidráulica = Energía Cinética + Energía de Flujo + Energía Potencial

$$LPE = \frac{v}{2g} + \frac{P}{\gamma} + \text{elevación}$$

v = elevación

g = aceleración debida a a gravedad

P = presión

γ = densidad

La Línea de altura Piezométrica Hidráulica (LPH) es la representación gráfica de la suma de dos de los términos del Teorema de Bernoulli:

Carga hidráulica = Energía de Flujo + Energía Potencial.

$$LPH = \frac{P}{\gamma} + \text{elevación}$$

P = presión

γ = densidad del fluido

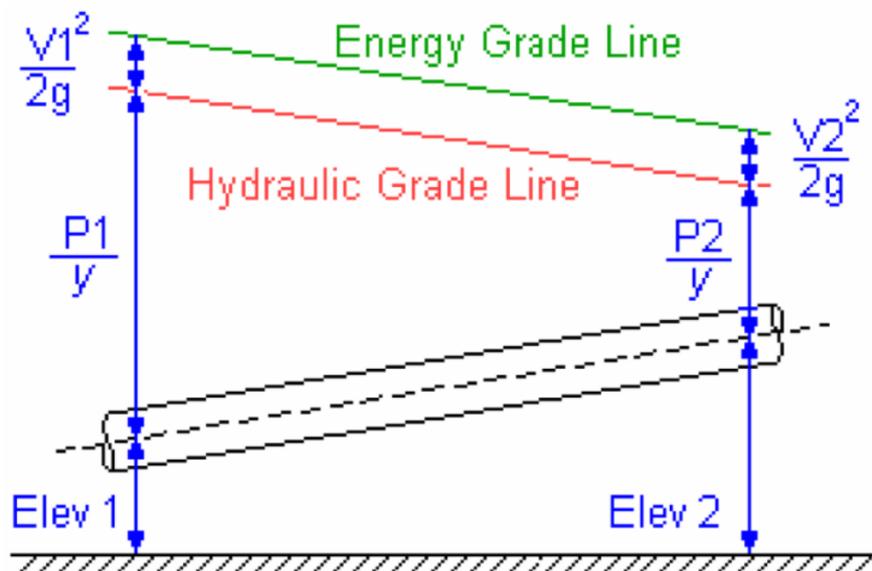


Figura 2.1. Línea Piezométrica Hidráulica

2.2.3) Estado de flujo equilibrado.

El análisis de red se basa en dos principios fundamentales:

El flujo másico que entra en un nodo de la red, debe ser igual al flujo másico que sale de del nodo. Asumiendo que la densidad del fluido no cambia, el flujo total que entra en el nodo debe igualarse al flujo total que sale de dicho nodo.

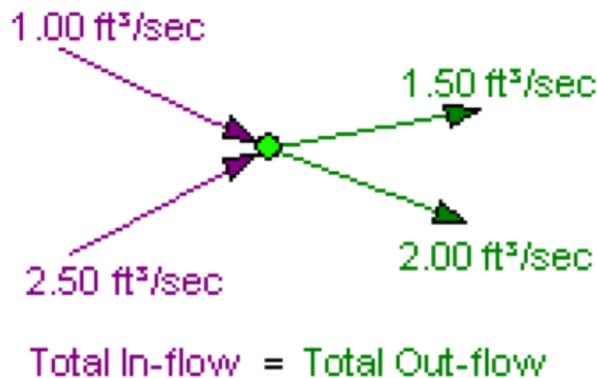


Figura 1.2. Balance de flujo en un punto de unión (nodo).

La caída de presión en las tuberías alrededor de un bucle debe ser igual a cero. En un bucle de recirculación, la pérdida de presión en cada tubería debe ser el total de la energía de la carga hidráulica suministrada por una fuerza motriz (normalmente una bomba). En un bucle donde los flujos están en direcciones opuestas, la pérdida de presión total en cada tubo con flujo en sentido horario debe igualarse a la pérdida de presión total en cada tubo flujo antihorario.

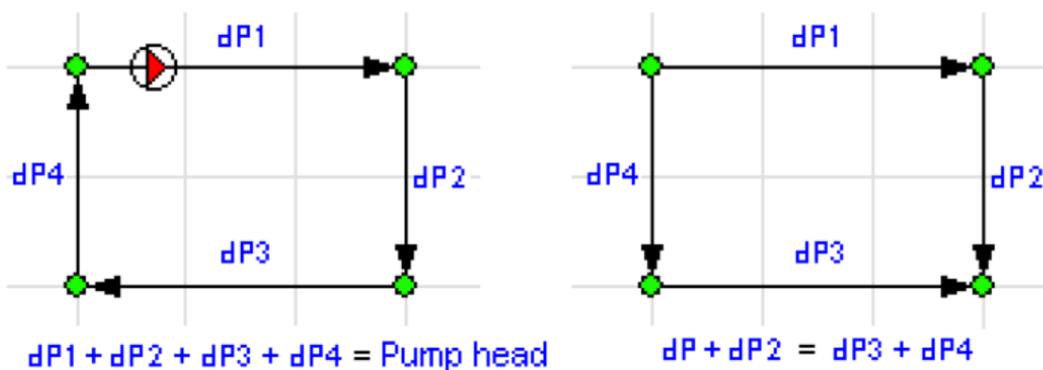


Figura 2.3. Balance de presión alrededor de un circuito.

2.3.1) Bucles, nodos y tuberías.

Para resolver las incógnitas en cualquier red de tuberías, un sistema de ecuaciones no lineales debe ser desarrollado para describir matemáticamente la red de ductos en términos de los flujos y presiones que deben balancearse en puntos específicos dentro del sistema. Estas ecuaciones deben ser resueltas simultáneamente con el fin de encontrar una solución equilibrada.

Los bucles dentro de una red consisten en una serie de tubos conectados que regresan al punto inicial (el nodo donde el circuito comienza), sin embargo, pseudo bucles pueden existir entre una fuente de suministro o una fuente de descarga, entre dos fuentes de suministro o entre dos fuentes de descarga.

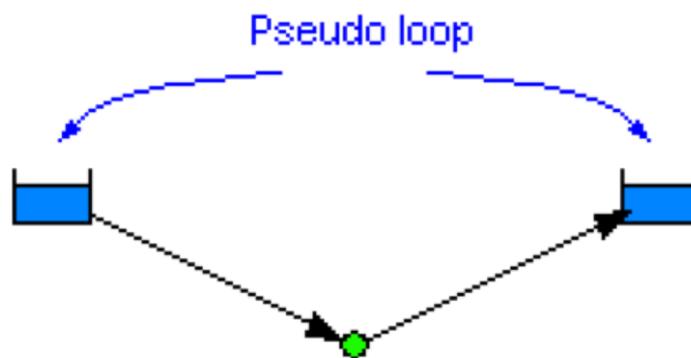


Figura 2.2. Pseudo bucles.

Una serie de ecuaciones de presión describiendo la pérdida de presión en cada bucle debe ser generada. La misma tubería puede ser incluida en muchos diferentes circuitos.

Cuando un bucle incluye distintas zonas de fluidos, las diferencias de elevación de los nodos y la densidad del fluido en cada tubería, a lo largo de la ruta en el circuito, deben ser usadas para establecer las diferencias de presiones debido a la densidad del fluido en los puntos extremos del bucle. Esta diferencia de presión es utilizada conjuntamente con la diferencia de presión superficial del fluido para establecer la diferencia de presión neta alrededor del bucle.

Una serie de ecuaciones de continuidad de flujo másico debe ser generada para el balance de flujo de masa en cada nodo en el sistema de tuberías.

El software de Pipe Flow Expert automáticamente analiza un sistema, identifica todos los bucles y pseudo bucles, genera las ecuaciones de presión en toda la red, y remueve las ecuaciones redundantes (aquellas que están ya completamente descritas mediante la combinación de otras ecuaciones). También genera las ecuaciones de balance de flujo másico para cada nodo en el sistema de tuberías.

2.3.2) Solución de valores desconocidos.

El programa Pipe Flow Expert genera estimaciones iniciales para el caudal en cada punto de salida en el sistema de tuberías. Las pérdidas de presión dentro del sistema son calculadas usando factores de fricción obtenidos a partir de la ecuación de Colebrook-White, y las pérdidas de presión por fricción para cada tubo se obtiene mediante la ecuación de Darcy-Weisbach. Las estimaciones iniciales son poco probables que den un resultado balanceado de las presiones en todo el sistema, por lo que se deben ajustar usando una variación en el método de Newton para converger a un resultado final donde todos los caudales y presiones dentro del sistema estén balanceados. Pipe Flow Expert define los elementos del sistema de tuberías en una serie de ecuaciones matriciales no lineales. Una vez que una solución aproximada se obtiene, los resultados se redefinen usando una variación en el algoritmo del método de Newton para garantizar la convergencia de éstos hacia un resultado balanceado en cuanto a flujos y presiones.

2.3.1) Sistema de cálculo de tolerancias.

Pipe Flow Expert utiliza un acercamiento de dos etapas para calcular un estado de equilibrio de flujo constante para un sistema.

Una solución inicial aproximada se obtiene usando métodos teóricos lineales y un acercamiento iterativo para ajustar el caudal hasta que un balance de presión aproximado es logrado.

Una aproximación alternativa es utilizar estimaciones para las salidas de flujo y usar estas estimaciones para establecer un caudal inicial en cada tubo con el total de flujo de entrada para cada nodo igualando el total del flujo de salida de cada nodo. Las estimaciones de flujo iniciales tienen pocas probabilidades de dar un resultado de presión balanceado de todo el sistema y debe ser refinado usando un método de aproximación iterativo para ajustar el caudal hasta que un balance aproximado de presión sea conseguido.

Pipe Flow Expert define los elementos del sistema de tuberías en una serie de ecuaciones matriciales y utiliza el método de Newton para ajustar las estimaciones para el caudal en cada tubo.

Una vez que una solución aproximada ha sido obtenida, los resultados son refinados usando un variación del método de Newton para garantizar la convergencia hasta que un resultado de presión balanceado sea obtenido.

Una tolerancia del balance de flujo y una tolerancia del balance de presión se usan para permitir al software Pipe Flow Expert encontrar rápidamente una solución aproximada. Esta solución aproximada es posteriormente refinada hasta que el sistema es resuelto dentro de la tolerancia del balance de presión final.

Las tolerancias para el balance de flujo y de presión, así como el máximo número de iteraciones permitidas, han sido cuidadosamente seleccionadas para ofrecer el mejor desempeño global en la búsqueda de una solución. Es recomendable que estos valores no sean cambiados, como la mayoría de los sistemas, resolverá sin ajuste a estos parámetros.

2.4) Componentes del sistema.

Es posible proporcionar información del caudal y la pérdida de carga acerca de un componente que será incluido en el sistema de tuberías. Pipe Flow Expert genera una curva de rendimiento para dicho componente, la cual permitirá que el efecto de éste sea modelado.

2.4.1) Válvula de Control de Flujo

Las válvulas de control de flujo permiten configurar un caudal en un tubo en particular. El programa Pipe Flow Expert remueve el tubo del sistema y ajusta una demanda de flujo de salida en el “nodo de origen” y una demanda de flujo de entrada igual en el “nodo de destino”. En consecuencia, el tubo es remplazado por esas demandas de flujo mientras que el sistema esta siendo resuelto.

Ningún otro tubo que conecte a un tubo con una válvula de control de flujo instalada puede contener una válvula de control.

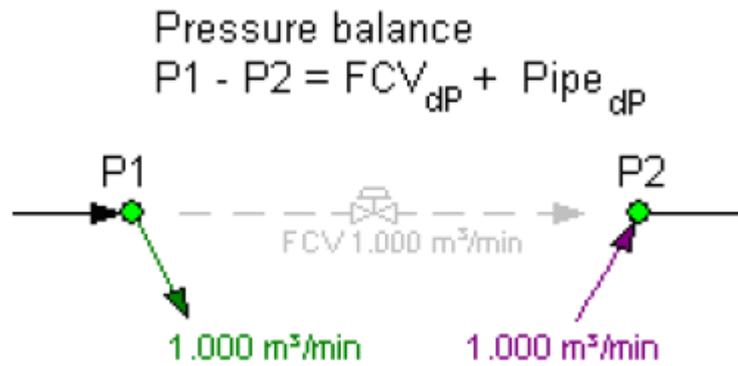


Figura 2.5. Reposición de válvula de control de flujo

La diferencia de presión entre el “nodo de origen” y el “nodo de destino” debe ser igual a la pérdida de presión introducida por la válvula de control de flujo, más la pérdida de presión que el flujo en el tubo producirá, más la pérdida de presión que cualquier otro componente produzca en la tubería. El balance del sistema se mantendrá cuando el tubo sea reintegrado junto con la pérdida de presión introducida por la válvula de control de flujo.

Si la diferencia de presión entre el “nodo de origen” y el “nodo de destino” no es lo suficientemente grande, entonces la pérdida de presión en la tubería y la pérdida de presión de la válvula de control de flujo no pueden ser establecidas. Una advertencia es desplegada con la leyenda de que la presión en la tubería no es suficiente para suministrar el caudal establecido.

2.4.2) Válvula Reductora de presión.

Este tipo de válvulas permite configurar la presión en el aguas abajo de la válvula, es decir, en el extremo del tubo. Las Válvulas Reductoras de Presión (VRP) introducen una pérdida de presión adicional en la tubería, para controlar la presión en el nodo descendente de la válvula con el valor especificado que se le haya asignado.

Una tubería equipada con una VRP no puede tener un tanque o una demanda de presión colocados en cualquiera de sus extremos. Ningún otro tubo que conecte con un tubo con una VRP puede contener una válvula de control.

Pipe Flow Expert remueve el tubo del sistema y establece la presión en el nodo descendente (P2) sustituyéndolo por un tanque definido apropiadamente. Se configura la elevación del tanque para igualar la elevación del nodo, se plantea el nivel de líquido en cero y la presión de la superficie del fluido se establece al ajuste de la Válvula Reductora de Presión. En el nodo aguasarriba una demanda de flujo saliente es entonces igual al flujo proveniente de P2. Por lo tanto el tubo es reemplazado por un tanque en el nodo descendente y un flujo de salida en el nodo ascendente mientras el sistema esta siendo resuelto. La salida en el nodo ascendente debe ser igual al caudal proveniente del nodo descendente que es ahora representado por el tanque.

