

1. CAPÍTULO I: ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

Dentro de los objetivos del milenio 2030 (ODM), planteados por la Organización de Naciones Unidas (ONU) se prioriza en el objetivo N° 6 “Garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos”; en vista de que el agua es un recurso renovable, escaso y limitado, además que para la implementación de las redes de distribución de agua potable que abastecen las ciudades, se tiene que enfrentar a problemas referentes a las condiciones de su obtención y grandes inversiones que se requieren para su conducción, desde lugares cada vez más lejanos a las poblaciones, es un fenómeno global si bien se ha conseguido progresar de manera sustancial en los últimos años, a la hora de ampliar el acceso a agua potable y saneamiento.

Existen miles y millones de personas (principalmente en áreas rurales) que aún carecen de estos servicios básicos y las que ya cuentan con ellos se ven afectados por su mal uso y distribución inadecuada ocasionando problemas, que impactan negativamente más cada día en las familias, en su salud, economía, productividad y otros.

Los países latinoamericanos se encuentran dentro de la lista de los que más carecen de agua potable, sin embargo ya se están aplicando en los mismos, la tecnología, para optimizar, la dotación de este recurso tan preciado, para las personas; es así que en el caso de modelación de redes de agua potable con el software EPANET se tiene experiencia en Ecuador, Argentina, Perú y otros, con el fin de ahorrar, optimizar, y abaratar los costos de las redes de agua potable.

En el caso de Bolivia, se sigue implementando estas redes de forma convencional exponiéndose a las consiguientes deficiencias que se derivan de esta manera, todavía no se cuenta con datos que se haya utilizado la tecnología, como la del software EPANET, para la ejecución de alguna red de agua potable, por lo que se imposibilita la obtención de información.

En la ciudad de Tarija, donde el imaginario de ser la ciudad que cuenta con mayor ingreso de recursos económicos por la venta de hidrocarburos, ha motivado la llegada de familias tanto del interior del país como del norte argentino y de otros países, hecho que ha incrementado la formación de barrios periurbanos y los asentamiento poblacionales, donde muchas redes de agua han sido construidas presionadas por la urgencia, sin participación de profesionales ingenieros en varios casos, y que en la actualidad, les traen más pérdidas que beneficios a los usuarios. En este marco situacional y desde el enfoque de la ingeniería hidráulica se aporta con la presente investigación donde se plantea elaborar un modelo matemático suficientemente preciso y válido utilizando la herramienta EPANET, para realizar la modelación hidráulica de una red de distribución de agua potable.

1.2. Ubicación Geográfica

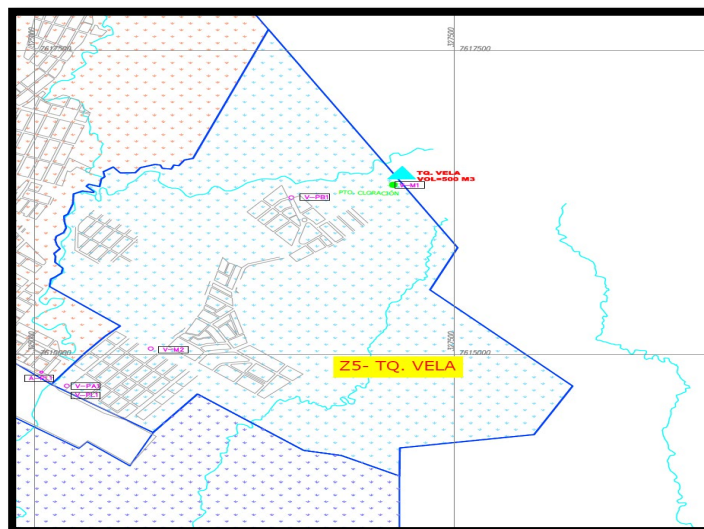
1.2.1. Descripción Específica del Área de Estudio

1.2.1.1. Ubicación del Estudio.

La zona de estudio es el sector Vela, se encuentra en la ciudad de Tarija, está sectorizado por COSAALT Ltda. Esta zona se localiza al sur de la ciudad, fue seleccionada conjuntamente con el personal técnico encargado. Específicamente la zona se encuentra localizada en las proximidades de la nueva terminal de buses y el barrio San Jorge, perteneciendo al distrito 10 de la ciudad de Tarija.

Esta zona está compuesta por: El barrio San Salvador, Las Retamas, y Urb. Vela. En la actualidad el barrio Retamas cuenta con una red de agua potable independiente y no pertenece a COSAALT, pero a una proyección a futuro será abastecida por la entidad. A continuación se observará el sector VELA (Z5-TQ VELA):

Figura 1. Sector Vela de la ciudad de Tarija



Fuente. Proporcionado por COSAALT Ltda.

Las coordenadas geográficas de las zonas mencionadas son:

- **Sector San Salvador.** UTM Zona: 20K, Abscisa: 325647.96 m E y Norte: 7614788.56 m S, elevación 1862.

Figura 2. Sector San Salvador



Fuente. Google Earth Pro.

- **Sector Urb. Vela.** UTM Zona: 20K, Abscisa:326746.23 m E y Norte: 7616026.00 m S, elevación 1887

Figura 3. Sector Urb. Vela.



Fuente. Google Earth Pro.

1.2.1.2. Vías de Acceso.

La vía de acceso a la zona de estudio es la avenida Panamericana, que es la ruta principal de la ciudad de Tarija.

Figura 4. Vías de acceso al sector Vela (San Salvador-Urb. Vela)



Fuente. Google Earth Pro.

1.3. Descripción del Problema

1.3.1. Planteamiento del Problema

En la actualidad la red de agua potable en el sector Vela, que está conformado por el barrio San Salvador y Urb. Vela, se encuentra operando de manera incierta y precaria, debido a que la red de distribución fue ejecutada a solicitudes de conexiones domiciliarias de manera arbitraria sin tomar en cuenta el crecimiento poblacional, tampoco se tuvo un estudio técnico previo, ni planificación alguna.

Todos estos factores requieren una evaluación del funcionamiento de la red de agua potable del sector; para llegar a conocer y predecir: capacidad bajas en las tuberías, cortes de servicio, roturas de tuberías, discontinuidad en el servicio y otros.

Lo que trae como consecuencia incidencias negativas en la salud de las familias, al tener cortes o falta de agua se exponen más a las enfermedades, al existir roturas en las tuberías se pierde la poca agua disponible afectando a su capacidad productiva y económica, desde que no pueden producir alimentos y productos, hasta que tienen que pagar para aprovisionarse de agua de los barrios aledaños.

Por esta razón, COSAALT dentro del programa de operación y mantenimiento de las redes de distribución de agua potable, especialmente en áreas de crecimiento y periféricas se ha priorizado realizar la optimización de los mismos, con el software EPANET, que es capaz de generar un modelo matemático, que representará las condiciones hidráulicas de dicha red.

1.3.2. Formulación del Problema

¿Se logrará optimizar y hacer sostenible la red de agua potable del sector Vela, mediante el software EPANET, evaluando su comportamiento hidráulico con base a la NB-689?

1.3.3. Sistematización del Problema

¿Cuál es el comportamiento hidráulico actual de la red de agua potable, aplicando el software EPANET?

¿Qué elementos hidráulicos de la red de agua potable, influyen negativamente en el comportamiento hidráulico?

¿Cuáles serán las soluciones para optimizar el funcionamiento de la red de agua potable en el sector Vela?

¿Cómo prever el funcionamiento hidráulico de la red bajo distintas condiciones de demanda y suministro?

¿Cómo se garantiza la sostenibilidad de la red de agua potable en el sector Vela, cada 10 años, en función a la disponibilidad de las fuentes de abastecimiento, como el crecimiento poblacional proyectado hasta el año 2040?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Evaluar el comportamiento hidráulico de la red de agua potable, en el sector Vela, Tarija, en base a la NB-689, mediante el software EPANET, para optimizarlo y hacerlo sostenible.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Modelar el comportamiento hidráulico actual de la red de agua potable aplicando el software EPANET.
- Identificar los factores que hacen deficiente el comportamiento hidráulico, de la actual red de agua potable sector Vela.
- Proponer alternativas de solución para las deficiencias hidráulicas encontradas en la red de agua potable, según la NB-689.

- Modelar escenarios del funcionamiento hidráulico de la red bajo distintas condiciones de demanda y suministro.
- Proponer esquemas hidráulicos cada 10 años, en función al escenario proyectado al año 2040.

1.5. Hipótesis

La evaluación del comportamiento hidráulico de la red de agua potable, en base la NB-689, mediante una modelación en EPANET, logrará la eficiencia y sostenibilidad del mismo.

1.6. Justificación del tema

1.6.1. *Justificación Teórica*

La falta de una planificación urbanística adecuada, ante el desordenado crecimiento de la ciudad de Tarija muy especialmente en las zonas periféricas, causan la problemática de la implementación de los servicios básicos insostenibles, particularmente en lo que se refiere al servicio de la redes de agua potable.

En cuanto a la modelación en EPANET, se puede decir que la misma resulta una herramienta muy útil para estudiar el comportamiento de una red de agua potable. Ya que es de fácil manejo y los resultados se pueden apreciar de manera rápida y muy comprensible. Tener la red completa de una ciudad modelada es una gran ventaja, debido a que nos permite conocer los puntos de conflicto, estudiar posibles mejoras obteniendo los resultados al instante, analizar el funcionamiento que tendrá la misma a lo largo del tiempo entre otras cosas. (Vergara Federico Martin, 2015).

Esta investigación de carácter explicativo, aporta de manera teórica a reducir el tiempo de una revisión técnica y disminuir el presupuesto en una implementación de emergencia, en caso de tener que ejecutar una red de agua potable de nuevos asentamientos o barrios. Sobre

todo se garantizará el cumplimiento de la NB-689, por lo que contará con la optimización y sostenibilidad requeridas.

1.6.2. *Justificación Práctica*

El principal aporte práctico que esta investigación brindará, es la realización de un modelo hidráulico que cumpla las normas establecidas en el país puesto que es facultad de la ingeniería hidráulica el poder brindar soluciones para que el escaso recurso del agua sea aprovechado y distribuido correctamente.

Al identificar los puntos deficientes se está garantizando que no haya interrupciones en el suministro de agua potable, que expongan a las familias en las enfermedades, ni provoquen pérdidas en la producción ni en la economía de las mismas; a tiempo que las instituciones responsables de la dotación del líquido elemento a la población como las cooperativas de agua y los municipios podrán contar con un modelo digitalizado de la red.

Por lo tanto la modelación de la red de agua potable en el sector Vela, con el software EPANET queda plenamente justificada por su importancia práctica.

1.6.3. *Justificación Metodológica*

Desde la perspectiva de la ingeniería, específicamente de la hidráulica, como la presente investigación aporta con el uso de una metodología tecnológica usando el software EPANET, para lograr los objetivos propuestos, se recurrió a la elaboración de un modelo hidráulico que se ajuste lo más exacto a la realidad, de manera que anteladamente se pueda observar el comportamiento hidráulico de la red agua potable en el sector Vela y proponer diferentes escenarios de solución. Esta metodología aporta un gran ahorro de tiempo como de recursos financieros, humanos y brinda una alta eficiencia en la evaluación de la red.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco Histórico

2.1.1. Antecedentes de Investigación

Dentro del marco histórico se tienen las siguientes tesis de grado relacionados con la modelación hidráulica de redes de distribución de agua potable a través de EPANET.

2.1.1.1. A Nivel Internacional

- **MODELACIÓN CON EPANET DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE VALLE HERMOSO (Martin Ignacio Acuña Pittari, Córdoba-Argentina. 2013)**

Se modeló la red de agua potable de la localidad de Valle Hermoso, utilizando como herramienta de trabajo al programa EPANET, el cual tiene por objeto evaluar la situación actual, verificar su funcionamiento y adecuarla a la norma ENOHSA, que servirán de base para futuras obras que realice la Secretaria de Recursos Hídricos y Coordinación de la Provincia de Córdoba.

- **MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE LA RED DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD LA QUIACA (Federico Martín Vergara, Córdoba-Argentina. 2015)**

Se modeló la red de agua potable en la ciudad de la Quiaca, la realización de este trabajo se basó, fundamentalmente, en aplicar los conocimientos adquiridos en la facultad, verificar su funcionamiento y adecuarla a la norma ENOHSA. Realizó cálculos, tanto en estado actual como del futuro, para poder cargar el modelo en el programa EPANET, una vez corrido el programa determinó los puntos de la red en donde se produjeron problemas en ambos estados.

- **ACTUALIZACIÓN DEL CATASTRO Y EVALUACIÓN DE LA RED MATRIZ DEL ACUEDUCTO VEREDAL ARUDEA EN ACACÍAS META (Andrés Mauricio Rojas Llanos, Danilo Meneses Toro, Bogotá D.C.- Colombia. 2017)**

El proyecto realizó la modelación hidráulica del acueducto veredal de Arvudea en el municipio de Acacias–Meta mediante el software EPANET con el fin de analizar el estado de operación actual y evaluar la respuesta del mismo ante futuras ampliaciones, esto último como consecuencia de la alta tasa de crecimiento poblacional que se ha presentado en el municipio en los últimos años debido principalmente a la aparición de nuevas instalaciones petroleras, de igual manera se realizó una actualización del catastro de redes, indispensable para detallar los elementos de control en el modelo hidráulico y obtener resultados acordes a las realidad.

- **MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE CONCORDIA, CANTÓN LA CONCORDIA, PROVINCIA DE SANTO DOMINGO DE LOS TSÁCHILAS (Álvaro Daniel Castillo Monge, Concordia-Ecuador. 2017)**

Este trabajo tuvo el objetivo principal de simular el comportamiento del sistema de agua potable de la ciudad de Concordia mediante la generación de un Modelo Hidráulico desarrollado en EPANET, que le permita al Gobierno Autónomo Municipal de la Concordia tomar decisiones a corto y largo plazo; modelo basado en una investigación de campo referente a pozos profundos, tanques de reserva, estaciones de bombeo, redes de distribución y una calibración con valores de presión y caudal medidos adecuadamente durante 24 horas en diecisiete puntos diferentes del área de cobertura dentro de la ciudad.

- **DISEÑO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DE LA PARROQUIA EL ROSARIO, CANTÓN GUANO, PROVINCIA DE CHIMBORAZO (Henry Paúl Estrada Vizuete, Chimborazo-Ecuador, 2019)**

Este trabajo necesita un correcto diseño que cumpla con las normas técnicas vigentes en el lugar de estudio, cuyo objetivo principal es suministrar adecuadamente de agua potable a la población. Esta red de agua potable presenta un sistema de abastecimiento ineficiente. Para solucionar este problema se ha planteado realizar el diseño de la red de abastecimiento de agua potable de la zona en estudio y la creación de un modelo matemático suficientemente preciso y válido utilizando la herramienta EPANET. De esta manera se podrá obtener la modelación o simulación del funcionamiento óptimo de la red. Con la creación del modelo matemático de la red de abastecimiento se desea obtener una caracterización adecuada del sistema, se podrá simular el comportamiento real del sistema a lo largo del día, donde se conseguirá gestionar, regular, controlar los elementos y parámetros hidráulicos que conforman el sistema.

- **DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DEL MUNICIPIO DE BEIRE (Sara Goñi Ortiz, Beire-Pamplona, 2017)**

El trabajo consiste en el diseño y optimización de la red de abastecimiento del municipio Navarro de Beire. Para ello, se realizan análisis tanto en régimen permanente como en régimen extendido y se somete a la instalación a diferentes situaciones desfavorables, para evaluar su respuesta. Se plantean un total de cinco prácticas, y para su desarrollo se utilizará un software gratuito de simulación de redes de abastecimiento denominado EPANET. La realización de estas prácticas permite al alumno, no sólo el aprendizaje y el manejo de un nuevo programa informático, sino también saber optimizar y diseñar redes de abastecimiento, ante las cuales deberá analizar su comportamiento y resolver posibles problemas que surgen.

2.1.1.2. A Nivel Local

- **CALIBRACIÓN Y SIMULACIÓN HIDRÁULICA EN REDES DE AGUA POTABLE BASADO EN SOFTWARE EPANET (Robert Jesús Segovia Viracocha, Tarija-Bolivia. 2004)**

El objetivo de este proyecto es la calibración y simulación hidráulica de una red de agua potable basado en un software EPANET, para tener un control del funcionamiento en el cual se reflejen los resultados del software con las mediciones en campo en la misma red, para después poder realizar simulaciones en distintos estados hipotéticos de funcionamiento de la red, ya que mediante las simulaciones el proyectista puede hacer un control siguiendo las Normas Técnicas de funcionamiento hidráulico, y así poder plantear estrategias de solución o mejoramiento del sistema de distribución de agua potable. Para la simulación de la red del barrio Catedral recopiló información de catastro urbano para ver la distribución de la urbanización, teniendo en cuenta la población futura para la zona.

- **ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO DE UN SISTEMA DE AGUA POTABLE A TRAVÉS DE DOS METODOS Y FORMA TRADICIONAL (José Luis Alachi Diaz, Tarija-Bolivia, 2010)**

En el trabajo se realizó el análisis hidráulico del diseño de un sistema de agua potable, tomando en cuenta la Norma Boliviana NB-689, para estimar los diferentes parámetros básicos de diseño. Se trato una red cerrada de distribución de agua, en un área determinado de la ciudad de Tarija, asumiendo los diferentes diámetros de cada tramo de tubería, para luego comprobar el diseño a través de los diferentes métodos estudiados en el proyecto. Se utilizó el método de Hardy-Cross con corrección de caudales, el método matricial denominado método del gradiente, el programa WaterCAD y el programa EPANET, con el objetivo de comparar resultados emitidos por cada uno de ellos.

2.2. Marco Conceptual

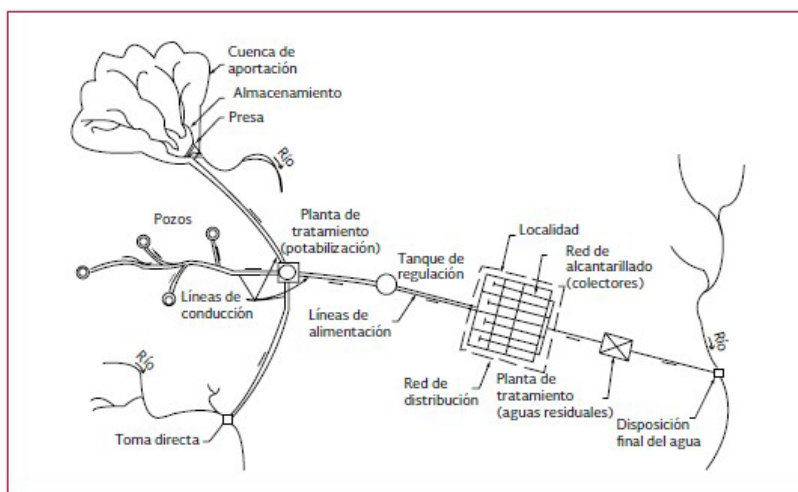
2.2.1. Redes de Distribución

2.2.2. Definición.

Una red de distribución (que en lo sucesivo se denominará red) es el conjunto de tubos, accesorios y estructuras que conducen el agua desde tanques de servicio o de distribución hasta la toma domiciliaria o hidrantes públicos.