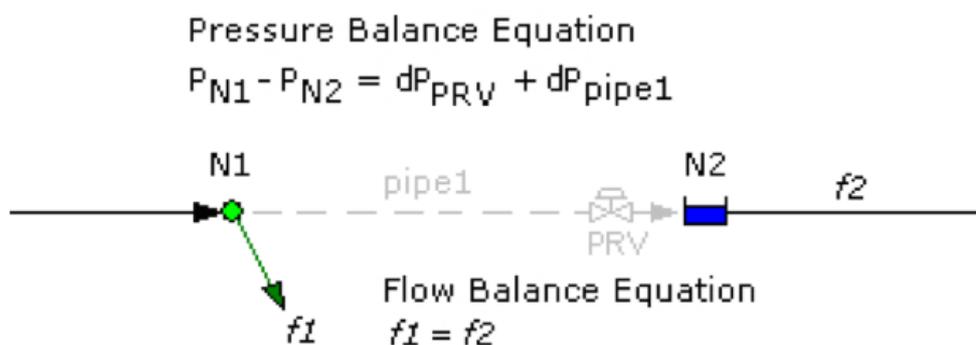


Figura 2.6. Reemplazo de Válvula Reductora de Presión.

La diferencia de presión entre el nodo ascendente P1 y el nodo descendente P2 debe ser igual a la pérdida de presión a través de la tubería, los accesorios y los componentes de la tubería más la pérdida de presión introducida por la VRP. El balance de presión es entonces mantenido después que el sistema es resuelto, cuando el tubo es reintegrado con la pérdida de presión introducida por la VRP.

Modos de operación: Una VRP puede operar bajo tres diferentes condiciones: (1) regulación, (2) completamente cerrada y (3) completamente abierta. El cómo opera la válvula depende del valor definido de la presión establecida para ésta. Las posiciones de completamente abierta y completamente cerrada representan las operaciones extremas de la válvula. A continuación se describe cada una de las posiciones de válvula.

Regulación. La válvula mantiene la presión aguas abajo hacia el valor fijado por la introducción de una pérdida de presión a través de la válvula, logrando así el estrangulamiento del caudal a través de la VRP.

Completamente cerrada. Este modo de operación ocurre si la presión establecida para la válvula es menor que la presión aguas abajo de ésta para el caso donde la válvula está cerrada. Cuando esto ocurre en un sistema de tuberías real, el flujo a través de la VRP se invierte y la VRP actúa como una válvula check, cerrando la tubería. Dentro del software, este método de operación es detectado y reportado, pero el sistema no es resuelto para este escenario. Se debe decidir si este método de operación es el que se tiene previsto y si es el caso, podemos cerrar la tubería y continuar para resolver el sistema.

Completamente abierta. Este modo de operación ocurre si la presión establecida en la válvula es mayor que la presión aguas abajo de ésta, para el caso donde la válvula es totalmente abierta. Cuando esto ocurre en un sistema real, la VRP mantiene una posición totalmente abierta y no tiene efectos en las condiciones de flujo (excepto para añadir una pérdida por fricción a través de la válvula). Dentro de Pipe Flow Expert, este método de operación es detectado y reportado. Pero el sistema no es resuelto porque el diferencial de presión a través de la válvula tendría que ser negativa, es decir, la válvula estaría actuando como una bomba y no como un control de presión.

Pipe Flow Expert solo resolverá un sistema cuando la VRP esté operando en el modo de Regulación.

Para evitar problemas de operación con la VRP se debe encontrar el rango de regulación de presión para la válvula. Primero, resolver el sistema sin el control de la VRP y observar la presión en el nodo descendente del tubo que previamente tenía la VRP. Esta es la máxima presión que puede fijarse en la VRP. En segundo lugar, resolver el sistema después del cierre de la tubería que contiene la VRP y observar la presión en el nodo descendente de la tubería cerrada. Esta es la mínima presión que puede ser configurada en la VRP.

2.4.3) Válvula de Control

Las válvulas de Control permiten establecer una presión en un nodo ascendente de la válvula (al comienzo del tubo). Las Válvulas de Control (VC) introducen una pérdida de presión adicional en la tubería, para controlar la presión en dicho nodo al valor que requiramos.

Una tubería equipada con una Válvula de Control no puede tener un tanque o una demanda de presión colocados en cualquiera de sus extremos. Ningún otro tubo que conecte con un tubo con una VC puede contener una válvula de control.

Pipe Flow Expert remueve el tubo del sistema y establece la presión en el nodo ascendente (P1) sustituyéndolo por un tanque definido apropiadamente. Se configura la elevación del tanque para igualar la elevación del nodo, se plantea el nivel de líquido en cero y la presión de la superficie del fluido se establece al ajuste de la Válvula de Control. En el nodo descendente, la demanda del flujo de salida es entonces igual al flujo en P1. Por lo tanto el tubo es reemplazado por un tanque en el nodo ascendente y un flujo de entrada en el nodo descendente, mientras el sistema está siendo resuelto. El flujo de entrada en el nodo descendente debe ser igual al caudal dentro del nodo ascendente que es ahora representado por un tanque presurizado.

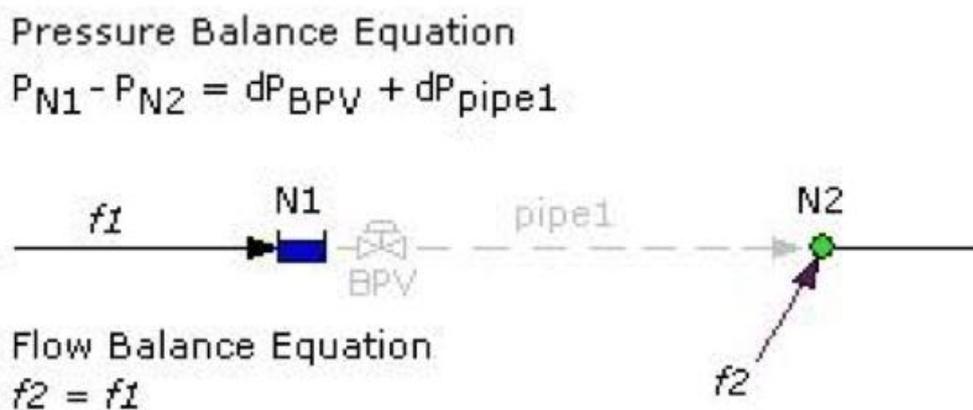


Figure 2.7. Reemplazo de válvula de control.

La diferencia de presión entre el nodo ascendente P1 y el nodo descendente P2 debe ser igual a la pérdida de presión a través de la tubería, los accesorios y los componentes de la tubería más la pérdida de presión introducida por la VC. El balance de presión es entonces mantenido después

que el sistema es resuelto, cuando el tubo es reintegrado con la pérdida de presión introducida por la VC.

Modos de operación: Una VR puede operar bajo tres diferentes condiciones: (1) regulación, (2) completamente cerrada y (3) completamente abierta. El cómo opera la válvula depende del valor definido de la presión establecida para ésta. Las posiciones de completamente abierta y completamente cerrada representan las operaciones extremas de la válvula. A continuación se describe cada una de las posiciones de válvula.

Regulación. La válvula mantiene la presión de salida hacia el valor fijado introduciendo una pérdida de presión a través de la válvula, logrando así la reducción del caudal a través de la VC.

Completamente cerrada. Este modo de operación ocurre si la presión establecida para la válvula es mayor que la presión de entrada de ésta para el caso donde la válvula esta cerrada. Cuando esto ocurre en un sistema de tubería real, el flujo a través de la VC se invierte y la VC actúa como una válvula check, cerrando la tubería. Dentro del software, este método de operación es detectado y reportado, pero el sistema no es resuelto para este escenario. Se debe decidir si este método de operación es el que se tiene previsto y si es el caso, podemos cerrar la tubería y continuar para resolver el sistema.

Completamente abierta. Este modo de operación ocurre si la presión establecida en la válvula es menor que la presión de salida de ésta, para el caso donde la válvula es totalmente abierta. Cuando esto ocurre en un sistema real, la VR mantiene una posición totalmente abierta y no tiene efectos en las condiciones de flujo (excepto para añadir una pérdida por fricción a través de la válvula). Dentro de Pipe Flow Expert, este método de operación es detectado y reportado. Pero el sistema no es resuelto porque el diferencial de presión a través de la válvula tendría que ser negativa, es decir, la válvula estaría actuando como una bomba y no como un control de presión.

Pipe Flow Expert solo resolverá un sistema cuando la VR esté operando en el modo de Regulación.

Para evitar problemas de operación con VRP se debe encontrar el rango de regulación de presión para la válvula y especificando la presión establecida hacia un valor dentro de este rango tal que el modo de operación sea de Regulación. Primero, resolver el sistema sin el control de la VC y observar la presión en el nodo ascendente del tubo que previamente tenía la VR. Esta es la

mínima presión que puede fijarse en la VC. En segundo lugar, resolver el sistema después del cierre de la tubería que contiene la VC y observar la presión en el nodo ascendente de la tubería cerrada. Esta es la máxima presión que puede ser configurada en la VC.

2.4.4) Bombas (Con curva Caudal vs Carga)

Es posible incorporar información del caudal y pérdida de carga acerca de una bomba que se requiera utilizar en el sistema de tuberías. Pipe Flow Expert genera la curva de rendimiento de la bomba para permitir que el comportamiento de ésta sea modelado como parte del sistema de tuberías.

2.4.4.1) Bombas de caudal fijo.

Se puede optar por introducir un caudal fijo para una bomba. Esta situación puede ocurrir cuando la distribución del flujo natural de las diferentes partes de la red ha sido determinada, o cuando el sistema tiene una bomba de velocidad variable que se ha establecido para producir un caudal determinado. La bomba de caudal fijo es modelada en forma similar a la válvula de control de flujo descrito anteriormente. El software quita el tubo en el que se monta la bomba y establece una demanda de flujo de salida en el “nodo de origen” y una demanda igual de flujo de entrada en el “nodo de destino”. La tubería y la bomba se sustituyen por estas demandas de flujo, mientras el sistema está siendo resuelto.



Figure 2.8. Reemplazo de la Bomba de Caudal Fijo.

Dado que la presión de carga proporcionada por la bomba es desconocida, el equilibrio del sistema no se puede concertar iterando a lo largo de la curva de rendimiento de la bomba. Por esta razón, no es posible incluir dispositivos de control de presión, tales como válvulas de control de flujo, en todas las rutas de salida a través del sistema cuando una bomba de caudal fijo ha sido seleccionada (esto daría lugar a un sistema sobrecontrolado)

2.4.4.2) Bombas de carga fija/de aumento de presión.

Es posible optar por incorporar una bomba de carga fija o de aumento de presión. Esta situación puede ser útil cuando se trata de estimar la carga de la bomba necesaria para producir la distribución del flujo a diferentes partes de la red, donde la curva de caudal de la bomba vs carga no se ha establecido. Los caudales se establecen por medio de válvulas de control de flujo en las ramas de salida. La carga de la bomba mínima se determina restando la menor presión introducida por las válvulas de control de flujo, de la carga fija suministrada por la bomba.

2.4.4.3) Carga de succión positiva neta disponible.

Pipe Flow Expert es capaz de calcular la presión disponible en una entrada de la bomba. Esta presión cambia si la posición de montaje de la bomba a lo largo de una tubería se modifica. La presión de vapor del líquido que se bombea se resta de la presión de entrada de la bomba para obtener la Carga de Succión Positiva Neta disponible. La CSPNd debe ser mayor que la CSPNd de la bomba suministrado por el fabricante (requerimiento de carga de succión positiva neta para el caudal) para prevenir la formación de burbujas de gas en el líquido.

Capítulo 3. SIMULACIÓN MATEMÁTICA.

Los modelos de simulación matemática se toman como base para llevar a cabo el cálculo hidráulico de los distintos estados que se producen dentro de una red de distribución. De estas simulaciones se extrae información útil que es considerada para el proceso de planificación, operación y gestión de la red. Si contamos con los datos necesarios, podemos tener resuelto el problema del análisis mediante la implementación de programas de cómputo, sin embargo esto no ocurre en la mayoría de las ocasiones. Podríamos reducir considerablemente dicho problema al tener una red nueva, debido a que la información requerida para el análisis provendría de los factores de diseño, no obstante, al tener una red en servicio, como lo es la de Ciudad Universitaria, las dificultades se incrementan.

Bajo este marco de operación, los parámetros con los que se proyectó la red son modificados por el propio funcionamiento de ésta. El conocimiento de qué parámetros y las circunstancias que hacen que varíen son fundamentales en el momento de estimarlos. En términos generales, el modelo se alimenta con los siguientes datos:

1. Datos de la infraestructura hidráulica:

- Trazo de la red
- Altimetría
- Material y diámetro de las tuberías
- Tanques (elevación y dimensiones)
- Válvulas: tipo y estado (cerrada, semiabierta o abierta)
- Bombas

2. Datos operacionales:

- Itinerario de operación de las bombas
- Tandeos
- Demanda de agua potable

Gran parte de esta información se tomó del catastro de la infraestructura y de mediciones de campo realizadas previamente.

Existen dos tipos de modelación: estática y dinámica.

3.1) Modelación Estática o de flujo permanente

En este tipo de modelos se supone que los caudales demandados e inyectados permanecen constantes respecto al tiempo, no existen variaciones en la operación en la red, y el nivel en los tanques es fijo. Es cierto que las redes de distribución de agua potable no permanecen invariables a lo largo del tiempo, no obstante esta clase de modelos se emplean frecuentemente para analizar el comportamiento de la red con los caudales máximos horarios, y así someterlas a las condiciones más desfavorables.

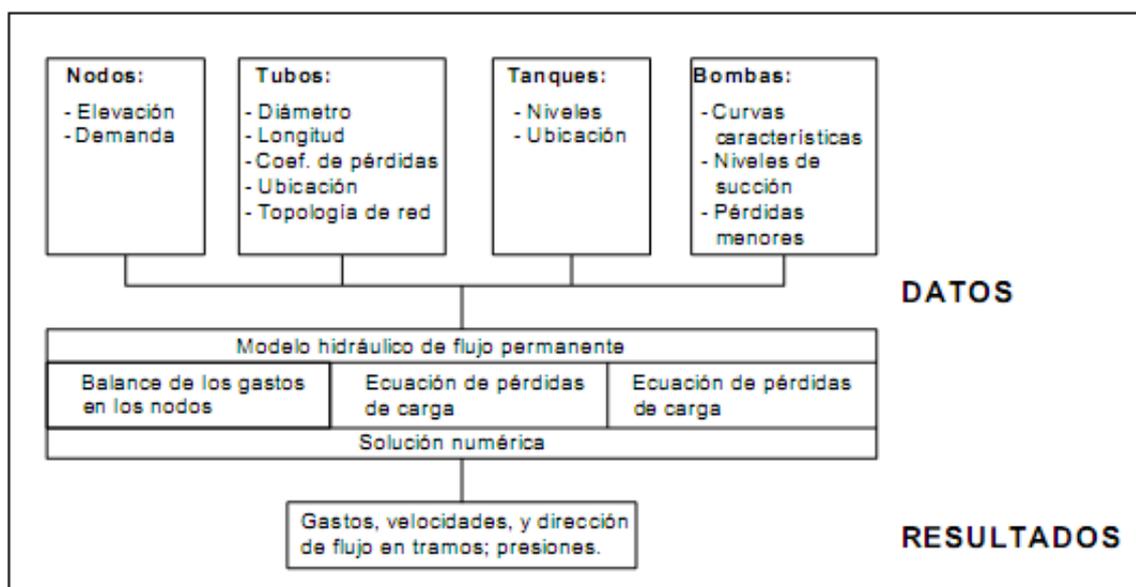


Figura 3.1. Diagrama de un modelo hidráulico de flujo permanente. FUENTE. MAPAS 2007. CONAGUA

3.2) Dinámicos o de flujo no permanente

A diferencia de los modelos estáticos, en los modelos de tipo dinámico, se permite la variación temporal de caudales demandados e inyectados, condiciones operativas de la red y de los niveles en los tanques. Estos se consideran bajo ciertas restricciones, simular la evolución temporal de la red, en un intervalo determinado. Simulan una serie de estados permanentes sucesivos, bajo ciertas condiciones de frontera variables en el tiempo, de hecho éstas le dan el carácter dinámico al modelo (EPS por sus siglas en inglés, Extended Period Simulation). De forma general, el modelo EPS se basa en soluciones consecutivas de flujo permanente para cada hora del día u otro intervalo con la demanda correspondiente y el balance del volumen de agua en los tanques.

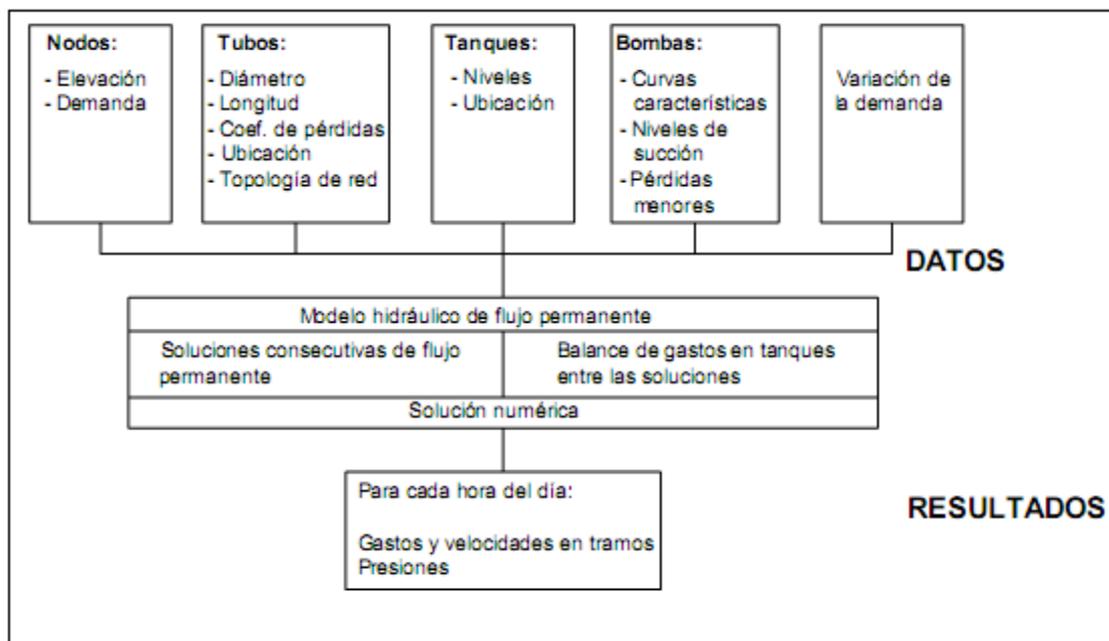


Figura 3.2. Diagrama de un modelo hidráulico de flujo no permanente. FUENTE. MAPAS 2007. CONAGUA

Como parte del diagnóstico inicial de la red de agua potable, es deseable simular mediante un modelo matemático el funcionamiento actual de la red, el cual refleje las características hidráulicas actuales del sistema que permitan ser confirmadas con mediciones obtenidas en campo.

3.3) Diseño del trazo de la red de distribución de agua potable de Ciudad Universitaria.

Para los fines requeridos, la simulación que se realizó fue en estado permanente con el apoyo del software Pipe Flux Expert. Como primer paso se hizo el trazado de la red de distribución en dicho programa, tomando como base los planos que fueron proporcionados por la Dirección General de Obras y Conservación (DGOyC).

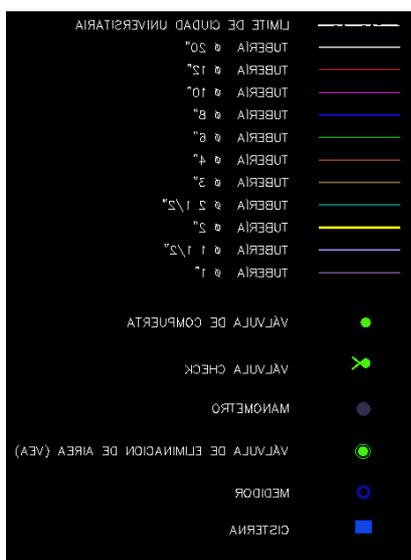


Figura 3.3. Plano de la red de agua potable de Ciudad Universitaria. DGOyC.

3.3.1) Características de tubos.

El diseño de la red se hizo tubo por tubo dentro del panel de Pipe Flow Expert, dotando a cada uno de ellos con sus características correspondientes dependiendo de su ubicación dentro del campus universitario. Estas características incluyen el diámetro interno, longitud y material de los distintos tubos. En la tabla siguiente se muestra la información detallada de las tuberías.

Tabla 3.1. Tabla de datos de tuberías.

Diámetro [inch]	Diámetro [mm]	Longitud	Porcentaje
20	5,080	332.70	0.62%
12	3,048	5,461.60	10.19%
10	2,540	4,313.30	8.05%
8	2,032	12,560.50	23.43%
6	1,524	7,093.70	13.23%
4	1,016	11,871.30	22.15%
3	762	4,411.20	8.23%
2 1/2	635	400.30	0.75%
2	508	4,935.60	9.21%
1 1/2	381	556.20	1.04%
1	254	1,667.30	3.11%

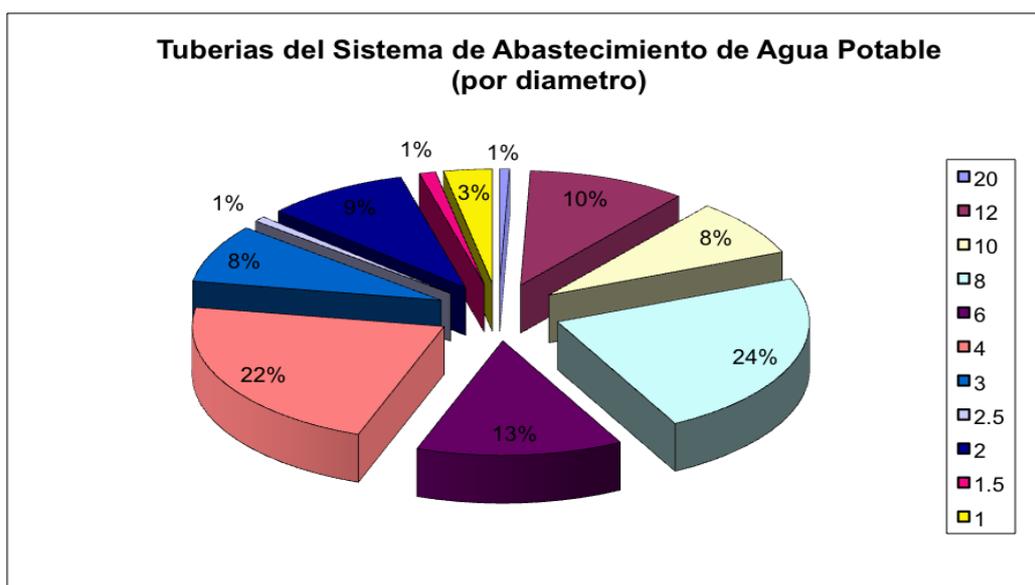


Figura 3.4. Tuberías de Ciudad Universitaria por diámetro.

Tabla 3.2. Porcentajes de longitudes y materiales de las tuberías

Material	Longitud	Porcentaje
Acero	25,642.90	47.84%
Asbesto	11,785.30	21.99%
Fierro Fundido	9,622.70	17.95%
PVC	6,552.80	12.22%
PEAD	Sin Dato	Sin Valor

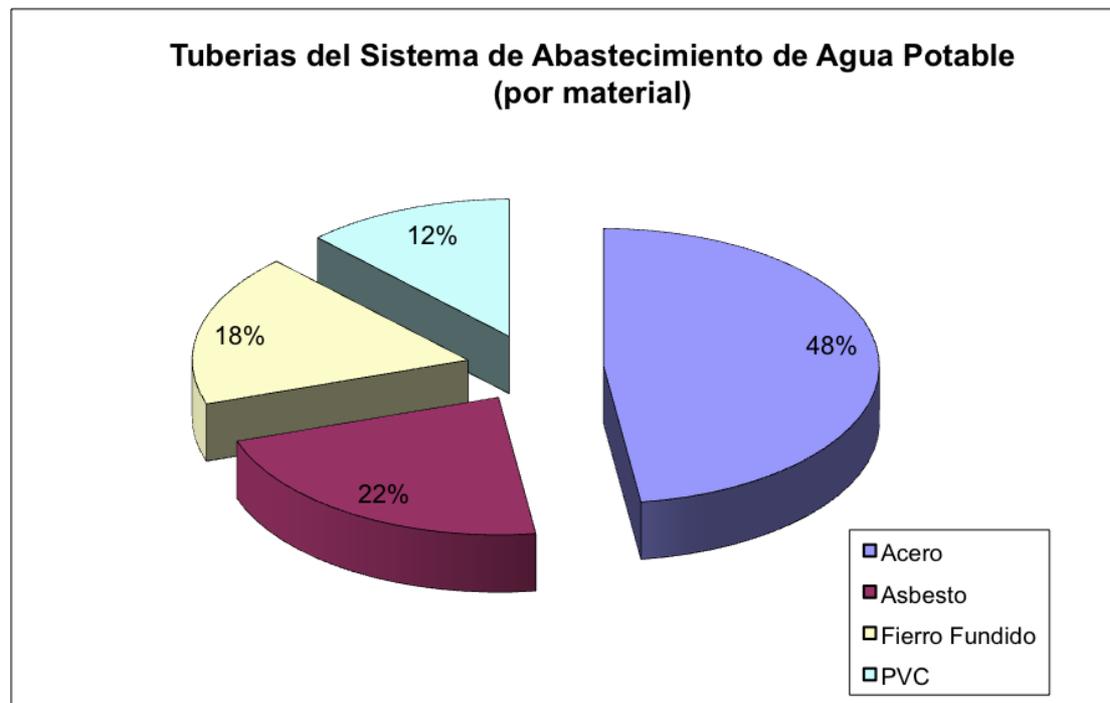


Figura 3.5. Tuberías de Ciudad Universitaria por material.

El sistema completo de distribución cuenta con 1388 tubos, sin embargo por limitaciones del software, solo podemos incluir como máximo la cantidad de 1000, esto complicó las condiciones del diseño de la red, pues se tuvo que optar por reducir la cantidad real de tuberías a la permitida, con lo que se tuvo que hacer ajustes en distintos puntos del sistema, uniendo varios tubos en uno solo, pero manteniendo las dimensiones originales de cada tramo. Otra limitación que se presenta con el programa es el reducido espacio en el panel principal, pues al

ser una cuadrícula los puntos de unión (nodos) deben forzosamente posicionarse en las esquinas de los cuadros, lo que complicó mucho el diseño, ya que se restringía la forma del sistema real al momento de realizar el sistema análogo dentro de Pipe Flow Expert.

En cuanto a los valores de rugosidad que se utilizaron para la simulación fueron los siguientes. Sin embargo, por el estado y la antigüedad de cada tubería, deben utilizarse bajo reserva.

Tabla 3.3. Rugosidades empleadas.

Material	[mm]
Acero	0.046
Asbesto	0.030
Fierro Fundido	0.015
PVC	0.0015

3.3.2) Piezas especiales.

Las piezas especiales son todos aquellos accesorios que se emplean para llevar a cabo ramificaciones, intersecciones, cambios de dirección, modificaciones de diámetro, uniones de tuberías de diferente material o diámetro, y terminales de los conductos, entre otros.

A lo largo de la red de distribución se encuentran poco más de 310 cruceros; muchos de ellos en condiciones que los hacen inaccesibles, como lo es el hecho de que estén llenos de agua, que existan líneas de energía eléctrica, que se hallen dentro de oficinas, en medio de la carpeta asfáltica, o bien, estén muy atorados, hecho que dificulta su apertura; inclusive, hay registros con profundidad de más de cinco metros, lo que los vuelve muy peligrosos ante la posible presencia de gases.

La mayor parte de la unión entre tuberías es a través de juntas mecánicas. Se ha dejado de utilizar hasta donde sea posible la termofusión para el caso de tuberías de Polietileno de alta densidad (PEAD) debido a que justamente en la zona de unión se ha producido una gran incidencia de fugas, principalmente en zonas con presiones por arriba de los 6 Kg/cm², en su lugar, se emplean juntas mecánicas, debido a que estas son prácticas y “sencillas” de instalar y

no requieren herramientas especiales, además de que existen adaptadores de este tipo de unión en tuberías plásticas



Figura 3.6. Cruceos de la red de distribución de agua potable. Línea de 10" con derivaciones a 4".