Su finalidad es proporcionar agua a los usuarios para consumo doméstico, público, comercial, industrial, etc. La red debe proporcionar este servicio todo el tiempo, en cantidad suficiente, con la calidad requerida y a una presión adecuada. Los límites de calidad del agua para que sea considerada como potable se establecen en la Norma Boliviana NB-689 vigente. En la “Figura 5” se muestra la configuración típica de un sistema de abastecimiento de agua en localidades urbanas. (Manual de agua potable-diseño de redes (CONAGUA, 2019, p. 1)).

Figura 5. Sistema de abastecimiento de agua en localidades urbanas



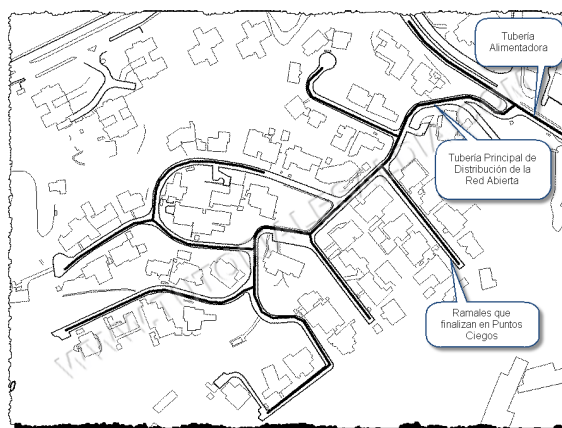
Fuente. madridpoceros.es, Madrid Poceros, (2014).

2.2.3. Tipos de Redes

2.2.3.1. Red Abierta o Ramificada

La red está constituida por tuberías que forman ramificaciones a partir de una línea principal, puede aplicarse en poblaciones semidispersas, dispersas o cuando por razones topográficas o de conformación de la población no es posible un sistema cerrado.

Figura 6. Red abierta



Fuente. Ingenieriacivil.tutorialesaldia.com, TutorialesIngenieriaCivil, (2013).

2.2.3.2. Red cerrada o Anillada

La red está constituida por tuberías que forman circuitos cerrados o anillos, puede aplicarse en poblaciones concentradas y semiconcentradas mediante redes totalmente interconectadas o redes parcialmente interconectadas, puede estar compuesta por una red de tuberías principales y una red de tuberías secundarias. (NB 689, 2004, p. 284).

2.2.3.3. Red mixta o Combinada

De acuerdo a las características topográficas y distribución de la población, pueden aplicarse en forma combinada redes cerradas y redes abiertas. (NB 689, 2004, p. 284).

Figura 7. Red cerrada



Fuente. Ingenieriacivil.tutorialesaldia.com, TutorialesIngenieriaCivil, (2013).

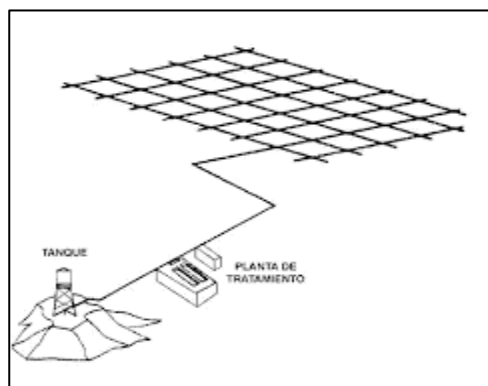
2.2.4. Formas de distribución

El líquido vital se distribuye a los usuarios de diferentes maneras en función de las condiciones topográficas e hídricas locales, de manera que el sistema sea económicamente viable y sustentable en el tiempo. (NB 689, 2004, p. 284).

2.2.4.1. Distribución por Gravedad

El sistema óptimo cuenta con un tanque de almacenamiento o de reserva a una altitud suficiente para garantizar las presiones adecuadas de distribución de agua potable, tomando en cuenta las pérdidas de carga. A partir del tanque de reserva, el agua recorre la red de distribución hasta las conexiones domiciliarias en función única y exclusivamente de la gravedad.

Figura 8. Distribución por gravedad



Fuente. Ingenieriacivilinfo.com, Ingenieriacivil, (2011).

2.2.4.2. Distribución por Bombeo

Debido a las condiciones topográficas o a las fuentes de agua en su mayoría subterráneas, los sistemas de agua potable pueden incluir estaciones de bombeo de tres formas:

2.2.4.2.1. Bombeo Directo a la Red

Las bombas impulsan el líquido vital directamente a la red de distribución hasta las conexiones domiciliarias sin almacenamientos. Este sistema es el menos indicado por los altos costos energéticos que conlleva encender las bombas durante todo el día, por el gran desperdicio de agua al no consumir toda el agua que bombea a la red en todos los horarios y sobre todo por la dependencia que tiene el suministro de agua a la población de la energía eléctrica.

2.2.4.2.2. Bombeo Directo a la Red con Almacenamiento

De manera similar al caso anterior, pero con la gran diferencia que los excesos de caudal que no son consumidos por los usuarios se almacenan en un tanque de reserva en un punto opuesto a la estación de bombeo. En periodos del día que la demanda es alta el tanque de reserva envía agua para complementar lo distribuido por bombeo, y en periodos de baja demanda el líquido se almacena en los tanques. (NB 689, 2004, p. 284).

2.2.5. Componentes de una Red

Una red de distribución se compone de tuberías, piezas especiales (agrupadas en cruceros), válvulas de diversos tipos, hidrantes contra incendio y públicos (en pequeñas localidades), tanques de regulación, rebombes y accesorios complementarios que permiten su operación, así como su mantenimiento. Se compone de:

2.2.5.1. Tuberías

Se le llama así al conjunto formado por los tubos (conductos de sección circular) y su sistema de unión o ensamble. Para fines de análisis se denomina tubería al conducto

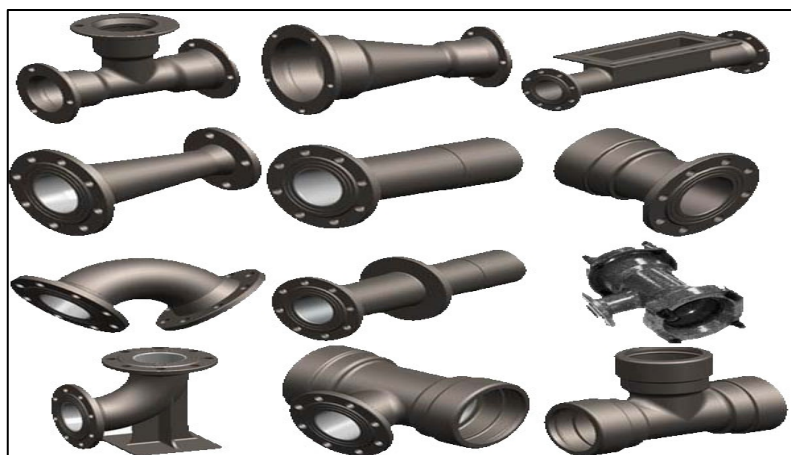
comprendido entre dos secciones transversales del mismo. La red de distribución está formada por un conjunto de tubos que se unen en diversos puntos denominados nodos o uniones.

De acuerdo con su función, la red de distribución puede dividirse en red primaria y red secundaria. A la tubería que conduce el agua desde el tanque de regulación hasta el punto donde inicia su distribución se le conoce como línea de alimentación y se considera parte de la red primaria. La división de la red de distribución en red primaria o secundaria dependerá del tamaño de la red y de los diámetros de las tuberías. (Manual de agua potable-diseño de redes (CONAGUA), 2019, p. 2).

2.2.5.2. Piezas especiales

Son todos aquellos accesorios que se emplean para llevar a cabo ramificaciones, intersecciones, cambios de dirección, modificaciones de diámetro, uniones de tubería de diferente material o diámetro y terminales de los conductos, entre otros. Se les llama cruceros a las piezas o conjuntos de accesorios especiales que, conectados a la tubería, forman deflexiones pronunciadas, cambios de diámetro, derivaciones y ramificaciones. También permiten el control del flujo cuando se colocan válvulas.

Figura 9. Piezas especiales utilizadas en Sistema de Agua Potable



Fuente. Alibaba.com, accesorioshierroductil, (2012).

2.2.5.3. Válvulas

Las válvulas son dispositivos mecánicos que son empleados para detener, iniciar o controlar las características del flujo en conductos a presión. Pueden ser accionadas manualmente o por medios automáticos o semiautomáticos. Así, existen accionadores eléctricos, hidráulicos o neumáticos, los cuales se usan en plantas de tratamiento o en instalaciones donde se requiere operar frecuentemente las válvulas. En redes de distribución son más usuales las válvulas que se operan manualmente mediante palancas, volantes y engranes, debido a que los cierres y aperturas son ocasionales. (Manual de agua potable-diseño de redes (CONAGUA), 2019, p. 2).

Las válvulas permiten el aislamiento de ciertos tramos de tubería para realizar labores de reparación y mantenimiento, simplemente evitar el flujo o cambiarlo de dirección. También permiten el drenar o vaciar una línea, controlar el gasto, regular los niveles en los tanques de almacenamiento, evitar o disminuir los efectos del golpe de ariete (cambios de presión que pueden colapsar la tubería), la salida o entrada de aire, así como evitar contraflujos, es decir, prevenir el flujo en dirección contraria a la de diseño.

2.2.5.4. Tanques de distribución

Es un depósito situado generalmente entre la captación y la red de distribución que tiene por objeto almacenar el agua proveniente de la fuente. El almacenamiento permite regular la distribución o simplemente prever fallas en el suministro, aunque algunos tanques suelen realizar ambas funciones. (Manual de agua potable-diseño de redes (CONAGUA), 2019, p. 3).

Se le llama tanque de regulación cuando guarda cierto volumen adicional de agua para aquellas horas del día en las cuales la demanda en la red sobrepasa el volumen suministrado por la fuente. La mayor parte de los tanques existentes son de este tipo. Algunos tanques disponen de un volumen de almacenamiento para emergencias, como en el caso de falla de la fuente. Este

caso es usualmente previsto por el usuario, quien dispone de cisternas o tinacos, por lo cual en las redes normalmente se utilizan tanques de regulación únicamente. Una red de distribución puede ser alimentada por varios tanques correspondientes al mismo número de fuentes o tener tanques adicionales de regulación dentro de la misma zona de la red con el fin de abastecer solo a una parte de la red. (Manual de agua potable-diseño de redes (CONAGUA), 2019, p. 3).

Figura 10. Tipos de tanques de reserva



Fuente. Modelación hidráulica ciudad Concordia, Castillo Monge Alvaro, (2017).

La selección del tipo de tanque depende del material disponible en la región de las condiciones topográficas y de la disponibilidad de terreno, se clasifican en:

2.2.5.4.1. Tanques Superficiales

Los tanques superficiales están contruidos sobre la superficie del terreno. La construcción de este tipo de tanques es común cuando el terreno es 'duro' o conviene no perder altura y la topografía adecuada. Los tanques superficiales se sitúan en una elevación natural en la proximidad de la zona por servir, de manera que la diferencia de nivel del piso del tanque con respecto al punto más alto por abastecer sea de 15 m y la diferencia de altura entre el nivel del tanque en el nivel máximo de operación y el punto más bajo por abastecer sea de 50 m.

2.2.5.4.2. Tanques Elevados

Los tanques elevados son aquellos cuya base está por encima del nivel del suelo y se sustenta a partir de una estructura. Generalmente son construidos en localidades con topografía plana donde no se dispone en su proximidad de elevaciones naturales con altimetría apropiada. El tanque elevado refiere una estructura integral que consiste en el tanque, la torre y la tubería de alimentación y descarga. Para tener un máximo beneficio, los tanques elevados, generalmente con torres de 10, 15 y 20 m de altura, se localizan cerca del centro de uso. En grandes áreas se colocan varios tanques en diversos puntos. La localización central decrece las pérdidas por fricción y permite equilibrar las presiones lo más posible.

2.2.5.5. Tomas Domiciliarias

Es el conjunto de piezas y tubos que permite el abastecimiento desde una tubería de la red de distribución hasta el predio del usuario, así como la instalación de un medidor. Es la parte de la red que demuestra la eficiencia y calidad del sistema de distribución, pues es la que abastece de agua directamente al consumidor. Se divide en dos partes: ramal y cuadro. Se le llama ramal a la conexión que abarca desde el acoplamiento a la red de distribución hasta el codo inferior del cuadro. El cuadro es propiamente el conjunto de tubos y codos que forman una figura rectangular con el objeto de alojar un medidor y que sea cómoda su lectura. El cuadro se encuentra generalmente dentro del domicilio del usuario.

2.2.5.6. Bombas

Las bombas reciben la energía mecánica proveniente de un motor a través de la flecha con el fin de elevar la carga de presión del agua para conducirla en la tubería. La gran mayoría de los sistemas de distribución y líneas de conducción de agua potable incorporan bombas en sus instalaciones para trasladar el agua a través del sistema o mantener presiones requeridas. Su aplicación específica permite:

- Elevar el agua desde fuentes superficiales o subterráneas a plantas de tratamiento, almacenamientos o directamente al sistema de distribución.
- Incrementar la presión para servir áreas de servicio ascendentes (booster).
- Bombear químicos en unidades de tratamiento, transportar el agua en las instalaciones de tratamiento, retro lavado de filtros, desalojar tanques sedimentadores y remover sólidos depositados.

Figura 11. Estación de bombeo



Fuente. Modelacion hidráulica ciudad Concordia, Castillo Monge Alvaro, (2017).

El agua subterránea constituye un recurso importante en el abastecimiento de agua potable. En general, el agua extraída del subsuelo no requiere tratamiento y su captación resulta más económica que en embalses. Además, las cantidades de agua disponible son más seguras y prácticamente no les afectan las sequías. Los métodos modernos de estudio de los acuíferos permiten determinar un aprovechamiento racional y prolongado del agua subterránea, aunque en ciertos casos de sobreexplotación de acuíferos puede requerirse una recarga artificial para evitar hundimientos o la contaminación de los acuíferos. Para aprovechar el agua subterránea se construyen pozos, los cuales son excavaciones o perforaciones verticales, normalmente hechas por el hombre, por las cuales el agua subterránea puede brotar o ser extraída del subsuelo.

Figura 12. Pozo de extracción de agua subterránea



Fuente. <https:carreras.unse.edu.ar>, pozosdeagua, (2021).

2.2.6. Parámetros Básicos de Diseño

Los estudios y parámetros básicos de diseño, son un conjunto de procedimientos y valores necesarios para el desarrollo del proyecto, los cuales son obtenidos en base a estudios de campo, recolección de información técnica, económica, social, ambiental y cultural de la población a ser beneficiada por el proyecto. Los parámetros básicos de diseño deben ser establecidos considerando el área del proyecto y el período de vida útil del proyecto. Entre los parámetros se deben considerar: (NB 689, 2004, p. 17).

2.2.6.1. Población del Proyecto

Es el número de habitantes que ha de ser servido por el proyecto para el período de diseño, el cual debe ser establecido con base en la población inicial. Para la estimación de la población de proyecto se deben considerar los siguientes aspectos:

2.2.6.1.1. Población Inicial

Referida al número de habitantes dentro el área de proyecto que debe ser determinado mediante un censo poblacional y/o estudio socio-económico. Se aplicarán los datos estadísticos del Instituto Nacional de Estadística (INE) para determinar la población de referencia o actual y los índices de crecimiento demográfico respectivos. (NB 689, 2004, p. 17).

2.2.6.1.2. Población Futura

Referida al número de habitantes dentro el área del proyecto que debe ser estimada en base a la población inicial, el índice de crecimiento poblacional y el período de diseño.

2.2.6.1.3. Métodos de Cálculo de Población

Para el cálculo de la población futura se pueden utilizar uno de los siguientes métodos de crecimiento, según el tipo de población, dependiendo de sus características socioeconómicas.

- **Aritmético**

$$P_f = P_o * \left(1 + \frac{i*t}{100}\right) \quad \text{Ecuación 1}$$

- **Geométrico**

$$P_f = P_o * \left(1 + \frac{i}{100}\right)^t \quad \text{Ecuación 2}$$

- **Exponencial**

$$P_f = P_o * e^{\left(\frac{i*t}{100}\right)} \quad \text{Ecuación 3}$$

- **Curva logística**

$$P_f = \frac{L}{1+m*e^{(a*t)}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Tabla 1. Aplicación de métodos de cálculo para la estimación de la población futura

Método	Población (habitantes)			
	hasta 5000	De 5001 a 20000	De 20001 a 100000	Mayores a 100000
Aritmético	X	X		
Geométrico	X	X	X	X
Exponencial	X (2)	X (2)	X (1)	X
Curva logística				X

Fuente. Norma Boliviana NB-689.

2.2.6.2. Área de Proyecto.

Se considera área de proyecto, a aquella que contará con el servicio de agua potable, para el período de diseño del proyecto. La delimitación del área de proyecto debe seguir los lineamientos del plan de desarrollo de la población o planes maestros, o ser establecido de acuerdo a un estudio de áreas de expansión futura.

De acuerdo a la magnitud y características de la población, se deben diferenciar claramente las áreas de expansión futura, industriales, comerciales, de equipamiento y áreas verdes. El área de proyecto se debe dividir en subáreas de acuerdo a rangos de densidad poblacional y por sus características socioeconómicas como centros urbanos y zonas periurbanas. (NB 689, 2004, p. 19).

2.2.6.3. Consumo de Agua

La dotación mínima a adoptarse debe ser suficiente para satisfacer los requerimientos de consumo doméstico, comercial, industrial y público, considerando las pérdidas en la red de distribución. (NB 689, 2004, p. 19).

2.2.6.3.1. Consumo Doméstico

En la determinación del consumo doméstico se deben considerar:

- Sistemas con conexiones domiciliarias, en los que, la dotación debe ser suficiente para abastecer los diferentes usos: aseo personal, descarga de sanitarios, lavado de ropa, cocina, riego de jardines y lavado de pisos.
- Sistemas con piletas públicas, en los que, la dotación media diaria debe ser suficiente para satisfacer los requerimientos de: aseo personal, lavado de ropa y cocina.

2.2.6.3.2. Consumo Comercial e Industrial

Se deben analizar las necesidades y requisitos de cada caso, así como su incidencia en los consumos máximos horarios. Los consumos deben ser diferenciados según zonas debido a que los consumos son característicos del tipo de comercio e industrias asentadas en las diferentes zonas. (NB 689, 2004, p. 22).

2.2.6.3.3. Consumo Público

El consumo público debe satisfacer los requerimientos de instituciones públicas, lavado de calles, riego de parques y jardines, y demanda para combatir incendios.