Las juntas mecánicas consisten en unir un tubo con un extremo bridado (brida fija) y en disposición campana con otro tubo espiga o liso empleando una contra brida (brida móvil) y un anillo de sellado.

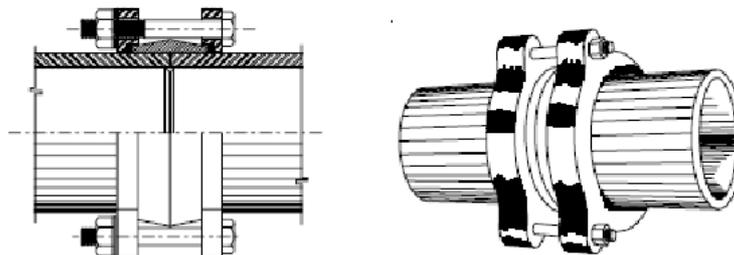


Figura 3.7. Junta Gibault generalmente empleada en uniones de tuberías.

La reducción de diámetros se hace por medio de reducciones bridadas tipo campana o bien a través de tee's reductoras.



Figura 3.8. Reducción de diámetros en la red. Izquierda: Reducción campana. Derecha: Tee reductora.

En los cruceros se encuentran cerca de 800 válvulas de seccionamiento de vástago saliente (Es decir, que este se desplaza según su eje vertical. Vástago hacia arriba: abierto. Vástago hacia abajo: cerrado), las cuales son utilizadas para separar o cortar el flujo del resto del sistema de abastecimiento en ciertos tramos de tuberías, bombas y dispositivos de control con el fin de revisarlos o bien, repararlos. La figura 3.10 muestra la ubicación de las válvulas hasta el momento registradas en planos, la mayor parte de estas presentan fugas. Existen válvulas expulsoras de aire, sobre todo al sur del campus universitario, zona en donde las líneas atraviesan terrenos con cotas muy pronunciadas y donde existe el riesgo de acumulación de aire en la tubería. Hay también Válvulas Check o antirretorno, sobre todo en los trenes de descarga de los pozos y equipos hidroneumáticos. En algunas dependencias se han encontrado Válvulas Reductoras de Presión, sobre todo en los ramales de alimentación de estas.

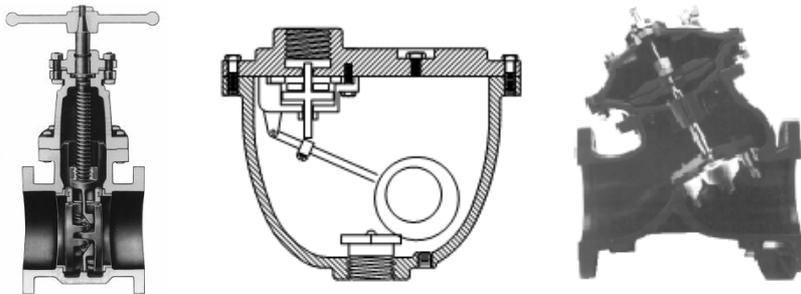


Figura 3.9. De izquierda a derecha: Válvula de seccionamiento, Válvula Expulsora de Aire y Válvula Reductora de Presión.



Figura 3.10. Localización de válvulas. En color naranja se encuentran las válvulas de compuerta, y en color azul la de expulsión de aire.

Todos los accesorios mencionados anteriormente, fueron incluidos en la simulación, se colocó accesorio por accesorio en el lugar análogo correspondiente en el panel del programa, de este modo se pudo obtener un modelo lo más parecido al real.

3.3.3) Pozos de absorción.

Otros componentes importantes son los pozos de absorción de agua, que en conjunto con los tanques reguladores y las bombas, son los encargados de iniciar la distribución del líquido a los distintos sectores de Ciudad Universitaria.

En promedio se extraen **2,783,185.44** m³ de los tres pozos con que cuenta el campus universitario, de ellos, el 85% se extrae de los Pozos Multifamiliar y Vivero Alto (Pozo II y III), mientras que el 15% del agua extraída corresponde al Pozo de Química (Pozo I).

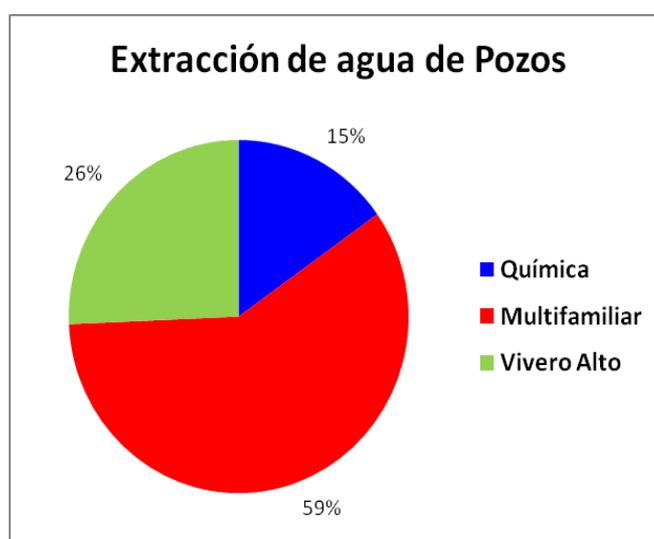


Figura 3.11. Porcentajes de extracción de los pozos. FUENTE: DGOyC. UNAM

3.3.4) Tanques reguladores.

El sistema de regularización de Ciudad Universitaria cuenta con tres tanques reguladores: Tanque Alto, Tanque Bajo y Tanque de Vivero Alto. Los tres tanques que existen en Ciudad Universitaria son abastecidos por los tres pozos con que cuenta el campus. Son del tipo "superficiales" y cuentan en conjunto con una capacidad de 12,000 m³. La Tabla 15 muestra las características de los tanques y la capacidad de cada uno de ellos. La figura 32 muestra su ubicación.

Tabla 3.4. Características generales de los taques en Ciudad Universitaria. FUENTE: DGOyC. UNAM

Tanque	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Capacidad (m ³)
T. Alto	40	25	4	4,000
T. Bajo	29	23	3	2,000
T. Vivero Alto	25	20	3	6,000
			TOTAL	12,000

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 esta en mantenimiento también lo puede apoyar el Tanque Vivero Alto. El Tanque Vivero Alto se alimenta del pozo Vivero Alto; este tanque está formado por cuatro tanques que se comunican entre si.

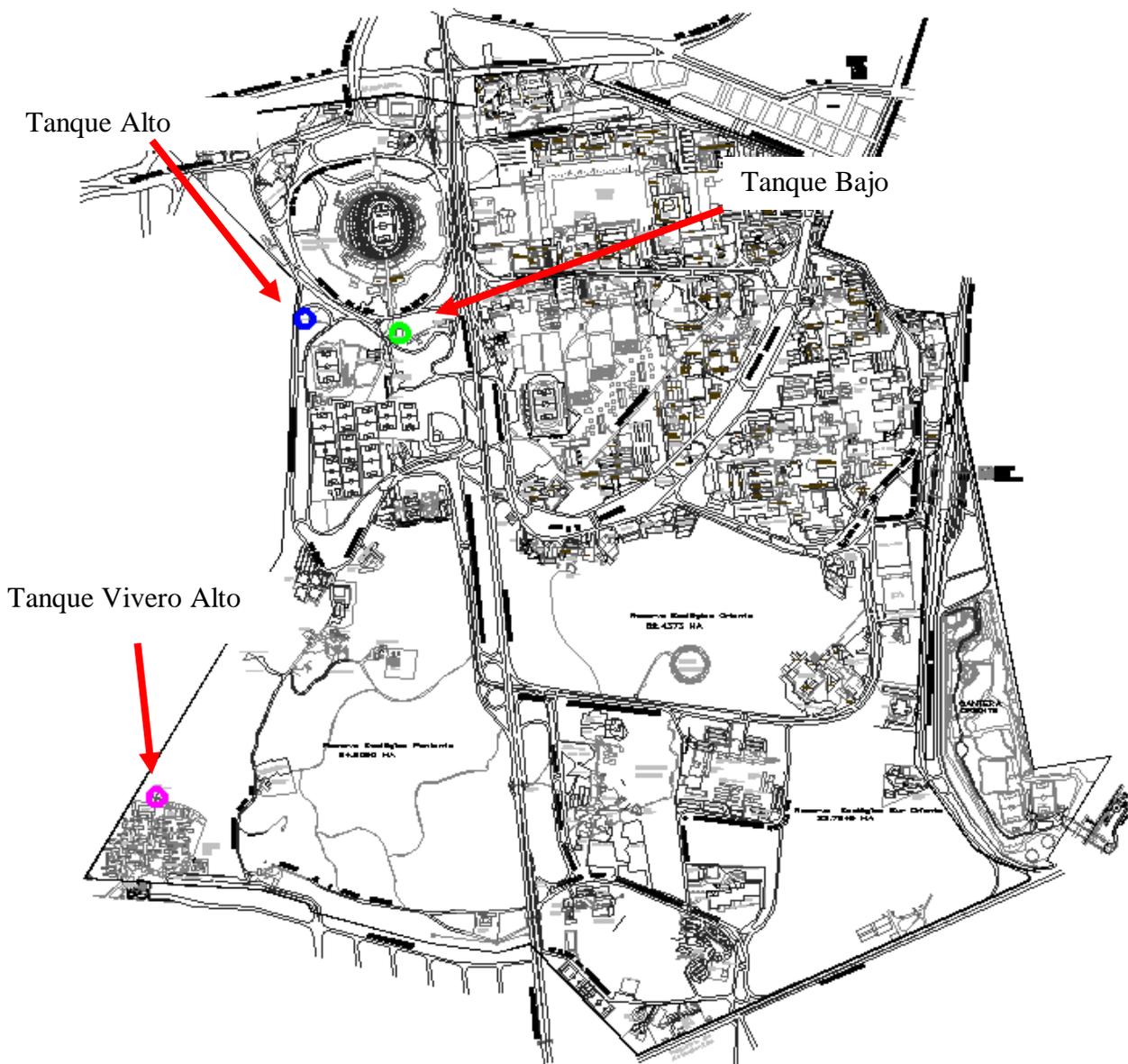


Figura 3.12. Tanques de almacenamiento en Ciudad Universitaria. FUENTE: DGOyC. UNAM

La operación de distribución se esquematiza a continuación.

Esquema de Operación actual del sistema de distribución de agua potable. Ciudad Universitaria. UNAM

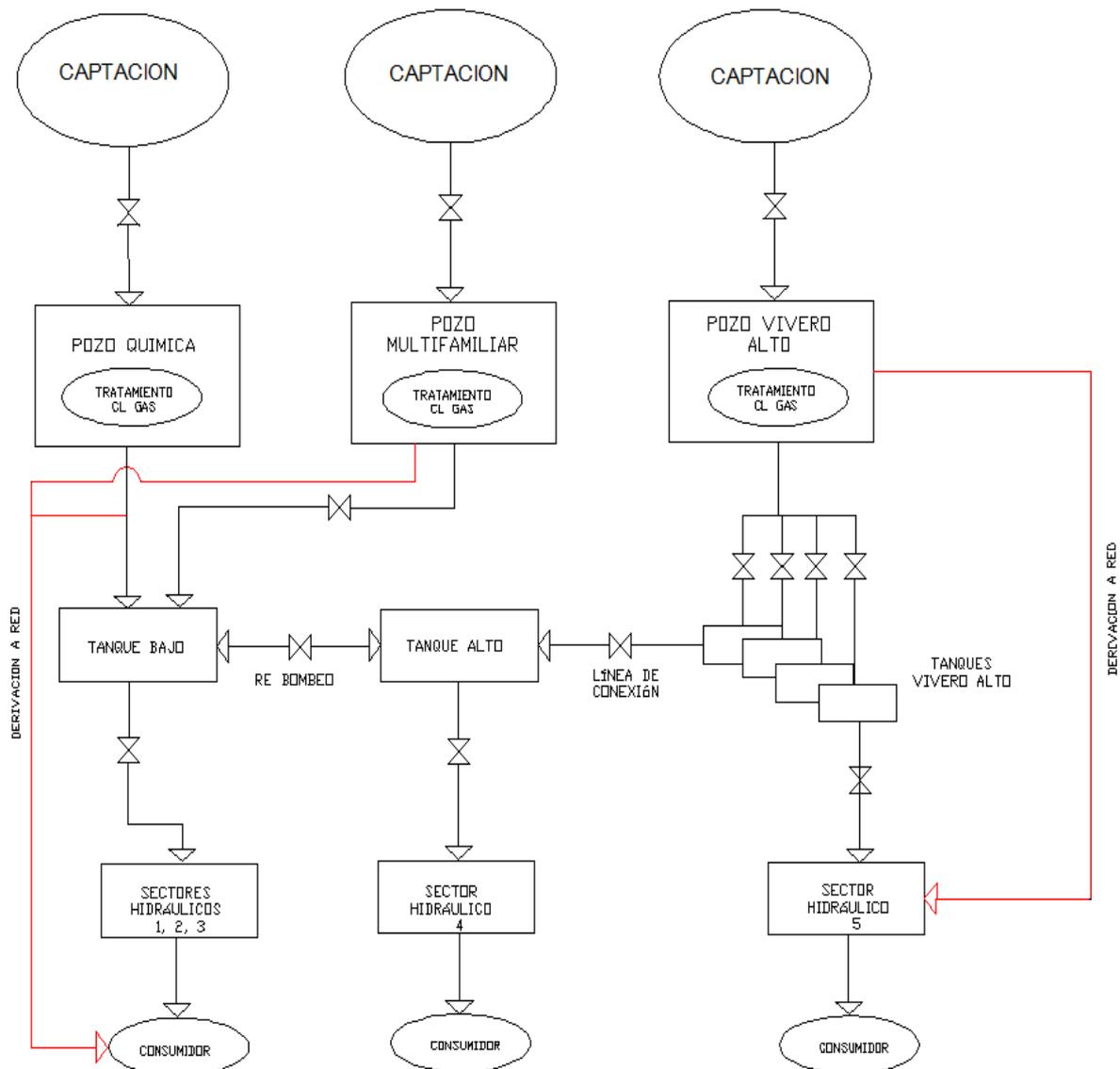


Figura 3.13 Esquema de operación actual del sistema de distribución de agua potable

3.3.5) Bombas.

En lo que a bombas se refiere, las correspondientes a las de los pozos Química y Multifamiliar son sumergibles a diferencia de la del pozo Vivero Alto que es vertical. Las características de operación de cada una de ellas son las siguientes.

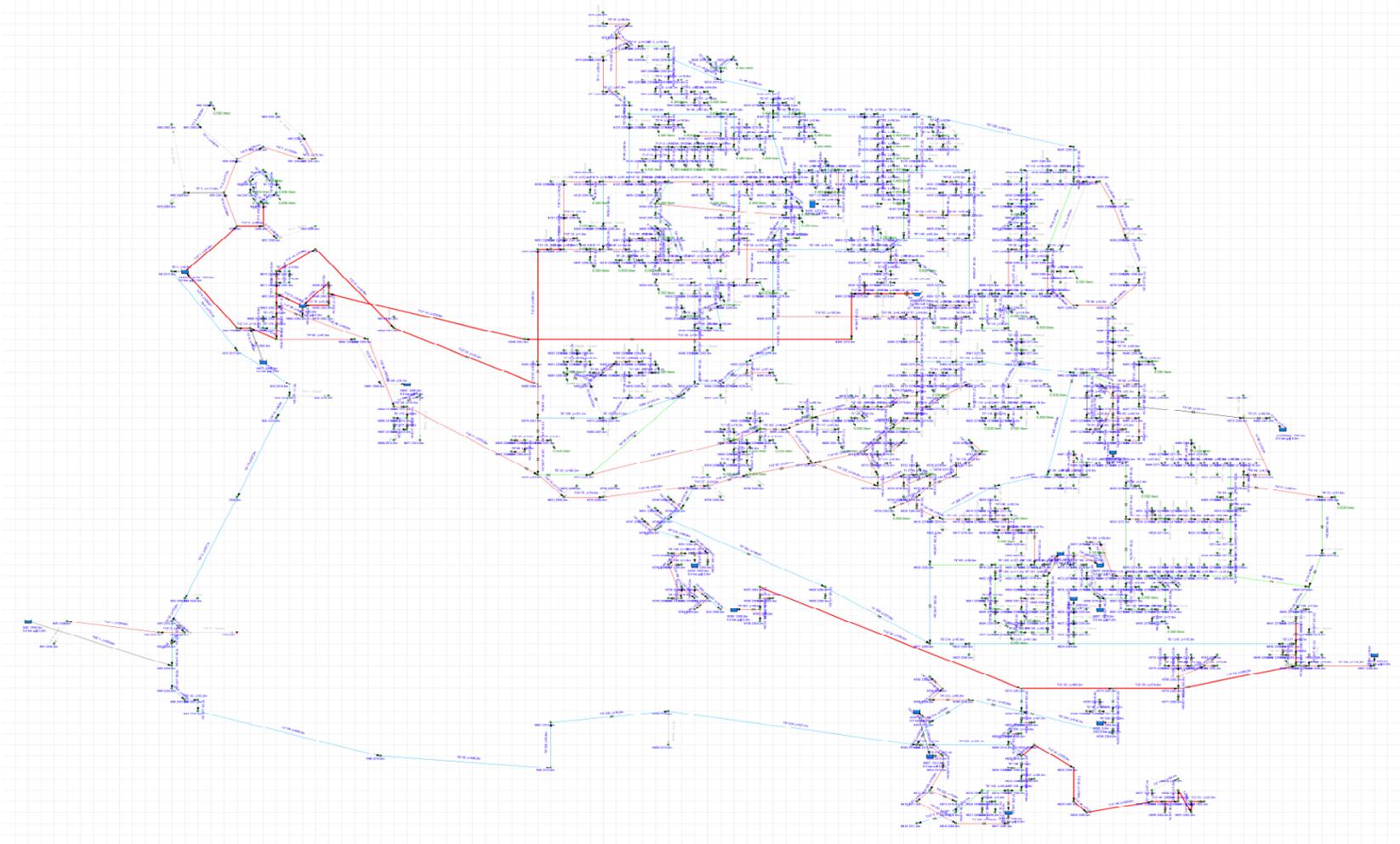
	Bombas tanque bajo	Bomba pozo 1	Bomba pozo2	Bomba pozo 3
Q [L.P.S.] =	47.454	31.00	91.00	48.00
H _m [m] =	24.123	115.04	116.50	127.98

Para correr la simulación fue necesario recabar información sobre los consumos de cada dependencia dentro del campus, promediando se tiene una demanda base de 0.5 l/s, ya que requerimos, si no una exactitud en cuanto a la demanda de las distintas tomas de agua, si necesitamos un aproximado de ellas, pues juegan un factor fundamental a la hora de la simulación del sistema.

3.3.1) Altimétrica.

Las alturas de cada nodo, se tomaron de una simulación que se hizo anteriormente en otro programa, las cuales fueron obtenidas de los planos de las curvas de nivel del terreno de Ciudad Universitaria facilitado por la DGOyC.

Así es como quedo establecido el panel en Pipe Flow Expert, una vez que todos los datos arriba mencionados fueron metidos al programa.



Capítulo 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En un principio se tenía planeado hacer una simulación completa de toda la red de distribución de agua de Ciudad Universitaria, sin embargo, por facilidad y fines prácticos se decidió realizar 7 simulaciones distintas, todas ellas correspondiendo tal y como lo señala la Dirección General de Obras y Conservación (DGOyC) de la UNAM, a los 5 sectores hidráulicos en los que se ha dividido del campus universitario.

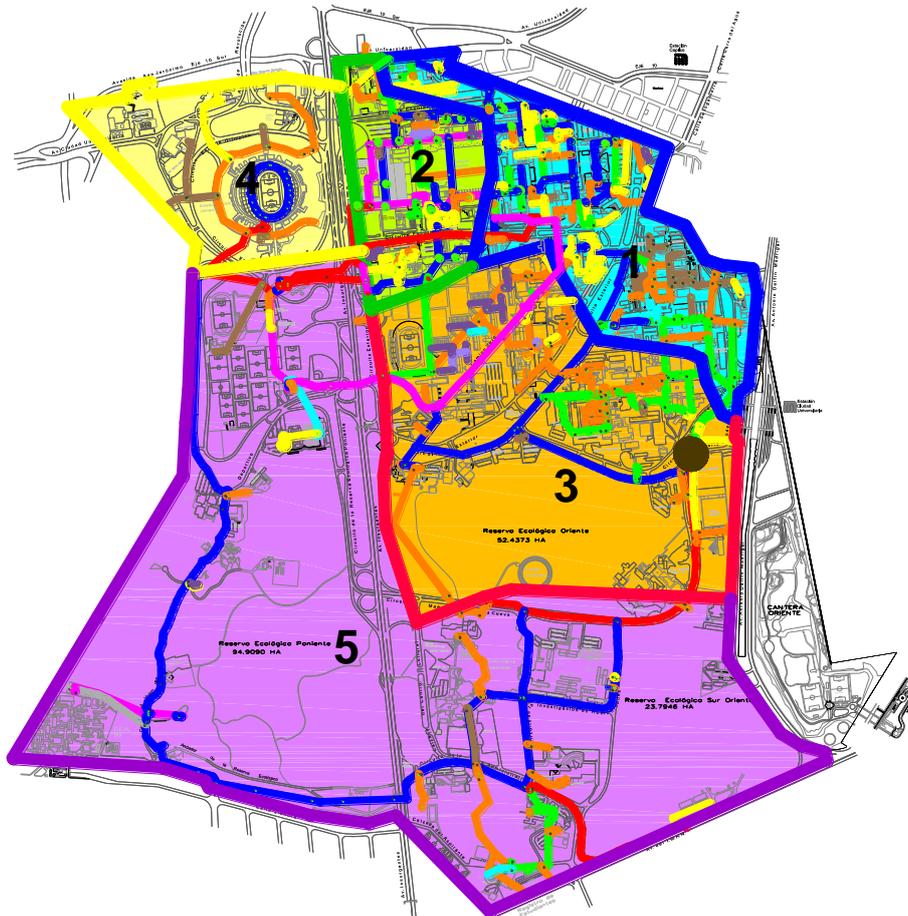


Figura 4.1 Mapa de divisiones de los sectores hidráulicos en Ciudad Universitaria.

Son 7 simulaciones debido a que, por su complejidad, se hizo una subdivisión en los sectores 1 y 5, dando como resultado dos simulaciones respectivamente para éstos y una para cada sector 2,3 y 4.

Para llegar a las siete simulaciones *finales* fue necesario realizar simulaciones previas, todas éstas dotadas con los datos recabados con anterioridad por parte de la DGOyC sobre el funcionamiento de la red, sin embargo, al utilizar dichos datos tal y como fueron proporcionados, el software arrojaba resultados no validos, por lo que se tuvo la necesidad de

sustituir cierta información con otra pero, siempre teniendo en consideración los datos originales y también tomando en cuenta los datos utilizados en un primer trabajo de simulación que se hizo en un software distinto. Siempre se cuidó que los datos nuevos fueran lo más cercanos posibles a los originales, no obstante, en algunas ocasiones los datos que se utilizaron discrepan en cuanto a los primeros, pero solo así se obtuvieron valores válidos para cada simulación.

Tabla 4.1. Cuadro comparativo entre los datos originales, y los datos utilizados para las bombas del sistema de distribución

Referencia	Datos originales [mca],[lps]	Datos utilizados [mca],[lps]
Bomba Química	115, 31	115, 31
Bomba Tanque Bajo	24, 41	30, 47
Bomba Multifamiliar	116, 91	115, n/d
Bomba Vivero Alto	127, 48	29, n/d

La demanda base de consumo promedio utilizada en todos los sectores fue la de 0.05 l/s, esta demanda fue suministrada a los nodos que representan una toma hacia el campus, y el marco de la simulaciones se llevo a cabo tomando en cuenta un estado en donde todas las tomas se encuentran abiertas, por lo que en cada una de ellas se estableció la demanda base ya mencionada.

Los factores más representativos a la hora de modelar un sistema de distribución de agua son las presiones y velocidades en los nodos y tuberías. Según el Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable (MIE), para la optimización del funcionamiento 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 kg/cm² y menores a 5 kg/cm², tanto en las condiciones de máxima demanda, tanto como en las condiciones de operación media y mínima, sin embargo, en lo que al sistema de Ciudad Universitaria se refiere, se tiene conocimiento de que el 60% de las fugas se lleva a cabo en zonas donde la presión es mayor a 3 kg/cm², no obstante, estas tres magnitudes son las que se tomaron en cuenta en el análisis de los resultados. Algunas de las recomendaciones que marca dicho manual para controlar presiones máxima y mínimas son las siguientes:

Para mejorar las presiones, se apoyará el suministro con baja presión mediante la instalación de tuberías nuevas, cambio de diámetro en tuberías con velocidades altas o conexiones de cruceros desconectados.

Para las zonas con diferenciales de cotas mayores a 5 kg/cm² se recomienda el uso de válvulas reductoras de presión automáticas, las cuales se ubicarán en un punto óptimo donde tengan mayor área de influencia y genere la menor obra posible.

A continuación se analizará cada una de las simulaciones junto con la aplicación de las recomendaciones señaladas en el párrafo anterior. Se comenzará con el sector número 5a, el cual es en donde prácticamente comienza todo el suministro de la red.

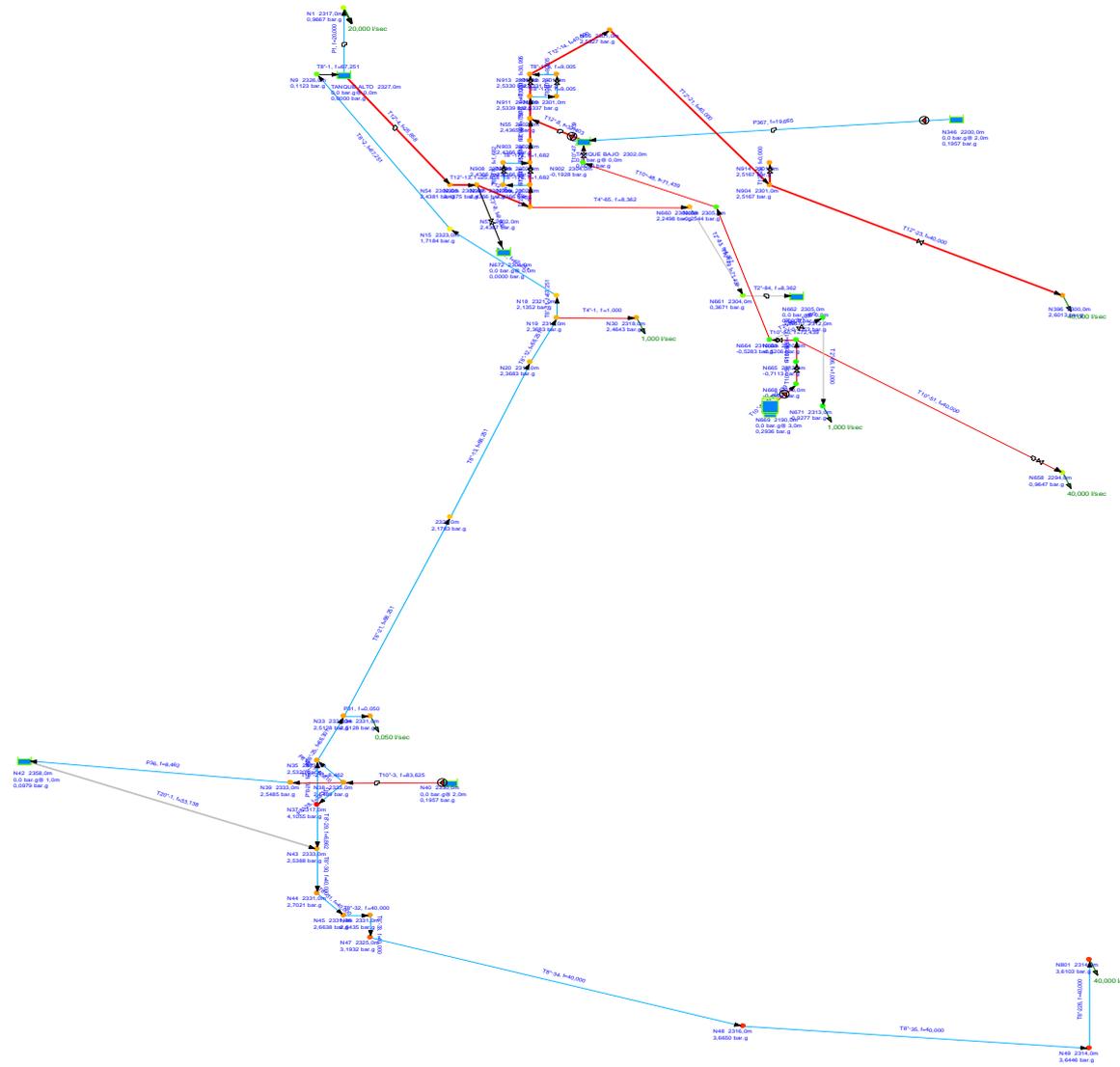


Figura 4.2. Simulación del sector 5a.