2.2.6.4. Dotación Media Diaria

La dotación media diaria se refiere al consumo anual total previsto en un centro poblado dividido por la población abastecida y el número de días del año. Es el volumen equivalente de agua utilizado por una persona en un día.

Para el caso de sistemas nuevos de agua potable, con conexiones domiciliarias, la dotación media diaria puede ser obtenida sobre la base de la población y la zona geográfica dada, según lo especificado. (NB 689, 2004, p. 21).

Tabla 2. Dotación media diaria (l/hab-d)

Zona	Población (habitantes)					
	Hasta 500	De 501 a 2000	De 2001 a 5000	De 5001 a 20000	De 20001 a 100000	Mas de 100000
Del Altiplano	30-50	30-70	50-80	80-100	100-150	150-200
De los Valles	50-70	50-90	70-100	100-140	150-200	200-250
De los llanos	70-90	70-110	90-120	120-180	200-250	250-350

Fuente. Norma Boliviana NB-689.

Las dotaciones indicadas son referenciales y deben ajustarse sobre la base de estudios que identifiquen la demanda de agua, capacidad de la fuente de abastecimiento y las condiciones socioeconómicas de la población, podrán utilizarse datos de poblaciones con características similares. (NB 689, 2004, p. 21).

2.2.6.5. Dotación Futura de Agua

La dotación media diaria puede incrementarse de acuerdo a los factores que afectan el consumo y se justifica por el mayor hábito en el uso de agua y por la disponibilidad de la misma. Por lo que, se debe considerar en el proyecto una dotación futura para el período de diseño, la misma que debe ser utilizada para la estimación de los caudales de diseño.

La dotación futura se debe estimar con un incremento anual entre el 0,50% y el 2% de la dotación media diaria, aplicando la fórmula del método geométrico:

$$D_f = P_o * \left(1 + \frac{d}{100}\right)^t \quad \text{Ecuacion 5}$$

Donde:

Df: Dotación futura en l/hab-d

Do: Dotación inicial en l/hab-d

d: Variación anual de la dotación en porcentaje

t: Número de años de estudio en años.

2.2.6.6. Caudales De Diseño

Los caudales de diseño deben ser estimados para el dimensionamiento de los diferentes componentes del sistema de agua potable. Se deben considerar los siguientes caudales:

2.2.6.6.1. Caudal Medio Diario

Es el consumo medio diario de una población, obtenido en un año de registros. Se determina con base en la población del proyecto y dotación, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Qmd = \frac{P_f * D_f}{86400} \quad \text{Ecuacion 6}$$

Donde:

Qmd: Caudal medio diario en l/s

Pf: Población futura en hab.

Df: Dotación futura en l/hab-d

2.2.6.6.2. Caudal Máximo Diario

Es la demanda máxima que se presenta en un día del año, es decir representa el día de mayor consumo del año. Se determina multiplicando el caudal medio diario por el coeficiente k1 que varía según las características de la población. (NB 689, 2004, p. 21).

$$Qmax.d = K_1 * Qmd \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

Qmáx.d: Caudal máximo diario en l/s

k1: Coeficiente de caudal máximo diario

k1: 1,20 a 1,50

Qmd: Caudal medio diario en l/s

2.2.6.6.3. Caudal Máximo Horario

Es la demanda máxima que se presenta en una hora durante un año completo. Se determina multiplicando el caudal máximo diario por el coeficiente k_2 que varía, según el número de habitantes, de 1,5 a 2,2, tal como se presenta en la Tabla 3. (NB 689, 2004, p. 21).

$$Q_{max.h} = K_2 * Q_{max.d} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$Q_{max.h}$: Caudal máximo horario en l/s

k_2 : Coeficiente de caudal máximo horario

$Q_{máx.d}$: Caudal máximo diario en l/s

Tabla 3. Valores del coeficiente K2

Población (habitantes)	Coeficiente k_2
Hasta 2000	2.20-2.00
de 2001 a 10000	2.00-1.80
de 10001 a 100000	1.80-1.50
Más de 100000	1.5

Fuente. Norma Boliviana NB-689.

2.2.6.7. Determinación de Caudales en Redes Cerradas

En redes cerradas la determinación de caudales en los nudos de la red principal se realizará por uno de los siguientes métodos:

2.2.6.7.1. Método de Área Unitaria

El caudal por nudo debe determinarse utilizando el caudal unitario superficial y el área de influencia del nudo. El caudal unitario superficial debe determinarse dividiendo el caudal máximo horario entre la superficie total del proyecto. Se aplica en poblaciones cuyas densidades poblacionales son uniformes. (NB 689, 2004, p. 286).

2.2.6.7.2. Método de Densidad Poblacional

El caudal por nudo debe determinarse utilizando el caudal unitario poblacional y la población del área de influencia del nudo. El caudal unitario poblacional debe determinarse dividiendo el caudal total entre la población total del proyecto. Se aplica en poblaciones cuyas densidades poblacionales no son uniformes. (NB 689, 2004, p. 286).

2.2.6.7.3. Método de longitud unitaria

El caudal por nudo debe determinarse utilizando el caudal unitario y la longitud del tramo correspondiente. El caudal unitario debe determinarse dividiendo el caudal máximo horario entre la longitud total de la red principal. Se aplica en poblaciones cuyas densidades poblacionales son uniformes. (NB 689, 2004, p. 287).

2.2.6.7.4. Método de la Repartición Media

El caudal por nudo debe determinarse utilizando los caudales de los tramos adyacentes. El caudal de tramos adyacentes debe determinarse con el caudal por tramo, repartiéndolos en partes iguales a los nudos de sus extremos. El caudal en cada tramo debe determinarse por el método de la longitud unitaria. Se aplica en poblaciones cuyas densidades poblacionales son uniformes. (NB 689, 2004, p. 287).

2.2.6.7.5. Método del Número de Familias

El caudal por nudo debe determinarse utilizando el caudal unitario y el número de familias del área de influencia del nudo. El caudal unitario debe determinarse utilizando el caudal máximo horario y el número total de familias. Se aplica en poblaciones cuyas densidades poblacionales no son uniformes. (NB 689, 2004, p. 287).

2.2.6.7.6. Determinación de Caudales en Redes Abiertas

Para la determinación de caudales en redes abiertas debe considerarse el número de conexiones:

- Para redes con más de 30 conexiones debe aplicarse uno de los métodos para redes cerradas.
- Para redes con menos de 30 conexiones debe determinarse el caudal por ramal, utilizando el método probabilístico o de simultaneidad, basado en el coeficiente de simultaneidad y el número de grifos.

2.2.6.8. Determinación de Caudal en Piletas Públicas

El caudal máximo por pileta pública debe ser determinado utilizando la población a servir por pileta, la dotación promedio por habitante, el porcentaje de pérdidas, eficiencia del sistema y el factor de uso del servicio. En ningún caso, el caudal por pileta pública y conexión domiciliaria debe ser menor a 0,10 l/s. (NB 689, 2004, p. 289).

2.2.6.9. Delimitación de Zonas de Presión

La red debe ser subdividida en tantas zonas de presión como fueran necesarias para atender las características topográficas y las condiciones de presión especificadas en la presente Norma. (NB 689, 2004, p. 289).

- Las presiones estáticas y dinámicas deben estar referidas al nivel de agua máximo y al nivel de agua mínimo del tanque de almacenamiento, respectivamente.
- Las presiones en la red de distribución deben estar condicionadas por la ubicación del tanque de almacenamiento.
- Áreas ubicadas en zonas altas que requieran mayores presiones deben tener sistemas separados de presión manteniéndose las presiones por medio de bombeo y tanques elevados.

2.2.6.10. Trazado de la Red

Preferentemente deben proyectarse redes cerradas cuando las posibilidades técnicas y económicas lo permitan. La forma y longitud de las mismas debe ceñirse a las características topográficas de la localidad, densidad poblacional y ubicación del tanque de almacenamiento. Se debe contemplar el desarrollo de la localidad para prever las futuras ampliaciones.

La red abierta solo debe aplicarse en poblaciones dispersas y/o nucleadas que presentan desarrollo a lo largo de las vías de acceso a la población, donde los tramos de tuberías para cerrar circuitos resulten muy largos o de escasa utilización.

La red mixta debe ser aplicada en poblaciones nucleadas y que además presentan un desarrollo a lo largo de las vías de acceso. (NB 689, 2004, p. 290).

2.2.6.11. Presiones de Servicio

Durante el período de la demanda máxima horaria, la presión dinámica mínima en cualquier punto de la red no debe ser menor a:

- Poblaciones iguales o menores a 2 000 habitantes 5,00 m.c.a.
- Poblaciones entre 2 001 y 10 000 habitantes 10,00 m.c.a.
- Poblaciones mayores a 10 000 habitantes 13,00 m.c.a.

Las presiones arriba mencionadas podrán incrementarse observando disposiciones municipales o locales de políticas de desarrollo urbano y según las características técnicas del sistema de distribución. En el caso de sistemas con tanques de almacenamiento, las presiones deben estar referidas al nivel de agua considerando el nivel de agua mínimo del tanque de almacenamiento. Las zonas ubicadas en terrenos altos que requieran mayores presiones deben contar con sistemas separados de presión por medio de bombas y/o tanques elevados. La presión estática máxima en la red no debe ser superior a los 70 m.c.a. La presión debe estar referida al

nivel máximo de agua. Cuando la presión sobrepase los límites establecidos máximos se debe dividir la red en zonas que trabajen con diferentes líneas piezométricas, mediante válvulas reguladoras de presión, cámaras rompe presión y/o la instalación de tanques paralelos.

2.2.6.12. Velocidades

La velocidad mínima en la red principal de distribución en ningún caso debe ser menor a 0,30 m/s para garantizar su autolimpieza. Para poblaciones pequeñas, se aceptarán velocidades menores, solamente en ramales secundarios. La velocidad máxima en la red de distribución no debe ser mayor a 2,00 m/s. (NB 689, 2004, p. 291).

2.2.6.13. Diámetros Mínimos

Los diámetros mínimos de las tuberías principales para redes cerradas deben ser:

- En poblaciones menores a 2 000 habitantes 1”
- En poblaciones de 2 001 a 20 000 habitantes 1 1/2”
- En poblaciones mayores a 20 000 habitantes 2”

En redes abiertas, el diámetro mínimo de la tubería principal debe ser de 1”, aceptándose, en poblaciones menores a 2 000 habitantes, un diámetro de 3/4” para ramales. (NB 689, 2004, p. 291).

2.2.6.14. Análisis Hidráulico

El diseño hidráulico de las redes, puede ser realizado por una de las siguientes fórmulas: Flamant, Darcy Weisbach, Hazen Williams u otros justificados técnicamente. (NB 689, 2004, p. 291).

2.2.6.14.1. *Diseño Hidráulico en Redes Abiertas*

En el dimensionamiento de las tuberías de redes abiertas deben considerarse los siguientes aspectos:

- La distribución del caudal es uniforme a lo largo de la longitud de cada tramo.
- La pérdida de carga en el ramal debe ser determinada para un caudal igual al que se verifica en su extremo inicial.
- Los caudales puntuales (escuelas, hospitales, etc.) deben ser considerados como un nudo.

Para el cálculo de ramales debe considerarse un caudal mínimo de 0,10 l/s.

2.2.6.14.2. Diseño Hidráulico de Redes Cerradas

Para el dimensionamiento de las tuberías de redes cerradas se deben considerar los siguientes aspectos:

- El caudal total que llega al nudo debe ser igual al caudal que sale del mismo.
- La pérdida de carga entre dos puntos por cualquier camino es siempre la misma.

En las redes cerradas se podrán considerar los siguientes errores máximos:

- 0,10 m.c.a. de pérdida de presión como máximo en cada malla y/o simultáneamente debe cumplirse en todas las mallas.
- 0,10 l/s como máximo en cada malla y/o simultáneamente en todas las mallas.
- Las redes cerradas no deben tener anillos mayores a 1 km por lado.
- Preferentemente las pérdidas de carga en tuberías principales y secundarias debe estar alrededor de 10 m/km.

Para el análisis hidráulico de una red de distribución cerrada pueden utilizarse uno de los siguientes métodos:

- Método de Hardy Cross.
- Método de Newton-Raphson.
- Método matricial.

- Otros métodos equivalentes.

2.2.6.15. Estaciones De Bombeo

Las estaciones de bombeo son un conjunto de estructuras civiles, dispositivos, tuberías, accesorios, motores y bombas que permiten elevar el agua de un nivel inferior a otro superior. (NB 689, 2004, p. 51).

2.2.6.15.1. Clasificación de las Estaciones de Bombeo

Las estaciones de bombeo pueden ser:

- Fijas, cuando la bomba se localiza en un punto estable y no es cambiada de posición durante su período de vida útil.
- Flotantes, cuando los elementos de bombeo se localizan sobre una plataforma flotante. Se emplea sobre cuerpos de agua que sufren cambios significativos de nivel.
- Móviles, cuando las bombas son localizadas sobre soportes o plataformas que permiten su cambio de posición accionadas por elementos motrices.

2.2.6.15.2. Capacidad de la Estación de Bombeo

Cuando el sistema de abastecimiento de agua incluye tanque de almacenamiento posterior a la estación de bombeo la capacidad de la tubería de succión (si corresponde), equipo de bombeo y tubería de impulsión deben ser calculadas con base en el caudal máximo diario y el número de horas de bombeo. (NB 689, 2004, p. 52).

$$Q_b = Q_{max.d} * 24/N \qquad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

Q_b: Caudal de bombeo en l/s.

Q_{max.d}: Caudal máximo diario en l/s.

N: Número de horas de bombeo.

Cuando el sistema de abastecimiento de agua no incluye tanque de almacenamiento posterior a la estación de bombeo la capacidad de la tubería de impulsión y equipo de bombeo debe ser calculada con base al caudal máximo horario y las pérdidas en la red de distribución.

2.2.6.15.3. Número de Horas de Bombeo

El número de horas de bombeo y el número de arranques en un día, dependen de los siguientes factores: Rendimiento de la fuente, Consumo de agua, Disponibilidad de energía y Costo. Por razones económicas y operativas, se aconseja que el período de bombeo en un día sea menor a 12 horas, que podrán ser distribuidas en una o más operaciones (arranques) de bombeo diarios. (NB 689, 2004, p. 56).

Principios Hidráulicos empleados por EPANET

A continuación se presentan los principios hidráulicos que emplea el software EPANET, para el modelo de la red de agua potable. (manual EPANET,2012, p. 29)

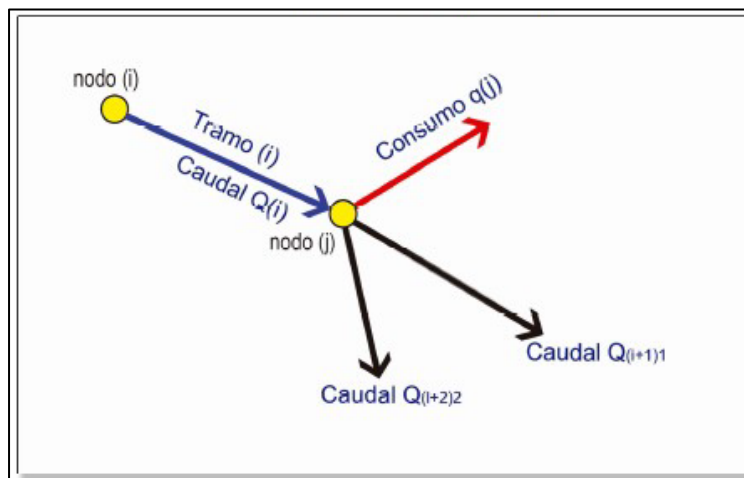
2.2.6.16. Ecuación de Continuidad en Nudos

Utiliza el principio de conservación de masa y determina que la suma algebraica de los caudales volumétricos que confluye en el nudo debe ser cero. (Castillo M. Alvaro, 2017, p. 35).

En cada nudo se plantea una ecuación de continuidad. Al nudo llegara agua por algún tubo y desde allí pueden salir caudal como demanda por uno o más tubos. Sea Q_1 el caudal que circula por el tramo i , que termina en el nudo j , y sea q , el caudal que se descarga en el nudo j :

Figura 14. Continuidad en nudos

$$Q_i = Q_{(i+1)1} + Q_{(i+2)2} + q_i \quad \text{Ecuación 13}$$



Fuente. Grafico Continuidad en nudos, Castillo Monge Alvaro, (2017).

2.2.6.17. Pérdidas de Energía o Carga por el Rozamiento en el Tubo

2.2.6.17.1. Fórmula Darcy-Weisbach

El software Epanet calcula las pérdidas de carga en la tubería mediante:

$$h = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

h = Pérdida de carga (m)

L = Longitud (m)

V = Velocidad media (m/s).

f = Factor de fricción

D = Diámetro (m)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2).

- **Número de Reynolds.**

El número de Reynolds es un parámetro adimensional muy importante de la mecánica de fluidos que se define como:

$$Re = \frac{\rho * D * V}{\mu} = \frac{D * V}{\nu} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido (Kg/m³)

μ = Viscosidad dinámica (N-s/m²)

ν = Coeficiente de viscosidad cinemática (m²/s).

V = Velocidad media (m/s).

D = Diámetro (m)

El número de Reynolds define los tipos de flujo en las tuberías de la siguiente forma:

- **Cálculo de Factor “f” de Fricción de Darcy-Weisbach.**

Si $Re < 2100$ (Ecuación de Poiseuille)

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{Ecuación 18}$$

Para $Re \geq 2100$ (Ecuación de Colebrook-White)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left(\frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} + \frac{ks}{3.71 * D} \right) \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

Ks, e: Rugosidad absoluta (m).

D: Diámetro interior (m).

Tabla 4. Rugosidad absoluta (Ks) para diferentes materiales.

Material	Ks (mm)
Vidrio	0.0003
PVC	0.0015
Polietileno (PE)	0.002
Asbesto cemento	0.030
Acero	0.046
Hierro forjado	0.06
Hierro fundido	0.12
Hierro galvanizado	0.15
Hierro dúctil	0.25
Concreto	0.9 - 9

Fuente: <https://es.scribd.com/document/Rugosidad-Absoluta-Materiales-Tuberías>.

2.2.6.17.2. Fórmula Hazen-Williams

$$h = \frac{k L}{D^{1.16}} \left(\frac{V}{C} \right)^{1.85} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

D = Diámetro (en ft o m)

V = Velocidad (en fps o m/s)

C = Hazen-Williams factor-C

L = Longitud en pies o metros

k = 6.79 para V en m/s, D en m

k = 3.02 para V en fps, D en ft

h y L: en las mismas unidades de longitud.

Tabla 5. Valores Coeficiente de Rugosidad Hazen-Williams (C)

Material de Tubería	C
Cemento Asbestos	140
Bronce	130-
Hierro Fundido	140
Concreto con recubrimiento.	130
Cobre	130-140
Hierro Galvanizado	120
Vidrio	140
Plomo	130-140
Plástico	140-150

Fuente. <https://slideplayer.es/slide/13923931/>, p. 18, 2018.