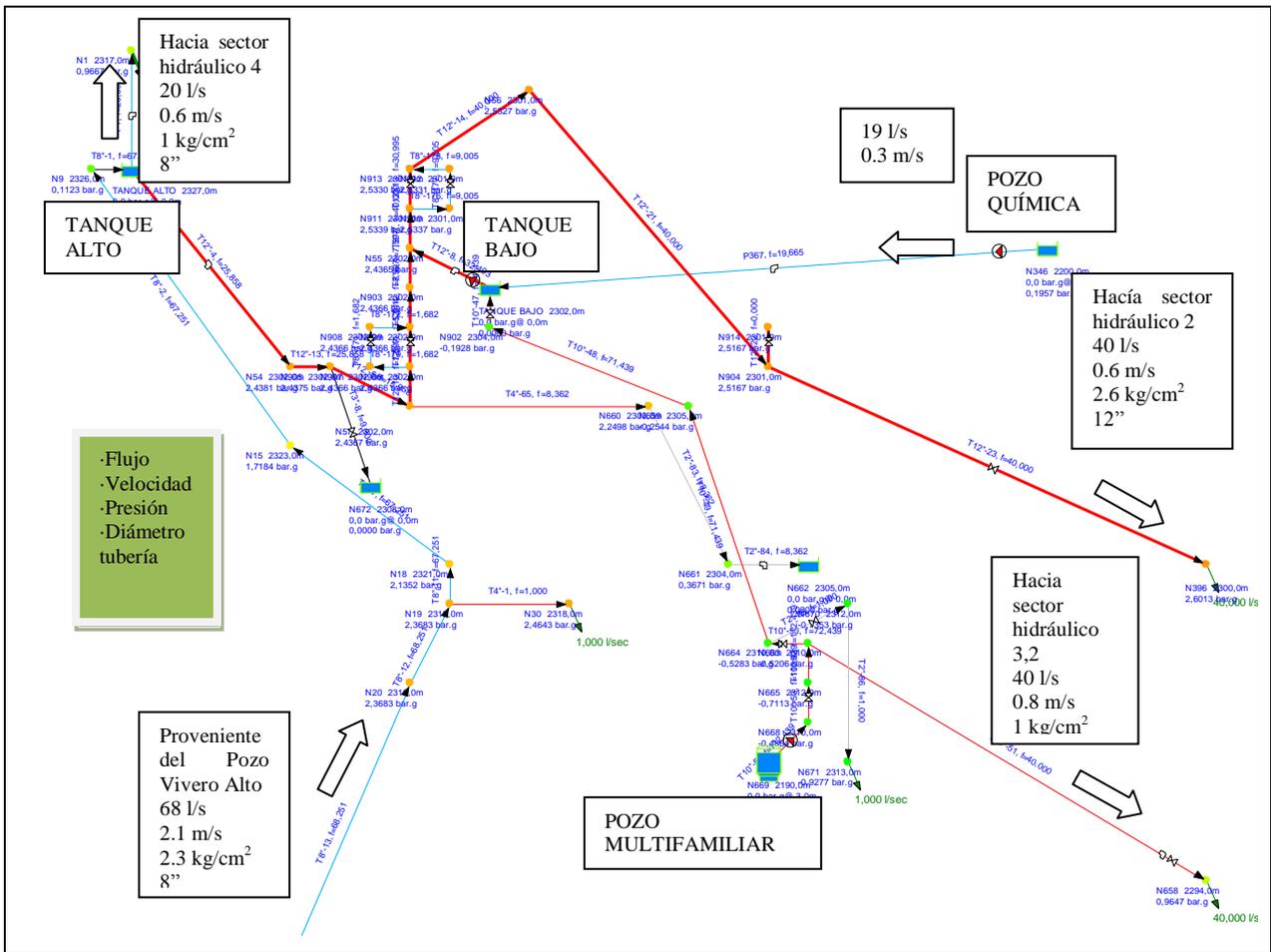


Figura 4.3. Detalle del sector 5a.

En este sector hay una variación de presiones que van desde los 1.718 kg/cm² y hasta los 3.66 kg/cm². En cuanto a las velocidades, presentan velocidades que van desde los 0.620 m/s y hasta los 3.84 m/s,

En la siguiente figura se muestra la zona que presenta la velocidad máxima, la cual corresponde al Multifamiliar de maestros

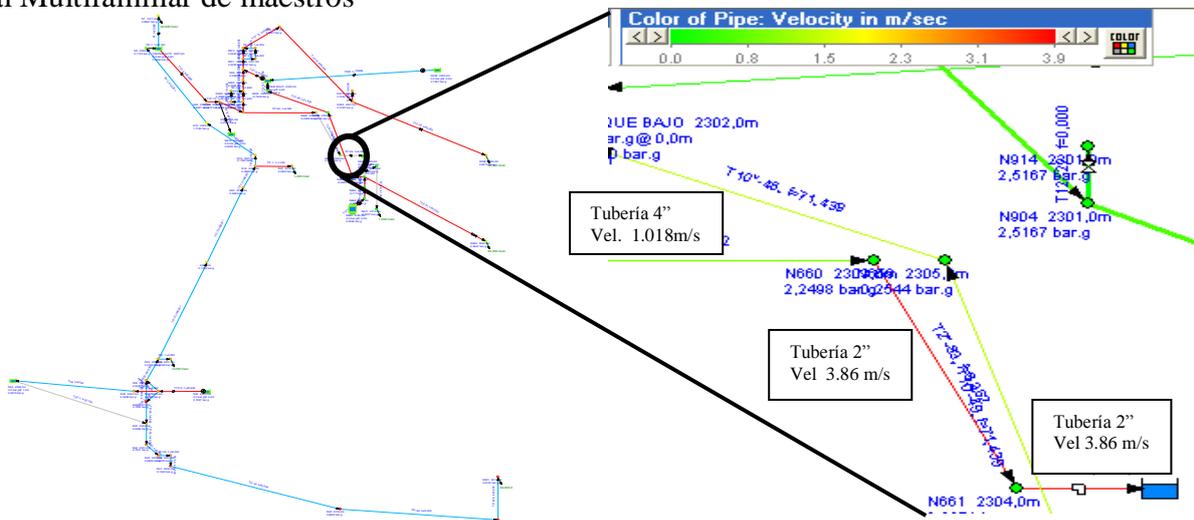


Figura 4.4 Configuración actual del tramo de mayor velocidad

La tubería implicada en este problema está compuesta por tres tramos de diferentes diámetros, uno de 4" y dos de 2",

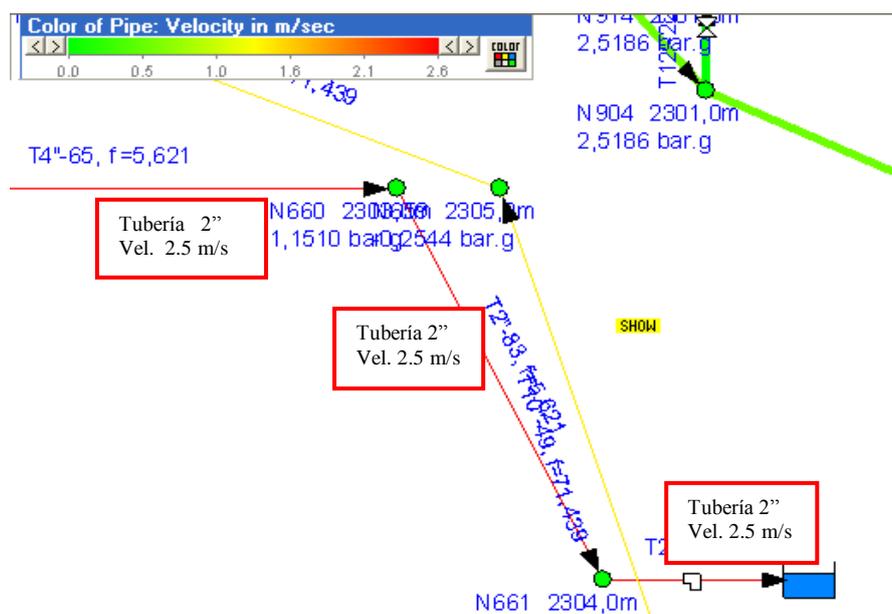


Figura 4.5. Configuración propuesta para el sector 5^a.

Para modificar la velocidad, en la propuesta se plantea cambiar la tubería de 4" por una de 2", con lo que la nueva configuración presenta una velocidad de 2.59 m/s. En lo que a presiones se refiere, este sector presenta los menores de todo el campus, lo cual permite mantener la misma configuración que la inicial.

Para el sector 5b no se encontró mayores complicaciones, la velocidad más alta fue la de la tubería de derivación hacia el edificio de Centro de Estudios Sobre la Universidad, la cual registró una velocidad de 1.8 m/s. La presión más alta fue hallada en los 2.271 kg/cm², sin embargo esta velocidad y esta presión se mantienen dentro del rango establecido en el MIE, por lo que el sector 5 no se le aplicó mayor modificación.

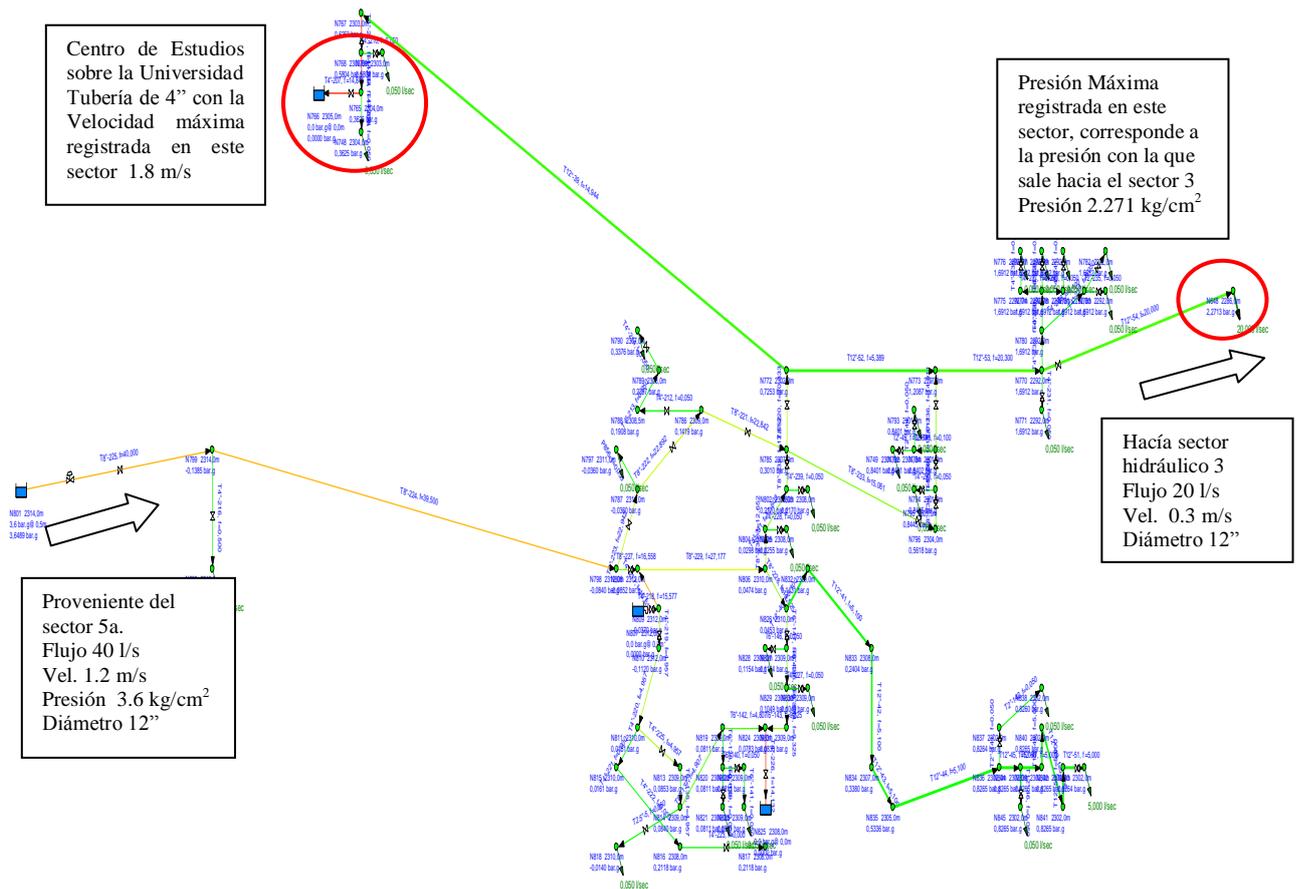


Figura 4.6. Simulación Sector 5b.

Siguiendo con el funcionamiento de la red, el sector a analizar a continuación será el sector número 3, el cual recibe su alimentación de una línea de conducción primaria, de 12" de diámetro, proveniente del sector 5, una de 8" proveniente del sector 1 una última de 10" de diámetro que sale del pozo Multifamiliar hacia el Campus Universitario.

En este sector la presión conserva una medición aceptable, pues la más alta hallada fue de 2.8 kg/cm², no así podemos decir lo mismo de las velocidades, ya que en dos tubos distintos, se presentan velocidades de 6.4 y 3.3 m/s, éstos se encuentran ubicados cerca del CUADEC y sobre el circuito de la Ciencia respectivamente.

La propuesta que se hace en este sector es cambiar las tuberías por unas de un diámetro mayor, ya que se presenta un cambio brusco de 8" de diámetro a 4" y en la imagen siguiente se puede apreciar que si se considera cambiar por unas de diámetro de 6", la velocidad se reduce considerablemente a 1.0 y 2.9 m/s en las tuberías antes mencionadas.

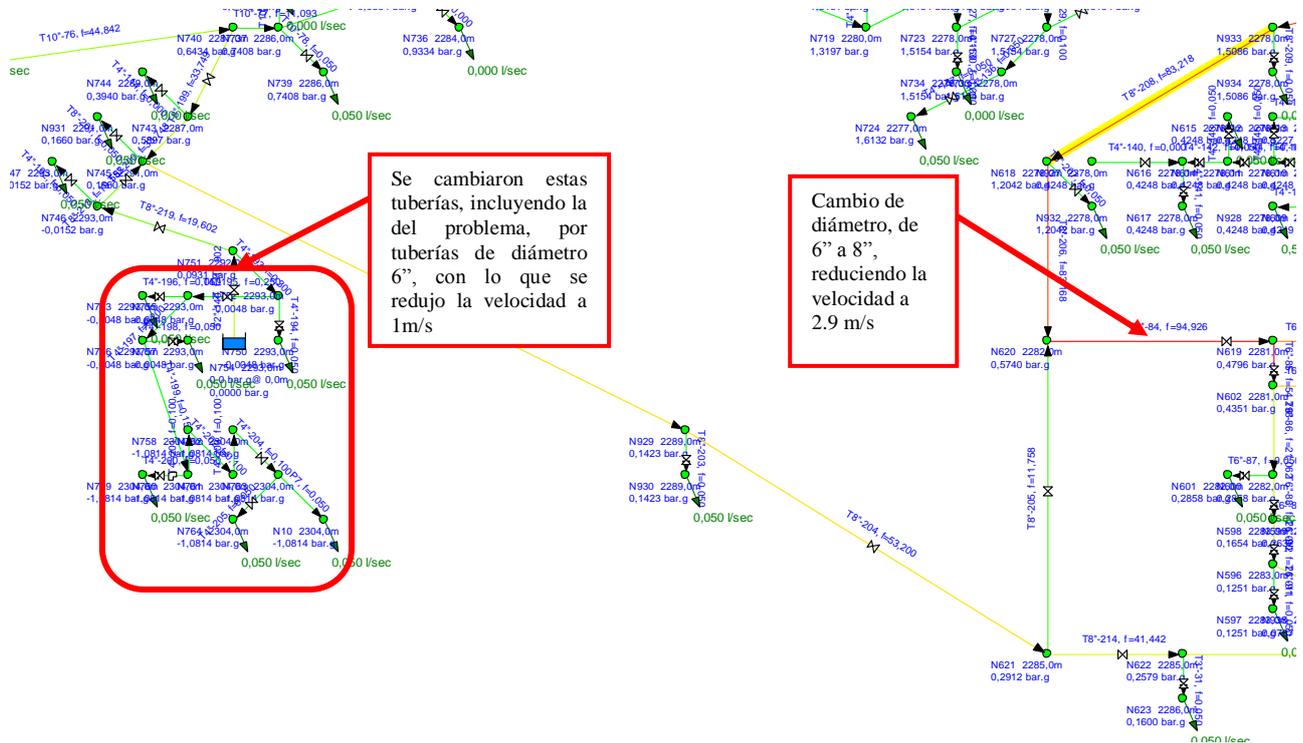


Figura 4.9. Propuesta del sector 3 con cambio de diámetro de tuberías.

En lo que se refiere al sector 2, éste se encuentra abastecido por las tuberías primarias que provienen del Tanque Bajo y del Pozo del Multifamiliar, encontramos una velocidad máxima de 1.8 m/s, lo que nos hace referencia a que no es un sector con problemas de este tipo, sin embargo en la cuestión de presiones, tenemos lecturas de hasta 4.6 kg/cm^2 , y no solo se refiere a un solo punto del campus, la mayoría del sector 2 lo presenta, lo que se traduce como pérdidas en fugas. Para ello se propone la instalación de Válvulas Reductoras de Presión a la entrada de dicho sector, estas válvulas fueron configuradas a presiones de 1.0, 2.2 y 1.8 kg/cm^2 respectivamente y con ellas se tuvo una disminución en las presiones, quedando como único punto con mayor presión el nodo de salida hacia el sector 1, que presenta una presión de 3.2 kg/cm^2 .

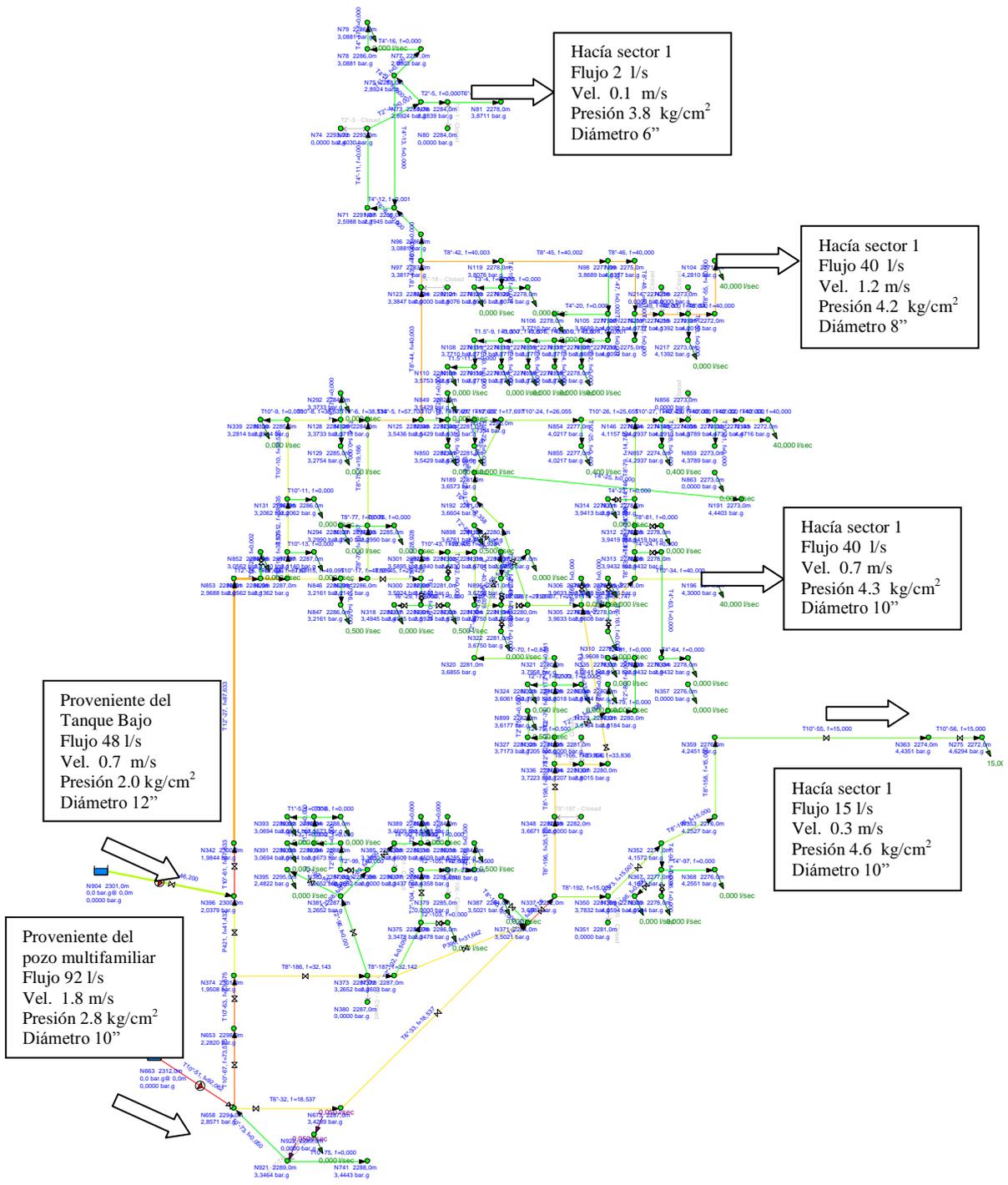


Figura 4.10. Configuración actual sector 2

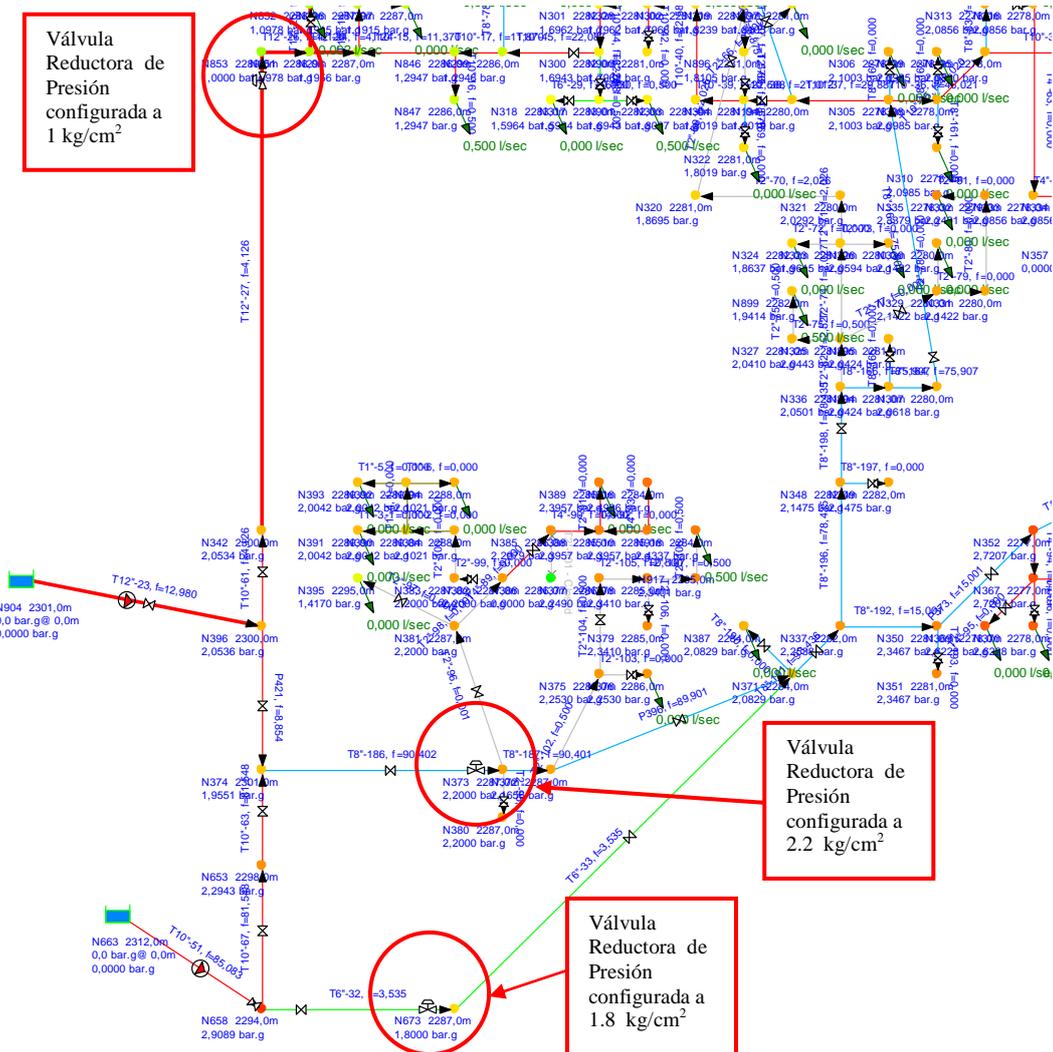


Figura 4.11. Propuesta del sector 2 con VRP.

Para el sector 1, recordemos que se ha hecho una subdivisión para la simulación, debido a que este sector es uno de los que presentan mayores dificultades en cuanto a la presión, y claramente se ve en la figura siguiente. Donde las presiones arrojadas en la simulación para este sector se encuentran en el orden de 5 Kg/cm², en contra parte, las velocidades son menores de 1 m/s, lo que hace recomendable el manejo de las presiones únicamente.

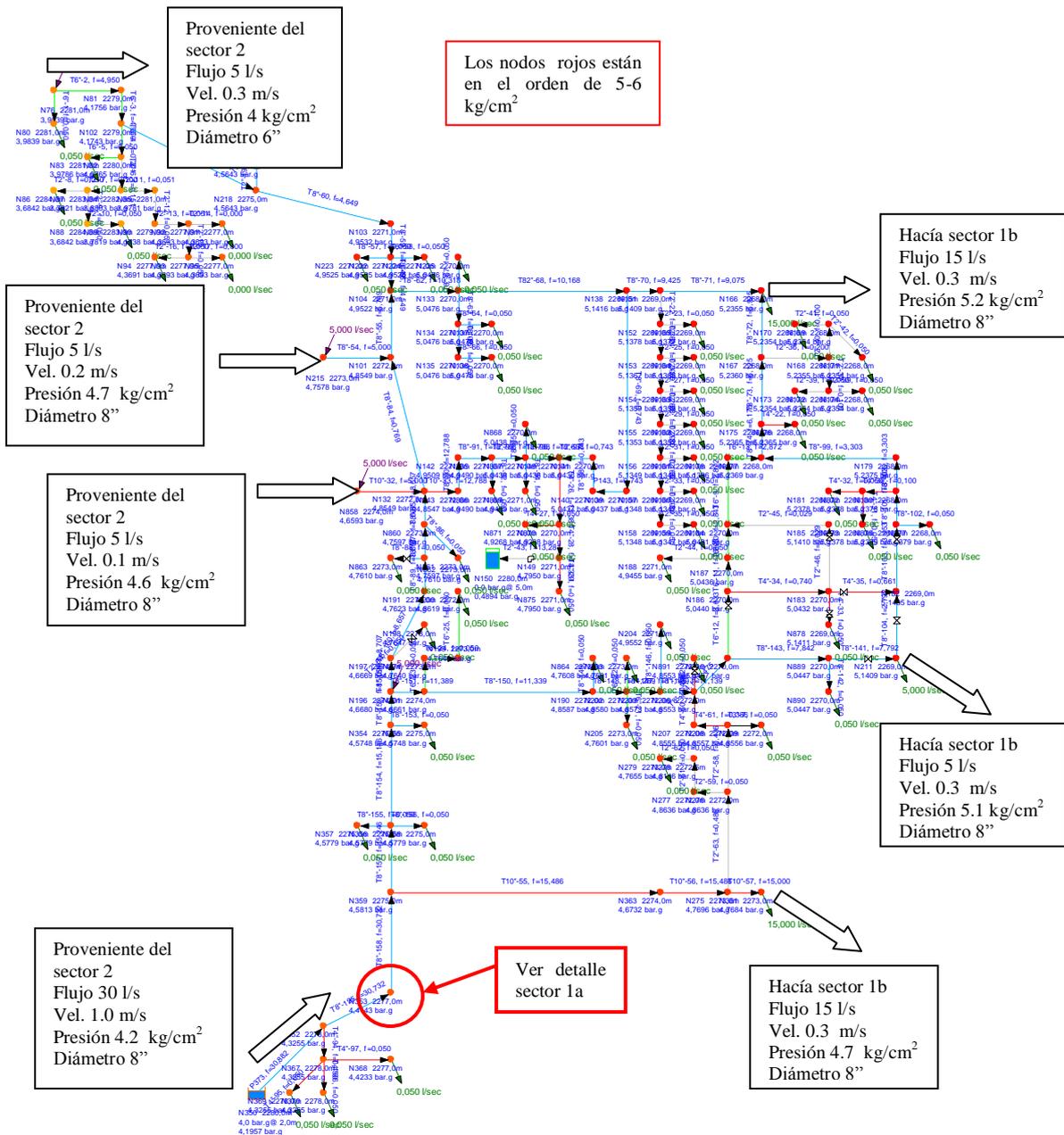


Figura 4.12. Configuración actual para el sector 1a.