2.2.6.17.3. Fórmula de Manning

$$V = \frac{1}{n} * C_o * R^{2/3} * \left(\frac{h}{L}\right)^{1/2}$$

$$h = \frac{C_o * L * n^2 * V^2}{d^{1.33}}$$

Ecuación 21

Donde:

Co = 1.49 para unidades inglesas y 1.0 para unidades métricas

V = velocidad (fps o m/s)

R = Radio Hidráulico = área/perímetro mojado (ft o m)

H = Pérdida de carga (pies o metros)

L = longitud (pies o metros)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

Tabla 6. Comparación de Ecuaciones de Fricción

Darcy-Weisbach	Manning	Hazen-Williams
Todos los fluidos	Agua solamente	Agua solamente
Difícil obtener f	Fácil de obtener n	Fácil de obtener C
Para todos los regímenes	Flujo turbulento	Flujo laminar
No es usada comúnmente en USA	Usada comúnmente para Alcantarillado sanitario	Usada comúnmente en USA

2.2.6.17.4. Ecuación de Pérdida Localizada

La fórmula básica que se emplea para dichos cálculos es la de Darcy –Weisbach.

(manual EPANET,2012, p. 30)

$$h = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g}$$

El cual se sustituye $f * \frac{L}{D}$ Por un factor Km, característico de cada accesorio, el cual se determina experimentalmente:

$$h = km * \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde

Km = Coeficiente de Pérdidas menores

h = Pérdida de carga causada por Pérdidas menor.

2.2.7. Modelación Hidráulica

2.2.8. Introducción

Un fenómeno, ya sea real o ficticio, puede ser representado mediante un modelo, el cuál simula su comportamiento. A través de la modelación se busca mejorar la comprensión de la información de un sistema, conceptualizando y simplificándolo, partiendo del entendimiento de sus partes, y del sistema actuando como un todo. Mientras menos variables de incertidumbre se tengan el modelo, más se acercará a la realidad, haciendo que las decisiones que se tomen al evaluarlo frente a diferentes escenarios sean las más acertadas. (Nilien Pérez S., 2017, p. 17).

En el campo de la hidráulica, específicamente en el suministro de agua, la modelación hidráulica es la representación de los sistemas de abastecimiento de agua potable que muestren la realidad de la red instalada. Existen varios programas computacionales en el mercado que permiten realizar este tipo de modelación. Para los sistemas de distribución de agua potable, partiendo de datos básicos, la modelación hidráulica permite diseñar, evaluar y optimizar las redes de distribución para dotar del servicio en condiciones de cantidad y calidad necesarias.

Dentro de los modelos más usados para este tipo de sistemas se encuentra EPANET, el cual se utilizó en la modelación hidráulica, programa que se describirá más adelante. Cabe destacar que todas estas herramientas requieren información que muchas veces no es medida y eso dificulta la interpretación de los resultados obtenidos. (Nilien Pérez S., 2017, p. 17).

2.2.9. Importancia de un Modelo Hidráulico

Si analizamos desde el punto de vista de los resultados; muchas instituciones de abastecimiento de agua potable del país presentan los siguientes problemas en la operación del sistema a su cargo. (Nilien Pérez S., 2017, p. 18).

- Baja cobertura.
- Agua de calidad inadecuada y suministro intermitente.

- Bajas presiones de suministro y falta de confiabilidad en el servicio.

Una vez realizado un modelo hidráulico, una empresa de agua tendrá una herramienta con muchas ventajas, que crea sinergias por toda la empresa:

- Manejo de redes sin grandes conocimientos de mecánica de fluidos.
- Toma de decisiones referidas a operación, mantenimiento, ampliación sin gran riesgo y por lo tanto mayor seguridad de éxito.
- Mejoramiento de la solidez de la red, aspecto referido a evitar instalaciones y desinstalaciones interminables (por ejemplo, determinar dónde instalar los depósitos, válvulas y bombas).
- Es un instrumento para explicar inversiones o cambios en la red, que evita conflictos sociales y con las autoridades.
- Permite el análisis de la red en simulación estática o extendida (patrones de demanda: agrícola, industrial, comercial y residencial).
- Asegurar el abastecimiento de la población (presiones) en caso de ampliaciones.

2.2.10. Softwares Utilizados Para Modelación Hidráulica

El cálculo hidráulico de las redes de agua a presión es un trabajo laborioso por los múltiples elementos que forman parte de una red. Para paliar este problema, se han desarrollado varios programas informáticos que permiten conocer el funcionamiento hidráulico de un sistema a partir de un modelo que representa el sistema físico real; la gran mayoría de ellos cuentan con el Método de Gradiente Hidráulico como base de su algoritmo de cálculo. Cada uno de estos programas nos permite no sólo el diseño mediante la realización de los cálculos, sino que también nos facilita los resultados en formato gráfico y un informe dónde se indican los cálculos realizados y los resultados obtenidos. (Nilien Pérez S., 2017, p. 19).

Si bien un software no va a solucionar todos los problemas de diseño. Este sirve para tomar decisiones rápidas, permitiendo hacer ensayos, corridas para simular una red o algunas redes bajo distintas condiciones, controlar niveles de cloro, ubicar los sectores de baja y alta presión, de mayor y menor demanda, horas pico, etc.

2.2.11. Software EPANET

2.2.11.1. Que es EPANET

EPANET es un programa de ordenador que realiza simulaciones en periodos prolongados del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de suministro a presión. Una red puede estar constituida por tuberías, nudos (uniones de tuberías), bombas, válvulas y depósitos de almacenamiento o embalses.

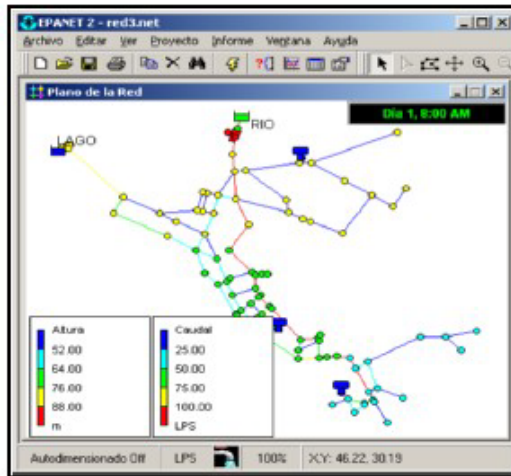
Este software efectúa un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías, las presiones en los nudos, los niveles en los depósitos, y la concentración de las especies químicas presentes en el agua, a lo largo del periodo de simulación discretizado en múltiples intervalos de tiempo. Además de la concentración de las distintas especies, puede también simular el tiempo de permanencia del agua en la red y su procedencia desde las diversas fuentes de suministro. (EPANET 2 manual, 2017, p. 1).

También puede utilizarse para muchas aplicaciones diferentes en el análisis de los sistemas de distribución. El programa cuenta con las siguientes prestaciones adicionales:

- Visualización de resultados numéricos o codificados en colores sobre el esquema de la red.
- Tablas de resultados numéricos para estados instantáneos o evoluciones, con búsquedas selectivas.
- Gráficas de evolución de presiones, caudales, concentraciones, etc.

- Posibilidad de abrir varias ventanas simultáneamente para comparar resultados.

Figura 15. Interfaz de EPANET



Fuente. Manual de EPANET 2, Lewis A. Rossman, (2017)

2.2.11.2. Descripción del Software Utilizado

Las principales características del programa que se pueden citar son:

- Se puede simular varios elementos, se encuentran fundamentalmente tubos, nodos, depósitos y embalses (referencias de carga constante) y adicionalmente permite utilizar elementos más complejos como bombas y válvulas.
- El programa sigue el flujo de agua en cada tubo, la presión en cada nodo, la altura del agua en cada tanque, y la concentración de una especie química a través de la red durante un período de simulación. Especies químicas, la edad del agua, la fuente y el rastreo pueden ser simulados.
- Proporciona un entorno informático integrado para la edición de datos de la red de entrada, para ejecutar simulaciones hidráulicas y de calidad del agua, y pudiendo ver los resultados en una variedad de formatos bastante amplia. Estos incluyen

códigos de colores planos de la red, tablas de datos, gráficos de series temporales y gráficos de curvas de nivel.

- También puede utilizarse para planificar y mejorar el rendimiento hidráulico de un sistema. El software puede ayudar con la tubería, la bomba y la colocación de la válvula y el tamaño; minimización de la energía, análisis de flujo de fuego, los estudios de vulnerabilidad y capacitación de los operadores.
- Se permite exportar directamente una red previamente dibujada en AutoCad mediante el programa EpaCAD.

2.2.11.3. Aplicaciones del Software EPANET 2.0vE

EPANET contiene un simulador hidráulico muy avanzado que ofrece las siguientes prestaciones. (EPANET 2 manual, 2017, p. 1).

- No existe límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesarse.
- Las pérdidas de carga pueden calcularse mediante las fórmulas de Hazen-Williams, de Darcy-Weisbach o de Chezy-Manning.
- Contempla pérdidas menores en codos, accesorios, etc.
- Admite bombas de velocidad fija o variable.
- Determina el consumo energético y sus costes.
- Permite considerar varios tipos de válvulas, tales como válvulas de corte, de retención, y reguladoras de presión o caudal.
- Admite depósitos de geometría variable (esto es, cuyo diámetro varíe con el nivel).
- Permite considerar diferentes tipos de demanda en los nudos, cada uno con su propia curva de modulación en el tiempo.
- Permite modelar tomas de agua cuyo caudal dependa de la presión (rociadores).

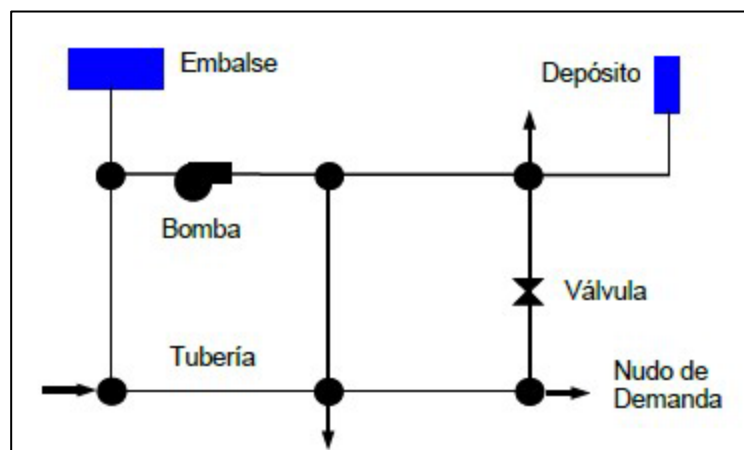
2.2.11.4. Limitaciones del Software EPANET

- Es recomendable para sistemas con tuberías con un diámetro de más de 75 mm.
- No es directamente compatible con CAD-Software. (Beerhalter 2000)

2.2.11.5. Componentes físicos

EPANET modela un sistema de distribución de agua como un conjunto de líneas conectadas por sus nudos extremos. Las líneas representan tuberías, bombas, o válvulas de control. Los nudos representan puntos de conexión entre tuberías o extremos de las mismas, con o sin demandas (en adelante los denominaremos en general Nudos de Caudal), y también depósitos o embalses. La figura siguiente muestra cómo se interconectan todos estos objetos entre sí para formar el modelo de una red. (EPANET 2 manual, 2017, p. 25)

Figura 16. Componentes físicos de un sistema de distribución



Fuente. Manual de EPANET 2, Lewis A. Rossman, (2017).

2.2.11.5.1. Nudos

Los Nudos son los puntos de la red donde confluyen las tuberías o bien sus extremos, y a través de ellos el agua entra o sale de la misma (también pueden ser sólo puntos de paso). Los datos básicos imputados a los nudos son:

- La cota respecto a un nivel de referencia (usualmente el nivel del mar).

- La demanda de agua (flujo que abandona la red).

Los resultados obtenidos para los nudos, en cada uno de los periodos de simulación, son:

- la altura piezométrica (energía interna por unidad de peso del fluido, o bien suma de la cota más la altura de presión).
- La presión.

Los nudos de caudal pueden también:

- Presentar una demanda variable en el tiempo.
- Tener asignados distintos tipos de demanda (doméstica, industrial, etc.).
- Presentar una demanda negativa, indicando que el caudal entra a la red a través del nudo.

2.2.11.5.2. Embalses

Los Embalses son nudos que representan una fuente externa de alimentación, de capacidad ilimitada, o bien un sumidero de caudal. Se utilizan para modelar elementos como lagos, captaciones desde ríos, acuíferos subterráneos, o también puntos de entrada a otros subsistemas. Los embalses pueden utilizarse también como puntos de entrada de contaminantes.

Las propiedades básicas de un embalse son su altura piezométrica (que coincidirá con la cota de la superficie libre del agua si éste se encuentra a la presión atmosférica), y la calidad del agua en el mismo, caso de realizar un análisis de calidad.

Dado que un embalse actúa como un elemento de contorno del sistema, su altura o calidad del agua no se verán afectados por lo que pueda ocurrir en la red. Por consiguiente, no existen resultados derivados del cálculo en los mismos. No obstante, su altura puede hacerse variar con el tiempo asociándole una curva de modulación. (EPANET 2 manual, 2017, p. 26)

2.2.11.5.3. Depósitos

Los Depósitos son nudos con cierta capacidad de almacenamiento, en los cuales el volumen de agua almacenada puede variar con el tiempo durante la simulación.

Los datos básicos de un depósito son:

- La cota de solera (para la cual el nivel del agua es cero).
- El diámetro (o su geometría si no es cilíndrico).
- El nivel del agua inicial, mínimo y máximo del agua.

Los principales resultados asociados a un depósito, a lo largo de la simulación, son:

- La altura piezométrica (cota de la superficie libre).
- La presión (o nivel del agua).

El nivel del agua en los depósitos debe oscilar entre el nivel mínimo y el nivel máximo.

EPANET impide la salida del agua del depósito cuando está a su nivel mínimo y cierra la entrada de agua cuando está a su nivel máximo. Los depósitos también pueden utilizarse como puntos de entrada de contaminantes a la red. (EPANET 2 manual, 2017, p. 26)

2.2.11.5.4. Tuberías

Las tuberías son líneas que llevan el agua de un punto de la red a otro. EPANET asume que todas las tuberías se encuentran completamente llenas en todo momento, y por consiguiente que el flujo es a presión. La dirección del caudal es siempre del nudo de mayor altura piezométrica al de menor altura piezométrica (energía interna por unidad de peso del agua o bien suma de la cota más la presión). Los principales parámetros hidráulicos de una tubería son:

- Los nudos de entrada y salida.
- El diámetro.
- La longitud.

- El coeficiente de rugosidad (para determinar pérdidas).
- Su estado (abierta, cerrada o con una válvula).

Los parámetros de estado de las tuberías se emplean para contemplar elementos tales como: válvulas de corte o seccionamiento, o válvulas de retención (válvulas que permiten el paso del flujo en un solo sentido) sin tener que modelar estos elementos explícitamente. Los resultados de una tubería contemplan. (EPANET 2 manual, 2017, p. 28).

- El caudal de circulación.
- La velocidad del flujo.
- La pérdida de carga unitaria.
- El factor de fricción para la fórmula de Darcy-Weisbach.

Las pérdidas de carga (o altura piezométrica) en una tubería debido a la fricción por el paso del agua puede calcularse utilizando tres fórmulas de perdidas diferentes:

- La fórmula de Hazen-Williams.
- La fórmula de Darcy-Weisbach.
- La fórmula de Chezy-Manning.

La fórmula de Hazen-Williams es la más utilizada en el ámbito anglosajón. No se puede usar con otro líquido que no sea agua y fue desarrollada original y únicamente para régimen turbulento. Desde el punto de vista académico la fórmula de Darcy-Weisbach es la más exacta, y es aplicable a todo tipo de líquidos y regímenes. Finalmente, la fórmula de Chezy-Manning es utilizada usualmente para canales y tuberías de gran diámetro, donde la turbulencia está muy desarrollada. (EPANET 2 manual, 2017, p. 28).

2.2.11.5.5. Bombas

Las bombas son líneas que aportan energía al fluido elevando su altura piezométrica. Los datos principales de una bomba son sus nudos de aspiración e impulsión y su curva característica (relación entre la altura y caudal de la bomba). El resultado principal asociado a una bomba es el incremento de altura comunicada al fluido. El caudal a través de una bomba es de sentido único, y EPANET no permite a la bomba operar fuera del rango delimitado por su curva característica. (EPANET 2 manual, 2017, p. 30).

Al igual que las tuberías, las bombas pueden activarse (arranque) y desactivarse (desconectarse) en determinados momentos establecidos por el usuario o bien cuando existan ciertas condiciones en la red. El modo de operación de la válvula puede describirse asignándole un patrón de tiempos con los correctores de velocidad. EPANET también puede tener en cuenta el consumo de energía y el coste de la bomba. A cada bomba se le puede asignar una curva de eficiencia y una lista de precios de energía. Si no se dispone de estos valores entonces utiliza condiciones energéticas generales.

El caudal que atraviesa una bomba es unidireccional. Si las condiciones del sistema requieren que la bomba trabaje fuera de sus posibilidades, EPANET intentará desconectarla. Si el sistema requiere un caudal mayor que el que puede trasegar, EPANET extrapolará una curva para el caudal requerido, aunque produzca una altura negativa. En ambos casos aparecerá un mensaje de advertencia. (EPANET 2 manual, 2017, p. 31).

2.2.11.5.6. Válvulas

Las válvulas son líneas que limitan la presión o el caudal en un punto determinado de la red. Los datos principales de una válvula son:

- Los nudos aguas arriba y aguas abajo.
- El diámetro.

- La consigna.
- Su estado (forzado o no).

Los resultados asociados con una válvula son básicamente el caudal de paso y la pérdida de carga. Los tipos de válvulas contemplados en EPANET. (EPANET 2 manual, 2017, p. 31).

2.2.11.5.7. Las Válvulas Reductororas de Presión

Tratan de limitar la presión en el nudo aguas abajo de la válvula, para que no exceda de un valor de consigna prefijado. EPANET determina en cada momento en cuál de los tres estados posibles se encuentra la válvula. (EPANET 2 manual, 2017, p. 32).

- Parcialmente abierta (esto es, activa) para mantener la presión aguas abajo en el valor de consigna prefijado, siempre y cuando la presión aguas arriba sea superior al valor de consigna.
- Completamente abierta, si la presión aguas arriba es inferior al valor de consigna.
- Cerrada, si la presión aguas abajo excede a la del nudo aguas arriba (para impedir el flujo inverso).

2.2.11.5.8. Las Válvulas Sostenedoras de Presión

Tratan de mantener la presión en el nudo aguas arriba de la válvula. EPANET determina asimismo en cada momento en cuál de los tres estados posibles se encuentra la válvula. (EPANET 2 manual, 2017, p. 32).