Para controlar las presiones en esta parte del sector 1, se propone colocar una VRP a la altura de la Coordinación de Fútbol Americano, dicha válvula es configurada en una presión de 1.7 kg/cm², lo que permite mantener las presiones en los distintos puntos en un rango menor a 2.7 kg/cm² y así mantenerlo aceptable dentro de lo que marca el MIE.

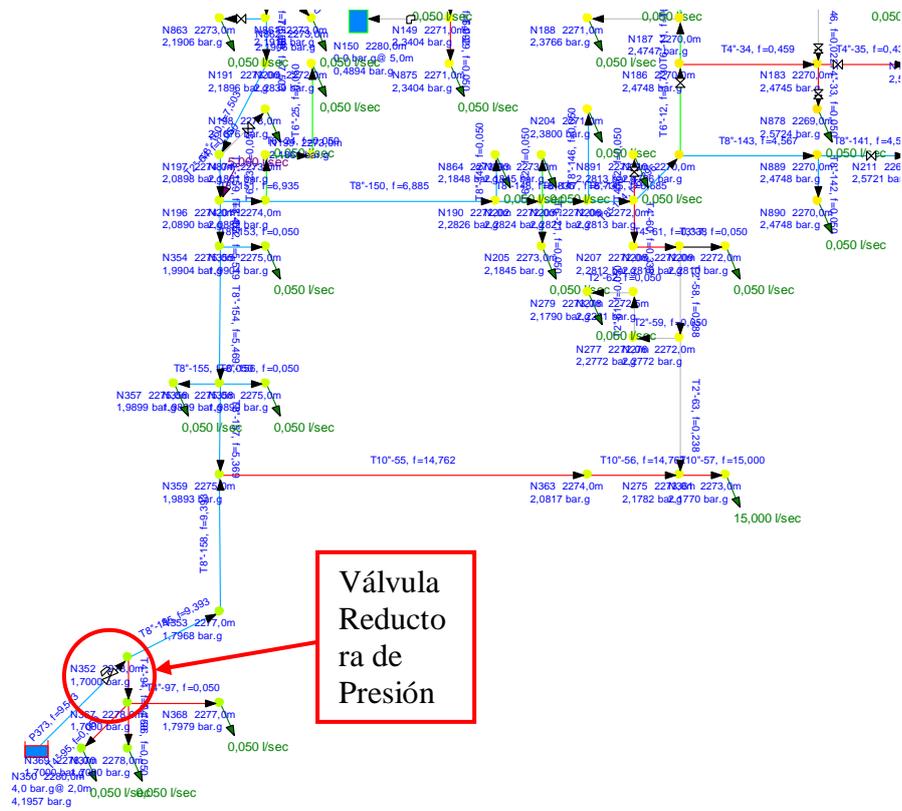


Figura 4.13. Propuesta de VRP en el sector 1a.

En la simulación 1b, se presenta el mismo problema que en la 1a; las presiones, ya que el resultado de la primera simulación arrojó datos de 5.8 kg/cm^2 , lo que hace suponer pérdidas considerables en este sector.

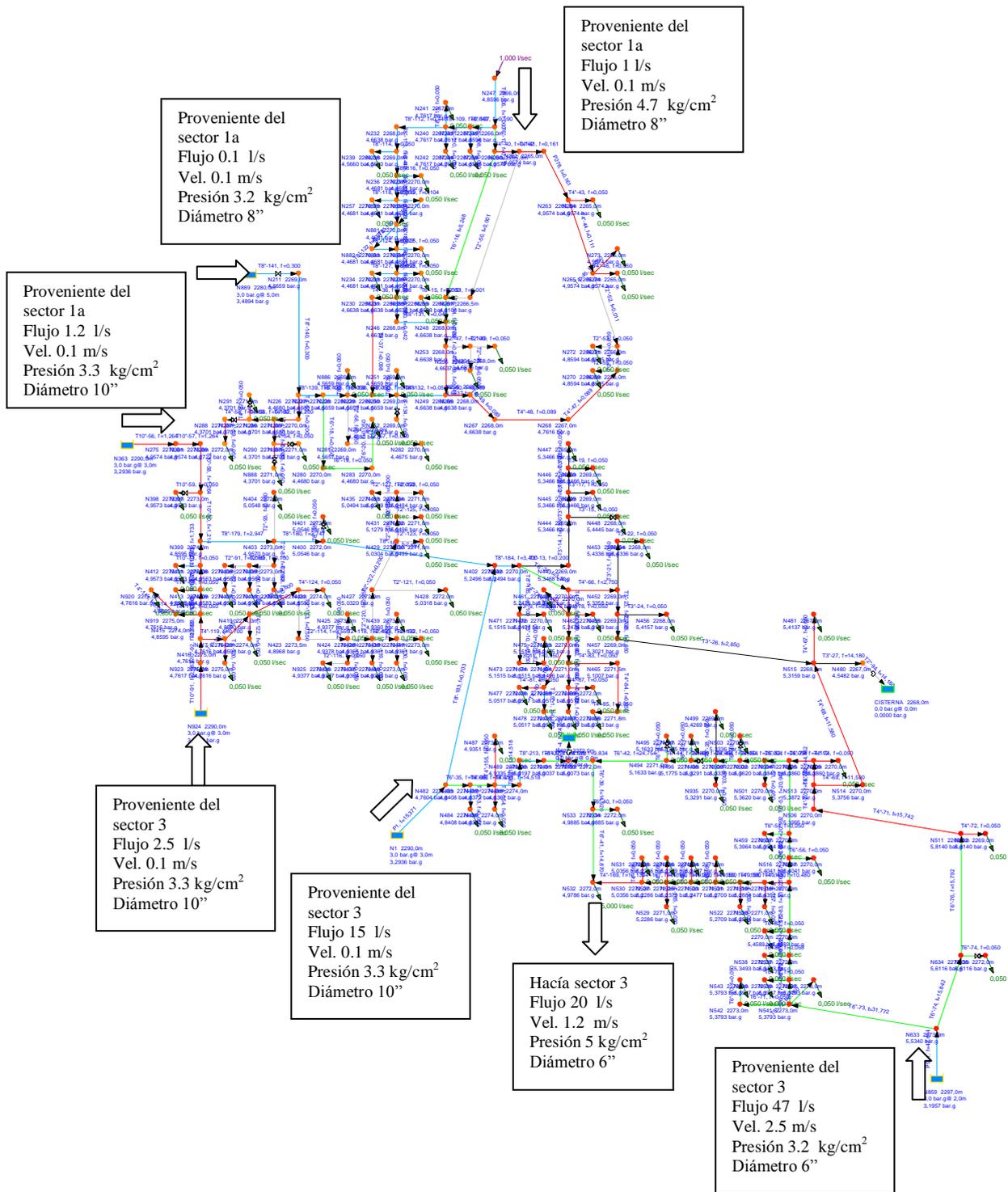


Figura 4.14. Configuración actual sector 1b

En este sector hidráulico es donde más se hace uso de las VRP, ya que por su complejidad, dicho sector presenta zonas con difícil manejo de presiones, por las que las válvulas fueron ubicadas en donde brindarán el mayor control posible, con esta propuesta se reduce en la mayoría de los puntos las presiones en un rango de 2.5-3.5 kg/cm², sin embargo existen puntos donde para garantizar el funcionamiento de la red es muy difícil reducir presiones y únicamente ésta se reduce en cantidades menores, que de cualquier modo la simulación con la propuesta de

CONCLUSIONES.

El agua es un recurso vital para el desarrollo de la vida en nuestro planeta, es factor clave para el crecimiento de las diversas sociedades coexistiendo dentro de un ecosistema. Es un recurso utilizado para innumerables actividades humanas, es por ello que el manejo adecuado de este recurso debe ser una prioridad tanto para entidades educativas como federales, ya que por su condición finita y no renovable debemos poner énfasis en encontrar las mejores opciones para reciclarla.

El problema con el agua es cada vez más visible, lo vivimos día a día en nuestras propias casas donde el abasto es cada vez menor y hasta en ocasiones nulo, pero el problema no se limita a las condiciones hidrológicas naturales desfavorables en las que se encuentra México, sino al mal manejo que se le tiene de ésta por parte de las autoridades. Se necesita encontrar urgentemente una gobernabilidad eficiente de dicho recurso que garantice el cumplimiento de metas acordadas para el beneficio de la sociedad y así poder solventar las zonas donde la demanda de agua sobrepasa la disponibilidad, que son los lugares con mayores dificultades.

Para hacer un cambio de verdadera trascendencia y lograr un manejo sustentable del agua, es necesario no solo voltear hacia las opciones técnicas y tecnológicas con las que contamos, sino profundizar y trabajar en el ámbito de principios éticos, valores y cuestiones culturales que engloban la gestión del agua. Otro punto de interés es la estrategia con la que se maneja el vital recurso, pues se debe enfocar a una estrategia de conservación basada en las diferentes demandas de los sectores de la población.

En la UNAM, los problemas relacionados con el agua es muy similar a otras comunidades humanas. En primera instancia se debe tener el reconocimiento de la falta de conciencia y de una buena cultura de uso eficiente dentro de algunas zonas del Campus Universitario y con ello generar programas que propicien un cambio profundo que den paso a soluciones concretas a los problemas de agua dentro de la Universidad.

Se sabe con certeza que dentro de la red de distribución de agua potable de Ciudad Universitaria el 50% del agua extraída de las fuentes de abastecimiento se pierden en fugas tanto en la red como dentro de las entidades universitarias, pérdidas que son debidas a las condiciones físicas y de operación del sistema de distribución en general. Dicha red ha crecido bastante y en

ocasiones sin una planeación estratégica, lo que da como resultado un proceso ineficiente a la hora de poner en marcha el proceso de distribuir agua a todo el campus.

Para poder tener una mejor percepción sobre el comportamiento del proceso de abastecimiento de agua a toda la red, fue que se realizó este trabajo de modelación, el cual consistió en una simulación estática o de flujo permanente con las ventajas de poder representar la red bajo un marco de condiciones críticas, donde se supone la apertura total de todas las tomas hacia el campus con la demanda base de 0.5 l/s en cada una de ellas. Se le dotó de las condiciones más próximas a las reales en cuanto a pozos y bombas, rugosidades, diámetros y longitudes de todas las tuberías, así como de los accesorios y aditamentos especiales que son empleados en el sistema real.

El modelado fue difícil debido a los pocos datos con los que se cuentan, que a pesar de estar trabajando en ellos, la DGOyO no tiene un registro 100% fiable sobre el comportamiento de la red, ya que en ocasiones en ciertas zonas de los mapas no está bien esclarecido la distribución del agua, algunas alturas de distintas tuberías no se encuentran claramente marcadas y varias veces se ha recurrido a la intuición para poder recabar datos, y es que basta con recordar que hay partes de la red que cuentan con mas de 50 años, por lo que es muy difícil saber las condiciones reales actuales de dichas tuberías, sin embargo el trabajo realizado muestra una aproximación muy buena, ya que se tuvo el cuidado necesario para cubrir con todos los requerimientos para el funcionamiento del sistema, arrojando resultados, en el mejor de los casos, con buenas velocidades y presiones en los sectores hidráulicos 3, 4 y 5, por otro lado los sectores con mayores problemas son el 1 y el 2.

Una opción viable para regular las presiones de todos los sectores son la colocación de Válvulas Reductoras de Presión (VRP), las cuales al suministrarlas a la red, presentan cambios considerables en ella, donde podemos reducir presiones de 6.0 kg/cm^2 hasta 3 o 4 kg/cm^2 y garantizando el óptimo funcionamiento de la red de acuerdo al Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable. Cabe mencionar que para mejorar el comportamiento de la red, también hubo modificaciones menores, donde se cambiaron algunas tuberías por unas de mayor diámetro para satisfacer velocidades en la red menores a 3 m/s.

Con los cambios propuestos, se comprueba con el modelado de la red que si son viables en cuanto al comportamiento y eficiencia se refiere dentro de las simulaciones, pero ahora habría que realizar estudios más detallados para afirmar si esos cambios pueden aplicarse al sistema real sin tener mayores afectaciones económicas y estructurales de la red de distribución. Cabe mencionar que por ser una red de distribución de muchas tuberías, cientos de accesorios, así como otros factores como las incrustaciones y deterioro de los tubos mismos, los resultados obtenidos se deben tomar bajo reserva de estudios alternativos más amplios que en un futuro cercano autoridades y estudiantes pueden realizar.

BIBLIOGRAFÍA.

- Anuario estadístico de la UNAM. Dirección General de Planeación. UNAM: 2009
- Manual de Incremento de Eficiencia Física. Hidráulica y Energética en sistemas de Agua Potable. Versión Preliminar. CONAGUA. Septiembre de 2009.
- Leal, Felipe. La Ciudad Universitaria de la UNAM. Patrimonio vivo de la humanidad
- Capella Vizcaíno, Antonio. Control de Presiones y Reducción de Fugas en la Red de Agua Potable de la Ciudad de México. Enero de 2001
- Ochoa Alejo, Leonel. Reducción Integral de Pérdidas de Agua Potable. IMTA. 2006
- <http://www.unam.mx/patrimonio/creacion.html>