- Parcialmente abierta (esto es, activa) para mantener la presión aguas arriba en el valor de consigna prefijado, siempre y cuando la presión aguas abajo sea inferior al valor de consigna.
- Completamente abierta, si la presión aguas abajo es superior al valor de consigna.

- Cerrada, si la presión aguas abajo excede a la del nudo aguas arriba (para impedir el flujo inverso).

2.2.11.5.9. Las Válvulas de Rotura de Carga

Fuerzan el valor de la caída de presión a través de la válvula. El flujo a través de la válvula puede ser en cualquier dirección. Estas válvulas no representan a ningún componente físico, pero son muy útiles para simular situaciones en las que la caída de presión a través de la válvula es conocida. (EPANET 2 manual, 2017, p. 32).

2.2.11.5.10. Las Válvulas Limitadoras de Caudal

Limitan el caudal de paso a través de la válvula a un valor prefijado. El programa emite un mensaje de advertencia si no puede conseguirse dicho caudal, a no ser que hubiera un aporte de energía (esto es, si el caudal a válvula abierta fuera inferior al de consigna). (EPANET 2 manual, 2017, p. 32).

2.2.11.5.11. Las Válvulas de Regulación

Son bidireccionales y simulan una válvula parcialmente cerrada, cuyo comportamiento queda determinado por el valor del coeficiente de pérdidas menores en la válvula. Usualmente los fabricantes proporcionan la relación entre dicho coeficiente y el grado de apertura de la válvula. (EPANET 2 manual, 2017, p. 32).

2.2.11.6. Pérdidas Menores

Las pérdidas menores se deben al incremento de la turbulencia que se produce cuando el flujo de agua en las tuberías cambia de dirección debido a los accesorios tales como codos, válvulas, tee, etc. La importancia de incluir estas pérdidas depende del tipo de red a modelar y la precisión de los resultados que deseamos obtener. Para tenerlas en cuenta hay que incluirlas entre los datos de las tuberías.

El valor de la pérdida será el producto de dicho coeficiente por la altura dinámica de la tubería. Donde k es igual coeficiente de pérdidas menores, v = velocidad del flujo, g = aceleración de la gravedad. La tabla 3.3 del manual proporciona el valor de los coeficientes de pérdidas menores para algunos de los accesorios más comunes. (EPANET 2 manual, 2017, p. 30).

2.2.11.7. Componentes No Físicos

Además de los componentes físicos, EPANET tiene tres tipos de componentes complementarios, curvas de comportamiento, curvas de modulación y leyes de control, los cuales describen aspectos sobre el comportamiento y modo de operación del sistema. (EPANET 2 manual, 2017, p. 33).

2.2.11.7.1. Curvas de Comportamiento

Las curvas de comportamiento son objetos que contienen pares de datos ordenados los cuales representan una relación entre dos magnitudes. Dos o más objetos físicos pueden compartir la misma curva en un modelo de EPANET se pueden declarar los siguientes tipos de curvas. (EPANET 2 manual, 2017, p. 33).

2.2.11.7.2. Curvas Características de Bombeo

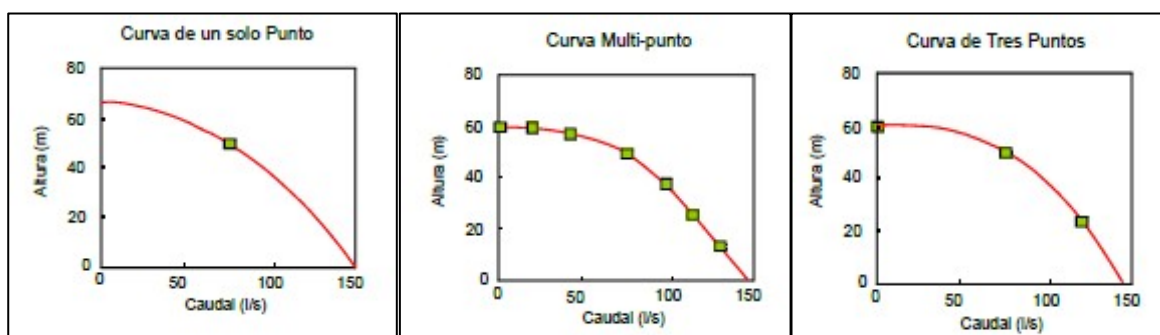
Una Curva Característica representa la relación entre la altura y el caudal que puede desarrollar una bomba a su velocidad nominal. (EPANET 2 manual, 2017, p. 34).

- La Altura es la energía que la bomba aporta al agua y se representa en el eje vertical (Y) en pies (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.

- EPANET utilizará diferentes tipos de curvas características dependiendo del número de puntos suministrados: Curva de un solo punto, de tres puntos y multipunto.
- EPANET desactivará la bomba si el sistema demanda una altura mayor que la del primer punto de la curva (es decir, la altura a válvula cerrada).
- Se debe suministrar una curva característica para cada bomba del sistema a menos que la bomba sea una bomba de energía constante.

A continuación, se muestran las figuras de las tres curvas características usadas.

Figura 17. Curvas Características



Fuente. Manual de EPANET 2, Lewis A. Rossman, (2017).

2.3. Marco Normativo

2.3.1. Normas Bolivianas (*Abastecimiento de Agua Potable*)

El presente trabajo se apoya en las siguientes normativas:

- **Norma Boliviana NB 689, Instalaciones de agua- Diseño para sistema de agua potable – diciembre 2004.**

La norma establece los criterios técnicos de diseño de sistemas de agua potable de carácter público y/o privado, en el área urbana, peri-urbana y rural del país, para obtener obras con calidad, seguridad, durabilidad y economía; y de esa manera, contribuir al mejoramiento del nivel de vida y salud de la población. Esta norma se aplica a nivel nacional para el diseño, ejecución o control de sistemas de agua potable públicos y/o privados.

Las siguientes normas están asociadas o son complementarias a la presente norma:

- **NB 213 Tuberías plásticas - Tubos de policloruro de vinilo (PVC-U) no plastificado para conducción de agua potable.**

Esta norma establece los requisitos que deben cumplir las tuberías de policloruro de vinilo (PVC-U) no plastificado, usadas para la conducción de agua potable a temperatura ambiente, a las presiones indicadas y los métodos de ensayo para la comprobación de estos requisitos.

- **NB 495 Agua potable - Definiciones y terminología.**

Esta norma establece las definiciones y términos empleados en las normas sobre agua potable, sistemas de abastecimiento de agua, muestreo y análisis de laboratorio.

- **Reglamento nacional de instalaciones sanitarias domiciliarias.**

Este Reglamento Nacional, se constituye en uno de los instrumentos normativos técnicos más importantes del sector, que permitirá reglamentar el diseño y la construcción de los sistemas

sanitarios domiciliarios y será de utilidad a las Entidades Prestadoras de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario (EPSA), Gobiernos Municipales, organizaciones gestoras y administradoras de los servicios de agua potable, instituciones locales de desarrollo, empresas consultoras, empresas constructoras y profesionales del sector en general, para alcanzar las metas establecidas, en beneficio de la población boliviana.

El Reglamento Nacional de Instalaciones Sanitarias Domiciliarias (RENISDA) tiene por objeto establecer los requisitos técnicos mínimos para la planificación, el diseño, la construcción y puesta en servicio de las instalaciones domiciliarias de agua potable, evacuación de aguas residuales y el drenaje de las aguas pluviales.

2.3.2. Normas Extranjeras

Dentro de las normas extranjeras relacionadas con los sistemas de abastecimiento se encuentran:

- **Norma Española EMACSA: Norma de Abastecimiento de Agua -10/ 2012.**

Esta norma tiene por objeto facilitar la información técnica necesaria y establecer los criterios que han de cumplir las redes e instalaciones de abastecimiento de agua en su proyecto y construcción.

- **Manual México MAPAS: MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO, MODELACIÓN HIDRÁULICA Y DE CALIDAD DEL AGUA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN**

Está dirigido a quienes diseñan, construyen, operan y administran los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento del país; busca ser una referencia sobre los criterios, procedimientos, normas, índices, parámetros y casos de éxito que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en su carácter de entidad normativa federal en materia de agua.

3. CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de Investigación

La presente es una investigación de tipo **explicativa** según Borja, (2012), porque se busca la causa, para optimizar el funcionamiento de la red de agua potable en el sector Vela; profundizando más allá de la descripción de los elementos que la componen, se centra en explicar el ¿por qué? de los cambios en las presiones, las discontinuidad en el suministro y otros. Estableciendo así la relación de las variables propuestas. Así mismo tiene un enfoque **Cuantitativo**, debido a que se recolectan datos, referidos a mediciones, tamaños, volúmenes y otros, para comprender la situación de la red de agua potable, considerando las características relacionadas con la población, la topografía del sector, las estructuras de abastecimiento y el catastro de la red. También se puede caracterizar como una investigación **transversal** si se considera que el fenómeno de estudio, la red de agua potable en el sector Vela, en un momento determinado del tiempo, constituido en el presente año y no se ha determinado continuar estudiando la evolución de la red.

3.2. Estudio de Caso

Según el autor Niño, (2011), son investigaciones centradas en el examen de sucesos, acontecimientos o incidentes de una persona o de un caso que equivale al estudio de una situación personal, o de grupos, familias, comunidades. En la presente investigación se ha tomado la red de agua potable del sector Vela, Tarija, como caso representativo de muchas redes similares existentes en la actualidad de los diferentes barrios periurbanos. Así mismo, se ha tenido el cuidado al seleccionarlo tenga la característica de ser un caso típico, donde la secuencia de sucesos han sido las mismas para responder a la necesidad de abastecimiento de agua potable que tienen las familias que viven en los diversos asentamientos.

3.3. Diseño de Investigación

En cuanto al diseño, el presente estudio esta clasificado como **pre-experimental** según Borja (2012), porque consiste en administrar un estímulo en este caso vendria a ser la modelacion en el software EPANET, al objeto de estudio ó sea la red de agua potable, “para luego determinar el cambio en el comportamiento hidráulico que se manifiesta optimo y sustentable constituyendose asi en variables dependiente”.(Borja, 2012).

Se especifica que dentro del diseño pre-experimental corresponde a un estudio de **pre-prueba y post-prueba con un solo grupo**, debido a que se hizo una medición al inicio, es decir, con la aplicación del Software EPANET, se efectúo un modelo de toda la red para conocer su comportamiento hidráulico actual, posteriormente se realizó otra medicion con un modelo optimizado de la red, de manera que se contó con un punto de referencia inicial para analizar.

3.4. Universo de Trabajo y Muestra

Al seleccionar un caso representativo como lo es, la red de agua potable del sector Vela, Tarija, se esta recurriendo al muestreo no probabilistico, de acuerdo a Borja, (2012), no es posible calcular el error estándar, así como el nivel de confianza con el que hacemos la estimación y la selección de los elementos no depende de la probabilidad sino del criterio del investigador. Por lo tanto la muestra vendria a constituirse en espontánea, que se utiliza cuando no se tienen referencias precisas acerca de la población total, que facilita en este caso la presente investigacion.

3.5. Variables

3.5.1. *Variable Independiente*

Evaluación del Comportamiento Hidráulico de la red de agua potable en base a la NB-689, a través de una modelación en EPANET.

3.5.2. *Variable Dependiente 1*

Eficiencia de la red de agua potable.

3.5.3. *Variable Dependiente 2*

Sostenibilidad de la red de agua potable.

3.6. Instrumentos

Los principales instrumentos que se utilizaron en la recolección de la información para cumplir con los objetivos propuestos en la presente investigación fueron los siguientes:

- Entrevista a expertos (COSAALT-Ingenieros-Operador técnico).
- Visitas técnicas.
- Entrevistas.
- Software EPANET.
- Mediciones de caudales.

Estos instrumentos estuvieron enfocados a recoger la información requerida para lograr los objetivos.

3.7. Operacionalización de las Variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicador	Medición	Rango de Variabilidad
Var. Independiente: Comportamiento hidráulico de la red de agua potable	Según Vera Domingo, (2019). Es la capacidad de presión y velocidad, que experimenta el sistema de tuberías.	Para evaluar el comportamiento hidráulico de una red de distribución en la que se conocen los diámetros, longitudes y topografía; se requiere determinar las cargas de presión en los nodos que posee y las velocidades que fluyen en los tubos que la componen, mediante un modelo hidráulico generado en el software Epanet.	1.Comportamiento hidráulico 2.Software	-Velocidad -Presión -EPANET	m/s mca ----	0.3 – 2 m/s 5, 10 mca ----
Var. Dependiente 1: Eficiencia de la red de agua potable	Eficiencia: Es la capacidad de lograr un efecto deseado en cuestión, con el mínimo de recursos posibles o con el menor tiempo posible. Red de agua potable: Es aquella que facilita que el agua avance desde el punto de captación hasta el punto de consumo en condiciones aptas para el consumo.	Para que la red de distribución actual sea eficiente, en la que se conocen las presiones y velocidades resultantes del modelo hidráulico; se pretende identificar los factores que hacen deficiente al mismo y proponer alternativas de solución, tomando en cuenta a lo que estipula la norma boliviana NB-689.	1.Factores deficientes 2.Alternativas de solución. 3.Normativa	-Tuberías -Diametros de suministro -Topografía -Accesorios -Tuberías -Dotación -NB-689	---- Pulg ---- msnm ---- ---- l/hab.dia ----	---- 1.5” - 3” ---- ---- ---- 90 l/hab.dia ----
Var. Dependiente 2: Sostenibilidad de la red de agua potable	Según RSS, (2021). Es la satisfacción de las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas, garantizando el equilibrio entre crecimiento poblacional y bienestar social.	Para que la red de distribución de agua potable sea sostenible a medida que pase el tiempo, donde se conoce todo el comportamiento hidráulico actual, se pretende conocer la red de distribución en escenarios proyectados cada 10 años hasta el 2040.	1.Escenarios proyectados 2.Comportamiento hidráulico fut. 3.Factores de sostenibilidad	-1er Escenario -2do Escenario -Presión -Velocidad -Fuente de suministro -Tuberías -Accesorios -Diametros -Dotación	año año mca m/s ---- ---- ---- Pulg l/hab.dia	2019-2030 2030-2040 5, 10 mca 0.3 – 2 m/s ---- ---- 1.5” - 6” 110 l/hab.dia

4. CAPÍTULO IV: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

En el tiempo del desarrollo de la investigación se implementaron las siguientes fases.

1ra. Fase: Recolección de Información, Se inicio con la recolección de los catastros de usuarios y las redes del sector Vela, que fueron proporcionados por la entidad COSAALT, con el fin de obtener la información demográfica y catastral.

2da. Fase: Visitas Técnicas, Posteriormente a la recolección de información, se realizó visitas técnicas conjuntamente con el operador de COSAALT del sector, con el propósito de identificar los pozos y tanques de reserva de la red. De este modo se registró la información necesaria para el estudio. En otra ocasión, se procedió a recorrer la zona, para observar la distribución de las tomas domiciliarias, que son conectadas a la red principal. Así mismo se realizaron visitas en las que se constató la topografía del terreno, si mantenía armonía con los valores obtenidos.

3ra. Fase: Aforos de caudales, Se solicitó los servicios de aforo de caudal al Centro de Investigación de Agua (CIAGUA) de la UAJMS, en consideración de que el centro cuenta con el dispositivo necesario para la medición, así mismo se obtuvo la información de los caudales reales que circula por las tuberías a las salidas de los pozos.

4ta. Fase: Cálculos, con toda esta información recolectada, se cálculo los siguientes parámetros: caudal máximo diario, caudal máximo horario, demanda, dotación, población, necesarios para la modelación hidráulica.

5ta. Fase: Modelación Hidráulica, Luego de realizar todos estos cálculos, se procedió a introducirlos en el software EPANET, para modelar la red de agua potable en la situación inicial de esta investigación, y posteriormente modelar en situación futura, considerando varios escenarios y eventuales situaciones que podrían presentarse en la red, con el fin de proponer soluciones a las diversas deficiencias encontradas

6ta. Fase: Evaluación, una vez que se contaba con los resultados del software, se analizaron los mismos, evaluando el comportamiento hidráulico, para determinar si la red de agua potable se encuentra dentro los parámetros establecidos por la Norma Boliviana (NB-689), la cuál fue el referente.

El trabajo de campo se llevó a cabo en el sector Vela de la ciudad de Tarija, que esta comprendida por el Barrio San Salvador y urbanización Vela.

5. CAPÍTULO V: ANÁLISIS, DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presenta los resultados que se obtuvieron, después de procesar la información recogida con los diferentes instrumentos mencionados.

5.1. Resustado 1. – Modelación del comportamiento hidráulico actual de la red de agua potable aplicando el software EPANET.

Para lograr la modelación del comportamiento actual se recogieron los datos de la actual red de agua potable, con lo cual se construyó el diagnostico.

5.1.1. Diagnóstico Actual de la redes San Salvador y Urb. Vela, Tarija.

5.1.1.1. Catastro de Usuarios de la Red de Agua Potable

La cooperativa de servicios de agua potable COSAALT Ltda. proporcionó un archivo Excel que contiene un catastro de clientes de agua potable de la zona San Salvador y Urb. Vela, de la ciudad de Tarija, este archivo contiene información de los consumos de cada usuario.

Figura 18. Catastro de clientes San Salvador y Urb. Vela

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
1	Sub_pre	zona	Manz	predi	Pta_Sc	Nom_Soc	Equ_Sc	Sls_Fsk	medid	Enr_Cr	Feb_Cr	Mar_Cr	Abz_Cr	Maj_Cr	Jun_Cr	Jul_Cr	Ago_Cr	Sep_Cr	Oct_Cr	Nov_Cr	Dic_Cr
2	03001300200000	30	13002	10000	2952	PILA PUBLICA-ENC. CARACOLLES C. JUANU	A	M	SCH0607	165	132	143	147	145	169	147	168	165	166	187	188
3	03004400000000	30	64000	10000	3394	EMPRESA TELAS S.R.L.	A	M	BAD0690	3	5	2	4	5	2	6	5	5	2	5	8
4	030044000020000	30	64000	20000	2922	PILA PUBLICA-ENC. GUTIERREZ T. ESTHE	A	M	LAD09971	49	49	49	49	49	49	49	49	49	36	23	29
5	030044002003000	30	64002	20000	4970	PILA PUBLICA-ENC. ARMELLA DILMAN M.	A	M	LAD08960	0	0	0	0	17	12	10	22	42	60	54	54
6	030085000002000	30	85001	2000	2924	MARAZ SANCHEZ JUANA EMILIA	A	M	BAD01953	19	12	12	14	13	17	17	20	12	16	11	9
7	030085000020002	30	85001	2002	2947	PILA PUBLICA-ENC. CASTRO MARLENE	B			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	030085000004000	30	85001	4000	3556	RAMOS FLORES LUZETH GIOVANA	A	M	BA0707	0	0	0	0	0	2	12	5	11	14	7	8
9	030085000006000	30	85001	6000	2758	VELASQUEZ PERALES TOMAS	A	M	LAD06263	13	10	12	12	11	11	9	16	13	13	24	12
10	030085000010000	30	85001	10000	4097	TINTILAY CARPAZANA PASTOR EUGENIO P	A	M	LAD06270	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	030085000012000	30	85001	12000	3052	GOMEZ COLQUE OVIDO	A	M	BA02070	10	11	6	2	2	4	7	4	9	5	7	5
12	030085000014000	30	85001	14000	3048	QUISPE CANAVIRI RUBEN	A	M	BA0245	5	2	3	3	3	3	4	4	3	4	4	4
13	030085000016000	30	85001	16000	2950	ACEBO CARDOZO INES	A	M	HOLM213	10	5	1	3	1	2	2	5	1	3	1	3
14	030085000018000	30	85001	18000	2956	PIRETO AVILA BENITO	A	M	HOLM229	0	0	0	0	1	0	0	4	1	1	3	5
15	030085000020000	30	85001	20000	4183	FLORES MARTINEZ ANASTACIA	A	M	LAD07986	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1
16	030085000030000	30	85001	30000	4124	MAMANI CONDORI MIRIAM	A	M	LAD07430	8	6	8	8	7	7	5	6	6	8	8	6
17	030085000042000	30	85001	42000	4179	CORTEZ GUTIERREZ OSCAR VICTOR	A	M	LAD07790	9	9	10	14	12	11	11	14	13	14	14	16
18	030085000020000	30	85002	3000	4124	HUANCA TOLABA VICTOR	A	M	LAD07496	14	11	11	11	11	10	10	14	13	9	11	9
19	0300850000212000	30	85002	12000	4124	BAUTISTA GOMEZ RAYMUNDO	A	M	LAD07491	11	17	6	7	6	1	1	3	5	2	3	3
20	0300850000214000	30	85002	14000	4128	CASTRO HERRERA MARLENE MAGALY	A	M	LAD07498	13	5	7	7	7	8	9	8	11	8	9	6
21	0300850000222000	30	85002	22000	4120	ESPINOZA CHAMBI GLOFIA	A	M	LAD07496	4	2	2	3	3	4	3	4	3	2	2	2
22	0300850000230000	30	85002	30000	4183	FAJARDO FAJARDO MARIPA	A	M	LAD07496	20	17	20	18	19	18	15	14	23	18	19	14
23	0300850000242000	30	85002	42000	4124	CHOQUE CHAVEZ HERNAN GUALBERTO	A	M	LAD07492	14	6	8	9	5	16	8	6	14	8	11	10
24	0300850000244000	30	85002	44000	4187	BAUTISTA MENDEZ JHONNY	A	M	LAD06222	0	0	0	0	0	0	7	9	9	0	12	8
25	0300850000204000	30	85003	4000	4128	FLORES DEL CASTILLO RODRIGO	A	M	LAD07492	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	03008500003014000	30	85003	14000	4128	ORTEGA GONZALES SIRRIAN SANTOS	A	F		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0300850000322000	30	85003	22000	4128	COLOPICO MARIA ELENA	A	M	LAD07499	15	14	13	13	12	12	9	14	11	10	12	11
28	0300850000400001	30	85004	10001	4093	PILA PUBLICA-ENC. LUANA DAVID MARCELA	A	M	LAD06831	32	37	73	98	102	87	84	105	84	71	94	77
29	0300850000400002	30	85004	10002	4093	PILA PUBLICA-ENC. PAPPAN MARCELA	A	M	LAD06839	21	24	11	32	20	20	19	26	20	36	38	38
30	0300850000400003	30	85004	10003	4094	PILA PUBLICA-ENC. ALAFONC JUAN	A	M	LAD06823	27	27	23	32	36	26	35	42	41	44	46	43
31	0300850000400004	30	85004	10004	4094	PILA PUBLICA-ENC. SEGUYA AIDA LEOCADI	A	M	LAD06898	1	1	5	4	6	4	3	4	4	3	2	1
32	0300850000400005	30	85004	10005	4187	PILA PUBLICA-URB. MATINADO ENC. GERI	A	M	LAD09197	0	0	0	0	0	10	17	16	25	21	26	21
33	0300850000500000	30	86000	50000	4092	CENTRO SALUD TORRECLLAS G.A.M.T	A	F		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0300860000200000	30	86000	20000	4092	PANADERIA BARRIO TORPECLLAS G.A.V.A	A	F		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0300870000200000	30	87000	20000	2944	RAMIREZ ALAFONC JACINTO	A	M	BAD0488	8	9	9	12	8	5	9	12	5	8	10	10
36	0300870000200000	30	87000	20000	3323	UNIDAD EDUCATIVA TORPECLLAS-H.A.A	A	M	BAD09376	29	26	52	78	73	01	58	94	57	43	30	27
37	0300880000200000	30	88002	10000	3887	OJOCZO TAPIA TERESA	A	F		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	03008800002014000	30	88003	14000	2947	SANCHEZ APARICIO ENRIQUE	A	F		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	030088000020190001	30	88002	19001	2948	SANCHEZ APARICIO JILIAN JORGE	A	F		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente. Catastro de clientes San Salvador y Urb. Vela, ANEXO 1.

Luego de analizar la información proporcionada se obtienen los siguientes datos que son de utilidad para crear el modelo hidráulico.

Tabla 7. Datos obtenidos del Catastro de usuarios de agua potable (Urb. Vela)

PARÁMETRO	VALOR	OBSERVACIÓN
Número de usuarios	264	Incluyen toda clase de usuarios
Número de conexiones domiciliarias registradas	240	Usuarios que tienen una conexión domiciliaria
Cuentas duplicadas	5	Cuentas duplicadas que son eliminadas del registro
Usuarios que tienen medidor de caudal	202	
Usuarios que no tienen medidor de caudal	38	
Nº de Piletas públicas	19	
Nº de Piletas públicas con registro de caudal	14	
Nº de Piletas publicas sin registro de caudal	5	
Otros tipos de consumos	4	Son consumos no domésticos

Fuente. Catastro de clientes de agua potable Urb. Vela.

Tabla 8. Datos obtenidos del Catastro de usuarios de agua potable (San Salvador)

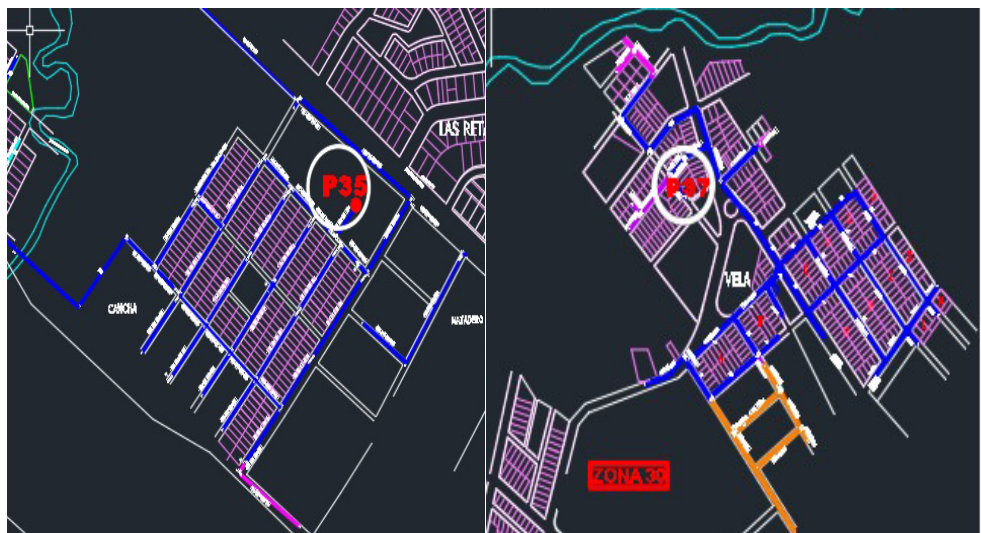
PARÁMETRO	VALOR	OBSERVACIÓN
Número de usuarios	302	Incluyen toda clase de usuarios
Número de conexiones domiciliarias registradas	301	Usuarios que tienen una conexión domiciliaria
Cuentas duplicadas	5	Cuentas duplicadas que son eliminadas del registro
Usuarios que tienen medidor de caudal	44	
Usuarios que no tienen medidor de caudal	257	
Nº de Piletas publicas	1	
Nº de Piletas públicas con registro de caudal	0	
Nº de Piletas publicas sin registro de caudal	1	
Otros tipos de consumos	0	Son consumos no domésticos

Fuente. Catastro de clientes de agua potable San Salvador.

5.1.1.2. Información del plano Catastral

Se obtuvo la información catastral de las redes de agua potable, que será útil para la modelación. Estos datos han proporcionados por COSAALT Ltda., en la Tabla 10 se detallará las propiedades de las tuberías como ser: diámetro, longitud, material y clase.

Figura 19. Catastro del sector Vela



Fuente. Proporcionado por COSAALT Ltda.

Tabla 9. Propiedades de las tuberías sector Vela

PROPIEDADES TUBERÍAS SAN SALVADOR					
N°	Tubería	Longitud (m)	Diámetros internos (mm)	Material	Clase
1	p21	206.07	80.9	PVC	9
2	T11	360.23	80.9	PVC	9
3	p14	286.22	80.9	PVC	9
4	T12	163.2	80.9	PVC	9
5	p1	6.95	80.9	PVC	9
6	p28	72.31	80.9	PVC	9
7	p27	72	80.9	PVC	9
8	T15	72.53	80.9	PVC	9
9	T40	51.6	80.9	PVC	9

Fuente. Elaboración propia, tabla completa ANEXOS 5.

5.1.1.3. Información Topográfica

Para tener mayor precisión en el modelo hidráulico en los sectores se debe contar, no solo con datos planimétricos sino con datos altimétrico, que permiten determinan las pendientes de las tuberías y establecer la dirección del flujo, para obtener la velocidad, el caudal y la presión de cada nudo en la red. Esta información fue obtenida realizando dos métodos: Primer método fue por fotogrametría con Global Mapper y Google Earth, segundo método el ASTER GDEM v2 que ofrece el programa Global Mapper. Se comparo los dos métodos para obtener los datos más precisos.

Tabla 10. Cotas de nivel San Salvador Y Urb. Vela

COTAS SAN SALVADOR Y UBR. VELA									
N°	Punto Inicio	Punto Final	Cota Inicial (msnm)	Cota Final (msnm)	N°	Puntos Inicio	Punto Final	Cota Inicial (msnm)	Cota Final (msnm)
1	n23	n19	1856	1857	1	Tanque	n54	1897	1898
2	n19	n17	1857	1868	2	Tanque	n56	1897	1896
3	n16	n15	1868	1870	3	n56	n57	1896	1894
4	n12	n2	1870	1868	4	n54	n53	1898	1892
5	n1	n2	1868	1868	5	n53	n51	1892	1883

Fuente. Elaboración propia, ejemplo demostrativo, ANEXO 4.

5.1.1.4. Fuentes de Abastecimiento

El sector Vela comprendido por Urb. Vela y B/San Salvador se abastece de agua subterránea, el primer sistema cuenta con un pozo profundo y un tanque elevado; el otro sistema solo con un pozo profundo que va directo a la red, ambos sistemas son independientes.

5.1.1.4.1. Pozo 1: Vela

El pozo Vela fue ejecutado hace aproximadamente 8 años, aún esta dentro de los parámetros de periodo de vida útil, está ubicado en las coordenadas geográficas 21°32,57'85" S; 64°40,30'64" O; a una altitud de 1886 m.s.n.m.

Figura 20. Estado actual del pozo Vela



Fuente. Elaboración propia.

A continuación, se presentan los datos obtenidos mediante una encuesta al operador del sector y datos proporcionados por COSAALT.

Tabla 11. Características del Pozo Vela

CARACTERISTICAS	DESCRIPCION
Profundidad del pozo	162 m
Producción del pozo	2.27 litros por segundo
Bomba existente	15 HP
Horario de trabajo	24 horas
Complementarios	Se dispone de una caseta y una malla en buen estado.
Área de emplazamiento	355.7 m ²
Motor	Franklin
Altura impulsión	94 m
Medición de presión a la salida	Si existe, manómetro simple
Medición de volumen a la salida	Si existe, macrómetro simple

Fuente. Datos proporcionados por COSAALT Ltda.

5.1.1.4.2. Pozo 2: San Salvador

El pozo San Salvador fue ejecutado hace aproximadamente 15 años, esta por cumplir su ciclo de vida útil, según lo estipula la NB 689, el período de diseño es de 20 años durante los cuales una obra determinada prestará con eficiencia el servicio para el cual fue diseñada. Está

ubicado en las coordenadas geográficas 21°33.36'36.64" S; 64°40'58.56" O; a una altitud de 1867 m.s.n.m.

Figura 21. Estado actual del pozo San Salvador



Fuente. Elaboración propia.

A continuación, se presentan los datos obtenidos mediante una encuesta al operador del sector y datos proporcionados por COSAALT.

Tabla 12. Características del Pozo San Salvador

CARACTERISTICAS	DESCRIPCION
Profundidad del pozo	141.97 m
Producción del pozo	5.46 litros por segundo
Bomba existente	15 HP
Horario de trabajo	16 horas
Complementarios	Se dispone de una caseta y una malla en buen estado.
Área de emplazamiento	1030.87 m ²
Motor	Franklin
Altura impulsión	55.35 m
Medición de presión a la salida	Si existe, manómetro simple
Medición de volumen a la salida	Si existe, macrómetro simple

Fuente. Datos proporcionados por COSAALT Ltda.

5.1.1.4.3. Almacenamiento: Tanque Elevado

La red de agua potable cuenta con un tanque de almacenamiento de 50 m³ aproximadamente, se encuentra en la Urb. Vela y almacena el caudal excedente.

Tabla 13. Características del Tanque Vela

CARACTERISTICAS	DESCRIPCION
Altura hasta la base del tanque	18.2 m
Diámetro de tanque	5.15 m
Altura de tanque	3 m
Cota nivel	1897 m.s.n.m.

Fuente. Elaboración propia.

5.1.1.5. Usos y Demandas Actuales.

La práctica totalidad del uso de agua en los sectores es de tipo doméstico y también no domésticos, por ejemplo: Colegios, centro de salud, canchas deportivas, plazas, locales industriales, etc. Por el momento los terrenos que permanecen sin alguna construcción o que son áreas verdes, no están proyectadas de qué tipo de uso serán a futuro.

Tabla 14. Tipologías de usuarios y puntos de consumo Urb. Vela

TIPO DE USUARIO	PUNTOS DE CONSUMO
Doméstico	236
Pileta	19
Colegio	1
Centro de salud	1
Local industrial	2

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 15. Tipologías de usuarios y puntos de consumo San Salvador

TIPO DE USUARIO	PUNTOS DE CONSUMO
Doméstico	284
Pileta	1
Parqueos	10
Plazas	1
Locales deportivos	2

Fuente. Elaboración propia.

5.1.1.6. Aforos de Caudales

Para la ejecución del aforo en la red matriz de las dos zonas, se utilizó un Caudalímetro ultrasónico, el cual es un dispositivo electrónico que permite la medida de la velocidad del flujo y caudal por ultrasonidos, utiliza el método de medidas de tiempo emitido y recibido por el mismo equipo, que pasa a través del fluido y las paredes del conducto por el que está fluyendo, por lo que se trata de un sistema de medición transportable y de fácil instalación. (ANEXO 11).

El Centro de Investigación del Agua (CIAGUA) de la UAJMS cuenta con este equipo, por tal motivo se tuvo que solicitar los servicios de aforo de caudal y con el personal técnico especializado de CIAGUA, se realizó la campaña de medición de caudal en los dos puntos.

La medición se desarrolló en un tiempo de 6 horas con intervalos de 10 min a la salida del pozo, con el propósito de conocer el caudal real de producción de la red.

Se leyó los caudales el día jueves 11 de marzo de 2021 a las 9:20 am y el día lunes 15 de marzo de 2021 a las 9:20 am.

Figura 22. Campaña de medición de caudales pozo Vela



Fuente. Elaboración propia.

5.1.1.6.1. Datos del Aforo de Caudal

Una vez depurada toda la información obtenida con el dispositivo, se obtuvieron los siguientes Datos:

- El caudal máximo en el pozo San Salvador fue de 6.02 l/s a las 11:10 am, el caudal mínimo registrado fue de 4.69 l/s a las 13:20 pm y caudal medio del aforo fue de 5.50 l/s.
- El caudal máximo en el pozo Vela fue de 3.09 l/s a las 11:10 am, el caudal mínimo registrado fue de 2.46 l/s a las 13:20 pm y caudal medio del aforo fue de 2.72 l/s.

Se generó la curva de consumo con los datos que se presenta a continuación:

Gráfico 1. Curva de consumo Pozo Vela

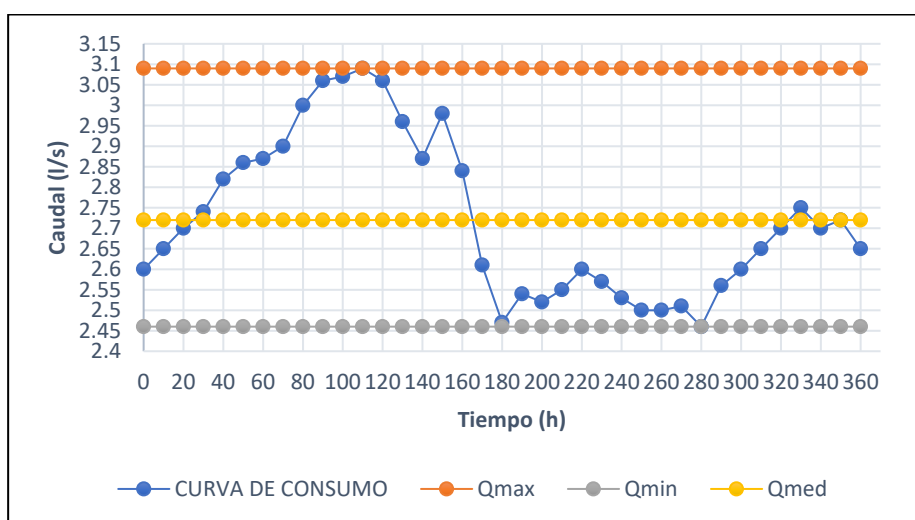
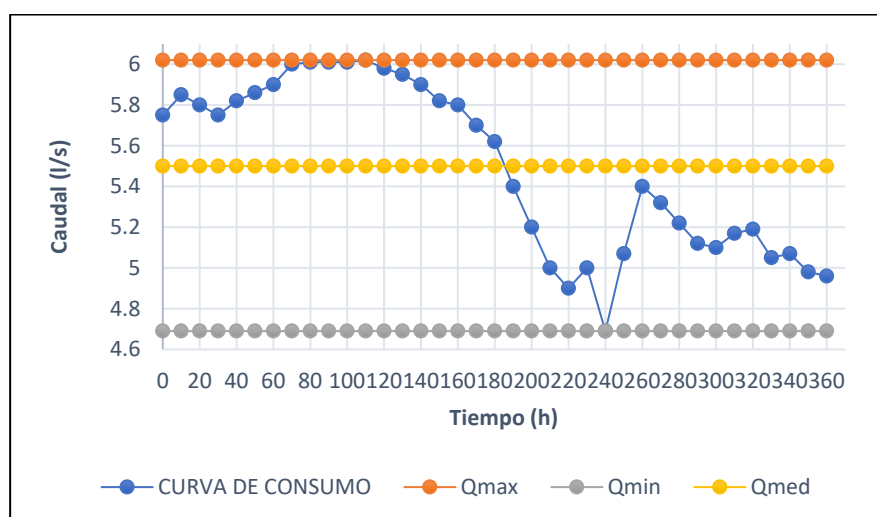


Gráfico 2. Curva de consumo Pozo San Salvador



Fuente. Elaboración propia, tabla de datos de consumo ANEXO 6.

5.1.1.7. Estimación de Parámetros de Diseño

5.1.1.7.1. Dotaciones Medias Diarias

Se realizó un cálculo demostrativo, de la dotación media diaria, con los datos proporcionados por COSAALT, con el propósito de conocer la demanda actual y compararla con lo que estipula la norma, utilizando los consumos mensuales de los usuarios solo de la Urb. Vela. En la siguiente tabla se observará el resultado de los consumos domésticos y consumo no doméstico, como ser: Piletas públicas, centro educativo y local industrial.

Tabla 16. Comparación de consumos medios diarios de los resultados obtenidos con la Norma Boliviana y Reglamento Nacional de Instalaciones Domiciliarias.

CATEGORIA	DETERMINADO	NB689 Y REGLAMENTO
Dotación media diaria	73.828 l/hab/día	90 l/hab/día
Escuelas, colegios, universidades y otros similares, alumnado externo	18.012 lts/alumno/día	50 lts/alumno/día
Local Industrial dotación por operario	14.266 lts/persona/día	50 lts/persona/día
Piletas públicas	0.0846 l/s/pileta	0.10 l/s/pileta

Fuente. Elaboración propia, ANEXOS 2.

Los resultados obtenidos pertenecen a la Urb. Vela, el B/ San Salvador no cuentan con lecturaciones completas de sus medidores, por tal motivo no se realizó ningún cálculo en dicho barrio. Para tomar en cuenta estos datos, las lecturas deberían estar completas para así obtener la dotación media diaria de cada consumidor. Con los datos recabados del sector varios usuarios están sin lectura y los usos no domésticos no son tomados en cuenta en varios puntos de consumo. Para un cálculo más representativo de este trabajo, se adoptará las dotaciones que estipula la Norma Boliviana NB689 y el Reglamento Nacional de instalaciones Sanitarias y Domiciliarias.

De la Tabla 6: Dotación media diaria, que estipula la NB-689, se adoptará una dotación de 90 l/hab-d, tomando en cuenta una población de 501 a 2000 habitantes, zona de los Valles y respectivamente los valores del Reglamento Nacional de Instalaciones Domésticas y Sanitarias.

Tabla 17. Cuadro de dotaciones domésticas, comerciales, públicas

TIPO DE USUARIO	DOTACION
Doméstico	90 l/hab-d
Pileta	60 l/hab-d
Parqueos	2 l/m2-d
Plazas	2 l/m2-d
Locales deportivos	1 l/espectador-d
Colegio	50 l/alumno-d
Centro de salud	20 l/persona-d
Local industrial	50 l/persona-d

Fuente. NB 689 y Reglamento Nacional de Instalaciones Sanitarias y Domiciliarias.

5.1.1.7.2. Información Demográfica

La densidad demográfica de una población es un indicador estadístico que nos muestra como está distribuida la población en el espacio, la relación entre población y la superficie.

- **Población Actual**

Para poder determinar la población existente en el sector Vela, se hizo un levantamiento de información (encuesta), en el cual se verificó con el catastro proporcionado por COSAALT el número de casas que se encuentran en cada sector y se realizó visitas de campo para validar esta información. El número promedio de habitantes por hogar en la ciudad de Tarija es de cinco, que se determinó a través del Censo Nacional de Población y Viviendas 2012 (CNPV2012).

- **Población Futura**

La población futura se calcula utilizando la tasa de crecimiento poblacional de Cercado-Tarija que es de 2.6 %, tomando como base la cantidad de servicios conectados a la red y la cantidad de personas por vivienda de acuerdo al Censo 2012. Estos valores se calcularon con

las ecuaciones que estipula la NB 689 para poblaciones futuras. En la siguiente tabla se observará los habitantes actuales y proyectados a futuro.

Tabla 18. Población actual y futura Urb. Vela

URB. VELA			
Año	2019	2030	2040
Habitantes	1180	385	458
Índice de crecimiento (%)	2.6	2.6	2.6
Método aritmético	-	1517	1824
Método geométrico	-	1565	2023
Usuarios	236	77	92

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 19. Población actual y futura San Salvador

SAN SALVADOR			
Año	2019	2030	2040
Habitantes	1420	463	551
Índice de crecimiento (%)	2.6	2.6	2.6
Método aritmético	-	1826	2195
Método geométrico	-	1883	2434
Usuarios	284	93	110

Fuente. Elaboración propia.

5.1.1.8. Dotación Futura de agua potable

En la siguiente tabla se observará las dotaciones futuras que se adoptaran en el cálculo para la modelación. De igual manera se cálculo la dotación futura con la formula que estipula la NB 689.

Tabla 20. Dotación Futura

DOTACIÓN FUTURA			
AÑO	2019	2030	2040
DOTACIÓN (l/hab/día)	90	100.41	110.92

Fuente. Elaboración propia, ANEXOS 7.

5.1.1.8.1. Cálculo de Caudales

Una vez obtenida la información necesaria para realizar los cálculos de caudales, se procedió a realizarlo de la siguiente manera:

- **Caudal Medio**

Una vez definidas las dotaciones domésticas y no domésticas, se procedió a calcular un promedio por tipo de consumo. Posteriormente, con los datos de la cantidad de usuarios se multiplicaron por las dotaciones que se encuentran en la Tabla 18 y se dividieron por 86400 con el fin de convertir el resultado en unidades l/s por tipo de consumo. Finalmente se obtuvo los caudales medios domésticos y no domésticos.

Tabla 21. Caudales medios domésticos y no domésticos San Salvador

CAUDAL MEDIO DOMÉSTICOS Y NO DOMÉSTICOS			
Caudales habitantes	1.479	l/s	1.479
Caudal parqueos	0.844	l/s	
Caudal pileta	0.100	l/s	
Caudal parque	0.094	l/s	
Caudal local deportivo 1	0.012	l/s	
Caudal local deportivo 2	0.002	l/s	1.051
Total, de caudal promedio	2.530	l/s	2.530

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 22. Caudales medios domésticos y no domésticos Urb. Vela

CAUDAL MEDIO DOMÉSTICOS Y NO DOMÉSTICOS			
Caudales habitantes	1.229	l/s	1.229
Caudal Colegio	0.058	l/s	
Caudal centro de salud	0.001	l/s	
Caudal pileta	1.900	l/s	
Caudal panadería	0.009	l/s	
Caudal empresa de tejas	0.006	l/s	1.973
Total, de caudal promedio	3.203	l/s	3.203

Fuente. Elaboración propia.

5.1.1.8.2. Adopción de Coeficientes K1 (máximo diario) y K2 (máximo horario)

Para la adopción del coeficiente de caudal máximo diario la norma aconseja asumir valores entre $1.20 < k_1 > 1.50$ con respecto a las características de la población, se adoptó el valor superior de $K_1=1.5$, que es la demanda máxima que se presenta en un día del año y que representa el día de mayor consumo del año en el sector; para el coeficiente de caudal máximo horario propone rangos de valores en función al número de habitantes, en particular del sector Vela, Tarija con hasta 2000 hab. Se adoptó el valor $K_2=2$, por la cantidad de habitantes que se encuentran en la actualidad en dicho sector.

- **Caudal Máximo Diario**

Con los resultados obtenidos de las tablas anteriores, se procederá a calcular el caudal máximo diario, se lo determinará multiplicando el caudal medio de habitantes por el coeficiente $k_1=1.50$.

San Salvador

$$Q_{\text{máx.d}} = K_1 * Q_{\text{med}}$$

$$Q_{\text{máx.d}} = 2.219 \text{ l/}$$

Urb. Vela

$$Q_{\text{máx.d}} = K_1 * Q_{\text{med}}$$

$$Q_{\text{máx.d}} = 1.844 \text{ l/s}$$

- **Caudal Máximo Horario**

Posteriormente se calculará el caudal máximo horario, se multiplicará con el coeficiente $K_2 = 2$.

San Salvador

$$Q_{\text{máx.h}} = K_2 * Q_{\text{máx.d}}$$

$$Q_{\text{máx.h}} = 4.438 \text{ l/s}$$

Urb. Vela

$$Q_{\text{máx.h}} = K2 * Q_{\text{máx.d}}$$

$$Q_{\text{máx.h}} = 3.688 \text{ l/s}$$

Con los caudales máximos horarios de cada zona obtenidos, se procede a sumar a cada resultado el caudal medio de consumos no domesticos, para conseguir los $Q_{\text{máx}}$ totales que se utilizaran en el programa. (**San Salvador:** $Q_{\text{máx}}=5.49 \text{ l/s}$; **Vela:** $Q_{\text{máx}}=5.66 \text{ l/s}$).ANEXOS 3.

- **Caudal Unitario**

Por último, se calculará el caudal unitario por usuario, con este resultado se obtendrá las demandas en cada nudo, el método que se adoptara será el de número de familias, que consiste en multiplicar el caudal unitario por el número de familias del área de influencia del nudo.

Tabla 23. Caudal unitario San Salvador

CAUDAL UNITARIO		
Q máx.h	4.438	l/s
Q unitario usuarios	0.016	l/s
Q unitario pileta	0.100	l/s
Q unitario parqueos	0.084	l/s
Q unitario parques	0.094	l/s
Q unitario local deportivo 1	0.012	l/s
Q unitario local deportivo 2	0.002	l/s

Fuente. Elaboración propia, ANEXOS 3.

Tabla 24. Caudal unitario Urb. Vela

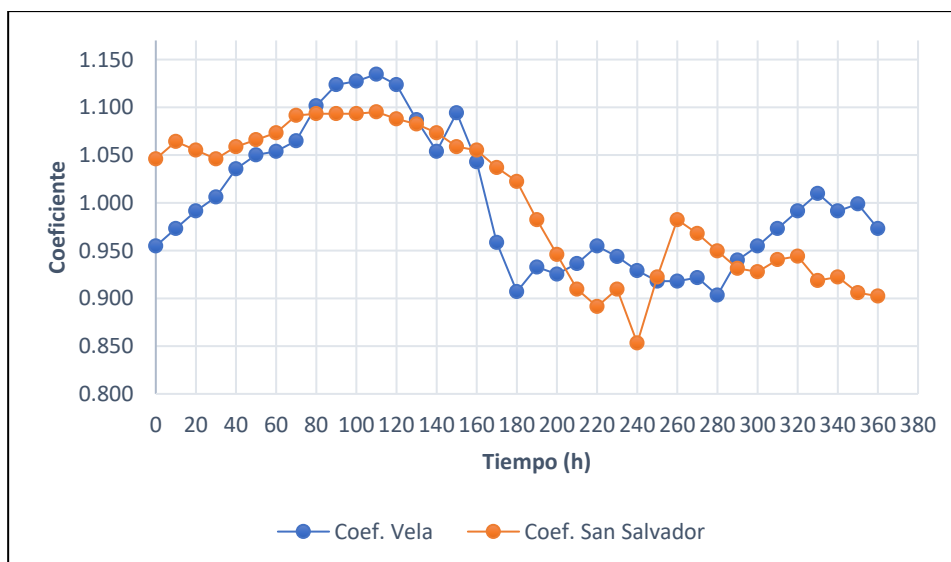
CAUDAL UNITARIO		
Q máx.h	3.688	l/s
Q unitario usuarios	0.016	l/s
Q unitario colegio	0.058	l/s
Q unitario centro de salud	0.001	l/s
Q unitario panadería	0.009	l/s
Q unitario empresa de tejas	0.006	l/s
Q unitario piletas	0.100	l/s

Fuente. Elaboración propia, ANEXOS 3.

5.1.1.8.3. Curva de Modulación

Para la obtención de los coeficientes que componen la curva de modulación fue necesario dividir el caudal registrado para cada hora en la curva de consumo entre el valor medio registrado en esta misma. El valor del caudal para la hora 0 es de 5.75 l/s y el valor medio registrado es de 5.50 l/s, ahora bien, al dividir el primero entre el segundo se obtiene un valor de 1.046. el cuál es uno de los coeficientes para la curva de modulación. Al realizar esta misma operación para los caudales registrados durante las 6 horas, se obtienen la siguiente curva de modulación.

Gráfico 3. Curva de Modulación



Fuente. Elaboración propia, ANEXOS 6.

5.1.1.8.4. Análisis del Aforo de Caudal y la Curva de Modulación

- Al comparar el caudal medio determinado, por el aforo en el pozo San Salvador de 5.50 l/s, con el caudal obtenido de la caracterización de la demanda de 5.49 l/s, se observa que es similar, este será el caudal que represente de mejor manera el comportamiento hidráulico de la red.

- El caudal medio aforado en el pozo Vela es 2.72 l/s y el obtenido por la caracterización de la demanda es de 5.66 l/s. El caudal restante es abastecido por el tanque elevado que se encuentra en la Urb. Vela.

Finalmente se resalta la importancia de la curva de modulación para modelar las condiciones reales de esta red de agua potable. En el caso de las dos redes, se toma la decisión de adoptar esta curva, ya que esta representa la condición de operación actual y real de la red.

5.1.1.9. Introducción de Datos al Modelo Hidráulico

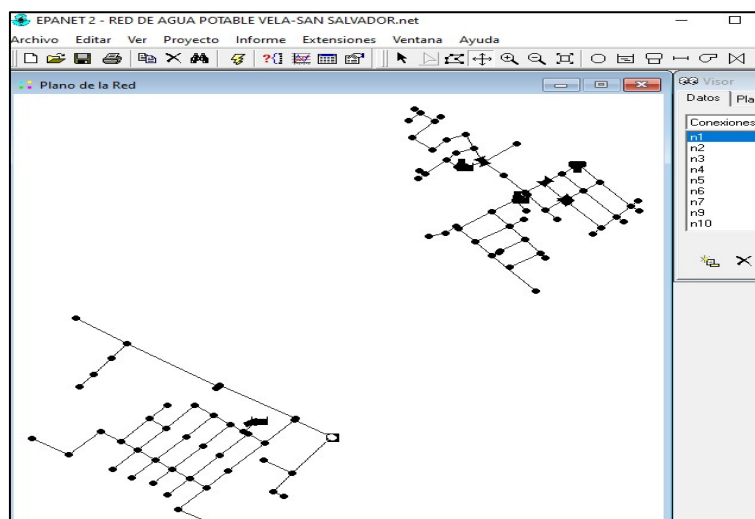
5.1.1.9.1. Creación del Modelo en Civil 3d

Con el plano catastral de la distribución de las tuberías en toda la red, con sus respectivas características y con la ayuda del operador técnico del sector, se creó toda la red de agua potable en el formato .dwg.

5.1.1.9.2. Creación del Modelo de Base en EPANET

Con el modelo base en el formato .dwg, por medio del programa Epacad se realizó la exportación y conversión del archivo al programa EPANET en formato .net, el cual genera el modelo para la digitación de las propiedades de los nodos y tuberías.

Figura 23. Esquema 1 (EPANET) de la red Vela



Fuente. Modelo EPANET.

5.1.1.9.3. Descripción del Modelo Base

El modelo base de Epanet comprende de dos redes independientes, el primero inicia a la salida del pozo San salvador y el segundo a la salida pozo Vela, estos mismos están compuesto por los siguientes elementos:

San Salvador

- Un pozo profundo mediante una bomba sumergible que alimenta directo a la red y está ubicado en la cota 1867 m.s.n.m.
- 44 nudos que representan puntos de inflexión en la tubería y los consumos de los usuarios con su respectiva cota.
- 49 tuberías con diámetro de 2" a 3".

Urb. Vela

- Un pozo profundo mediante una bomba sumergible que alimenta a la red y a un tanque elevado de almacenamiento que está ubicado en la cota 1897 m.s.n.m.
- 56 nudos que representan puntos de inflexión en la tubería y los consumos de los usuarios con su respectiva cota.
- 65 tuberías con diámetros de 1 ½" a 3".

El modelo se configuro con unidades de caudal en LPS, lo cual implica que las longitudes, alturas y presiones se manejan en metros, los diámetros en milímetros, en cuanto a las pérdidas de energía por fricción se utilizó la fórmula de Hazen Williams ($C=150$) y para las perdidas menores se adicionó a la propiedad de la tubería la sumatoria de los coeficientes de los accesorios tales como válvulas de corte, codos, uniones, etc.

5.1.1.9.4. Representación de Pozo Profundo

En EPANET no existe un comando para modelar el pozo profundo, sin embargo, con la opción EMBALSE se puede realizar de manera correcta las características de un pozo.

Para los pozos San Salvador y Vela se utiliza un embalse con una altura igual a la cota de bombeo o altura de impulsión, configurados de la siguiente manera:

Figura 24. Configuración de pozos en EPANET San Salvador y Vela

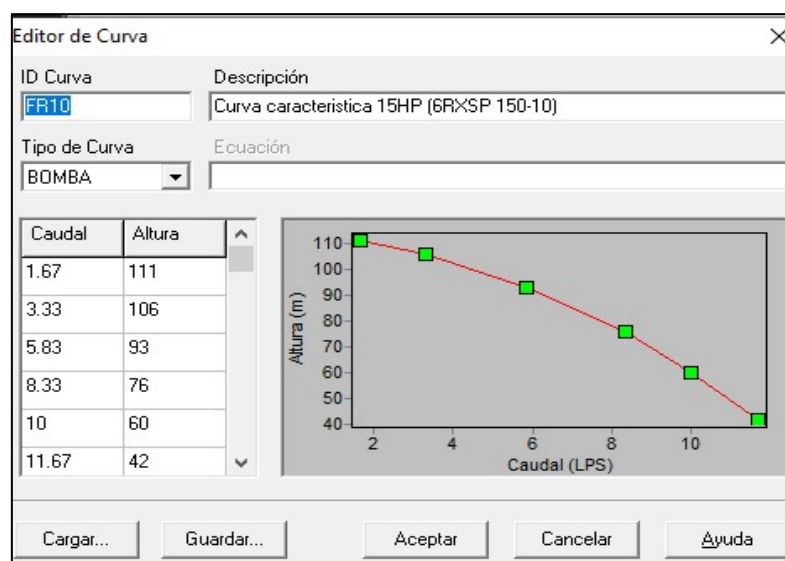
Embalse Emb1		Embalse Emb3	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
*ID Embalse	Emb1	*ID Embalse	Emb3
Coordenada-X	325861.08	Coordenada-X	326527.35
Coordenada-Y	7614867.81	Coordenada-Y	7616127.77
Descripción		Descripción	
Etiqueta		Etiqueta	
*Altura Total	1867	*Altura Total	1886
Patrón de Altura		Patrón de Altura	
Calidad Inicial		Calidad Inicial	
Fuente de Calidad		Fuente de Calidad	
Caudal Neto Entrante	No Disponible	Caudal Neto Entrante	No Disponible

Fuente. Configuración EPANET.

5.1.1.9.5. Asignando Bombas a los Pozos

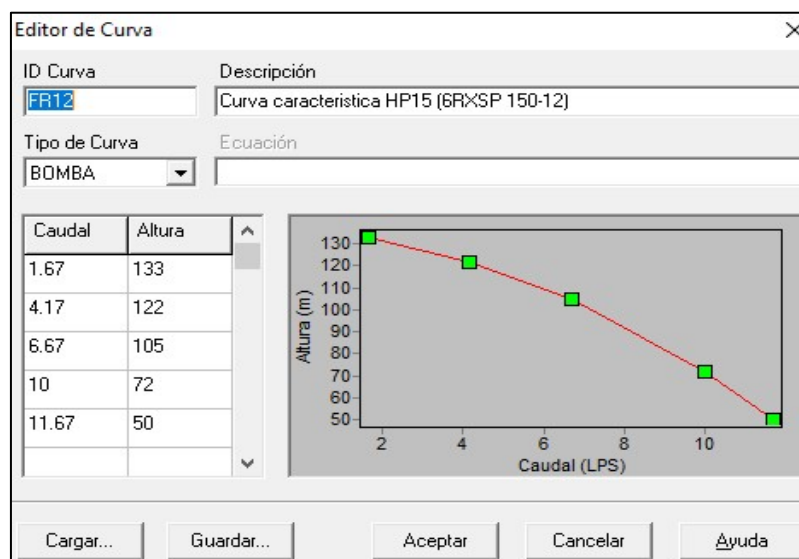
La entidad facilitó algunos detalles de las bombas como ser: el motor de la bomba (Franklin) y su potencia (15HP). Con estos datos se procedió a descargar de la pagina del fabricante sus Especificaciones Técnicas y de este modo obtener la curva características que sera necesaria para modelar la red. Se observará a continuación las curvas características que se empleo en EPANET:

Figura 25. Curva característica de la bomba Pozo San Salvador



Fuente. Configuración EPANET.

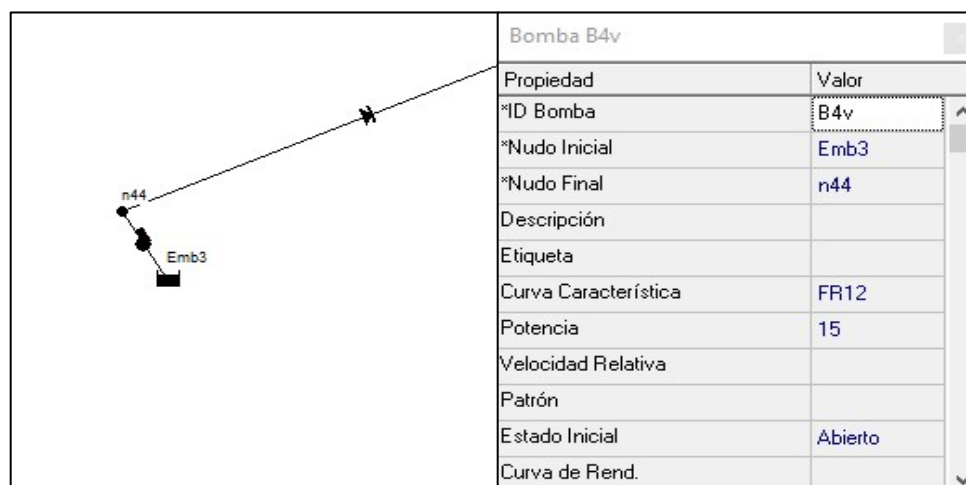
Figura 26. Curva característica de la bomba Pozo Vela



Fuente. Configuración EPANET.

Con las curvas ingresadas en EPANET, se procede a crear las bombas desde el embalse al nodo de conexión. La bomba debe ser creada desde el embalse hasta la red, desde el nudo de aspiración siguiendo el flujo de agua.

Figura 27. Esquema y Configuración: Pozo profundo – Bomba



Fuente. Configuración EPANET.

5.1.1.9.6. Asignando el Tanque Elevado de Almacenamiento

Con las dimensiones que se tomó en campo, se procedió a digitar en la ventana de propiedades de Deposito, su respectiva cota, la altura piezométrica con la que se comenzará la modelación de la red, su nivel máximo (3m), nivel mínimo (0m), nivel inicial (2.9m) y cota (1915m) con el cual va a operar el tanque.

5.1.1.9.7. Ingreso de Caudales de Consumo o Demanda Base a los Nodos

Existen dos maneras de ingresar las demandas base en cada nodo:

- De forma manual. Dentro de la pantalla principal de EPANET se selecciona cada uno de los nudos y se asigna su demanda base.
- Editando ficheros de datos.

El total de los nudos que tienen asignados los caudales de consumo son 100, por lo que se opta por la segunda forma de ingresar los datos: Editar el fichero.

5.1.1.9.8. Asignación de Diámetros y Coeficientes de Rugosidad a Tuberías

El modelo en EPANET que se ha construido tiene asignado el diámetro de 3" (80.9mm diámetro interno de la tubería PVC) y un valor de 150 para el coeficiente de rugosidad.

Figura 28. Cuadro de dialogo para editar tuberías en EPANET

Tubería p3	
Propiedad	Valor
*ID Tubería	p3
*Nudo Inicial	n3
*Nudo Final	n4
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	112.5
*Diámetro	54.5
*Rugosidad	150
Coef. de Pérdidas	0.9
Estado Inicial	Abierto
Coef. Flujo	

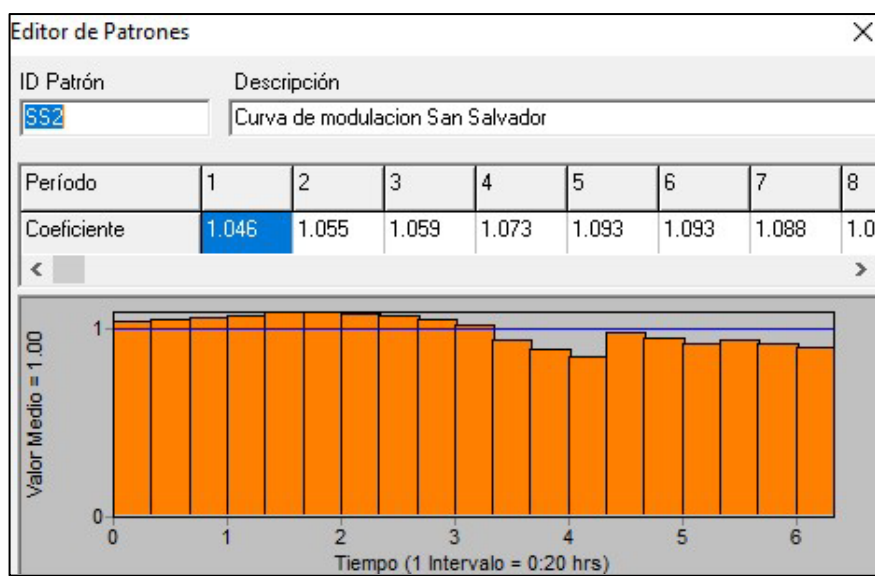
Fuente. Configuración EPANET.

5.1.1.9.9. Asignación de Curvas de Modulación de la Demanda.

Para asignar la curva de modulación de la demanda a los nudos se utiliza la configuración de patrones de modulación que se muestra a continuación.

En el visor de EPANET y la ventana de datos, se encuentra la opción patrones con la que se genera la curva de modulación de la demanda, asignando los coeficientes de la curva.

Figura 29. Ingreso de curva de modulación de la demanda San Salvador



Fuente. Configuración EPANET.

- Las pérdidas de carga en tuberías principales y secundarias deben estar alrededor de 10m/km.

5.1.2.1. Comparación de los resultados de la modelacion en EPANET y el cálculo con métodos tradicionales

Se realizó una comparación de la modelación hidraulica en EPANET, con los métodos tradicionales estudiados, que estipula la norma boliviana, para observar los resultados emitidos por cada uno de ellos. A continuación se observara en una tabla las presiones con ambos metodos realizados:

Tabla 25. Comparación de presiones San Salvador

RESULTADOS DE PRESIONES SAN SALVADOR			
Nº	Nudo	EPANET	Método tradicional
1	n25	40.57	40.56
2	n49	47.36	47.35
3	n38	51.23	51.23
4	n33	41.23	41.22
5	n30	35.31	35.31

Fuente. Elaboración propia, Tabla completa de resultados, ANEXOS 8.

Se puede observa que los resultados de EPANET y la resolucion manual son similares en la zona San Salvador.

Tabla 26. Comparación de presiones San Salvador

RESULTADOS DE PRESIONES URB. VELA			
Nº	Nudo	EPANET	Método tradicional
1	n58	28.60	28.5
2	n66	30.68	30.43
3	n65	42.55	42.34
4	n78	34.13	33.88
5	n98	28.44	28.18

Fuente. Elaboración propia, Tabla completa de resultados, ANEXOS 8.

Se puede observar que los resultados de EPANET y la resolución manual, existe una variación mínima, la diferencia es entre 0.10 a 0.25 decimales, esto ocurre porque la resolución manual de la red de la Urb. Vela es más compleja para su cálculo manual.

5.1.2.2. Comparación de caudales por el método de número de familias y método probabilísticos en ramales con menos de 30 conexiones en la red sector Vela

Se realizó una comparación de caudales por el método de número de familias utilizados en la modelación en EPANET y el método probabilísticos en la red del sector Vela, según la norma boliviana, para redes con menos de 30 conexiones debe determinarse el caudal por ramal, utilizando el método probabilístico o de simultaneidad, basado en el coeficiente de simultaneidad y el número de grifos. Se calculó solo los ramales que presentan menos de 30 conexiones. A continuación se presentará una tabla de comparación:

Tabla 27. Comparación de métodos San Salvador

COMPARACION DE METODOS SAN SALVADOR				
Tubería	Ni	Nj	Caudal probabilístico	Caudal EPANET
p10	n11	n12	1.065	1.47
T12	n12	n2	0.276	0.39
T13	n2	n3	0.230	0.19
p12	n3	n14	0.040	0.03
p3	n3	n4	0.066	0.06
p4	n4	n5	0.032	0.02
p14	n15	n16	0.755	0.82
T11	n17	n19	0.452	0.5
p21	n19	n23	0.046	0.04
T8	n19	n20	0.108	0.14
p19	n20	n21	0.071	0.08
p20	n21	n22	0.034	0.03

Fuente. Elaboración propia, Tabla completa de resultados, ANEXOS 8.

Existe una diferencia de los caudales acumulados en los ramales, con los métodos empleados, esto ocurre porque el cálculo probabilístico se multiplica por un coeficiente de simultaneidad

(k) que inversamente proporcional al número de grifos en el ramal y este coeficiente tiende a disminuir el caudal en cada ramal.

Tabla 28. Comparación de métodos San Salvador

COMPARACION DE METODOS URB. VELA				
Tubería	Ni	Nj	Caudal probabilístico	Caudal EPANET
p101	n95	n96	0.053	0.07
T29	n95	n97	0.425	0.53
p112	n97	n107	0.166	0.2
p113	n107	n108	0.150	0.14
p117	n108	n112	0.034	0.02
p114	n108	n109	0.082	0.07
p115	n109	n110	0.032	0.03
p116	n109	n111	0.016	0.02
p103	n97	n98	0.226	0.31
p104	n98	n99	0.210	0.29
p105	n99	n100	0.178	0.23
p106	n100	n101	0.144	0.18
p107	n101	n102	0.101	0.1

Fuente. Elaboración propia, Tabla completa de resultados, ANEXOS 8.

En las tablas se muestran los resultados de los caudales acumulado en los ramales, con los dos métodos propuestos, el caudal demandado total que se obtiene en la red de agua potable de San Salvador es un valor de 4.59 l/s, en comparación con el primer modelo en EPANET que se realizó, se obtuvo un caudal de 5.49 l/s.

5.2. Resultados 2: Identificación de los factores que hacen al comportamiento hidráulico deficiente, de la actual red de agua potable sector Vela

A continuación se detalla las deficiencias encontradas en el diagnóstico de la red de agua potable en el sector Vela, obtenidas a través de la primera modelación hidráulica en EPANET.

5.2.1. Resultado del diagnóstico de acuerdo al Modelo hidráulico de la Red de Agua Potable

Actual

5.2.1.1. Presión

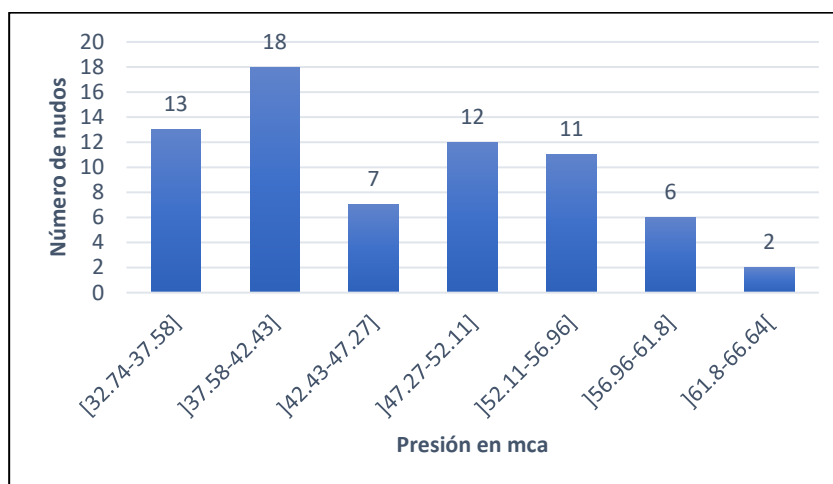
En referencia a la medición de la presión en los diferentes nudos de la red se tienen los siguientes resultados de la primera modelación de la red de agua potable en régimen permanente del Sector Vela, detallados en la tabla donde se aprecia las presiones correspondientes, que todos los puntos cuentan con presiones mayores a 5 mca y se encuentran dentro del rango normativo.

Tabla 29. Frecuencia de presiones de la red actual San Salvador

Intervalo de presión en m.c.a.	Clase	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa acumulada
(i)	(Xi)	(fi)	(hi)	(Fi)	(Hi)
[32.74-37.58]	35.16	13	18.84%	13	18.84
]37.58-42.43]	40	18	26.09%	31	44.93
]42.43-47.27]	44.85	7	10.14%	38	55.07
]47.27-52.11]	49.69	12	17.39%	50	72.46
]52.11-56.96]	54.53	11	15.94%	61	88.41
]56.96-61.8]	59.38	6	8.70%	67	97.1
]61.8-66.64[	64.22	2	2.90%	69	100

Con los resultados de la Tabla 30, se desarrollo un gráfico estadístico.

Gráfico 4. Frecuencia de presiones de la red actual San Salvador



Fuente. Elaboración propia.

Al evaluar los resultados de la modelación se establece que en la parte más baja de la red de San Salvador, se presentan presiones altas con un valor máximo de 64.22 mca y mínimo de 35.16 mca. Hay una mayor frecuencia de presiones entre los 30 a 60 mca, por lo tanto se encuentran dentro de los rangos óptimos que establece la NB 689.

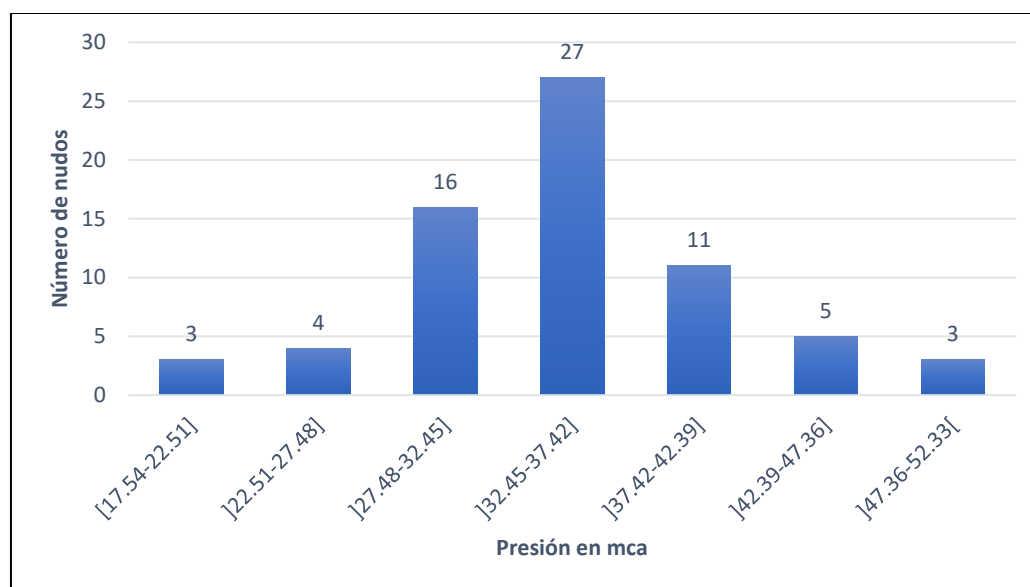
Tabla 30. Frecuencia de presiones de la red actual Urb. Vela

Intervalo de presión en m.c.a.	Clase	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa acumulada
(i)	(Xi)	(fi)	(hi)	(Fi)	(Hi)
[17.54-22.51]	20.02	3	4.35%	3	4.35
]22.51-27.48]	24.99	4	5.80%	7	10.14
]27.48-32.45]	29.96	16	23.19%	23	33.33
]32.45-37.42]	34.93	27	39.13%	50	72.46
]37.42-42.39]	39.9	11	15.94%	61	88.41
]42.39-47.36]	44.87	5	7.25%	66	95.65
]47.36-52.33[	49.84	3	4.35%	69	100

Fuente. Elaboración propia.

Con los resultados de la Tabla 31, se desarrollo un gráfico estadístico.

Gráfico 5. Frecuencia de presiones de la red actual Urb. Vela



Fuente. Elaboración propia.

Asimismo, se observa que la mínima presión cumple con el límite inferior establecido con valores de 20.02 mca. y la máxima presión que presenta la red Vela es de 49.84 mca. Hay una mayor frecuencia de presiones entre los 20 a 40 mca, por lo tanto se encuentran dentro de los rangos optimos que establece la norma.

5.2.1.2. Velocidades

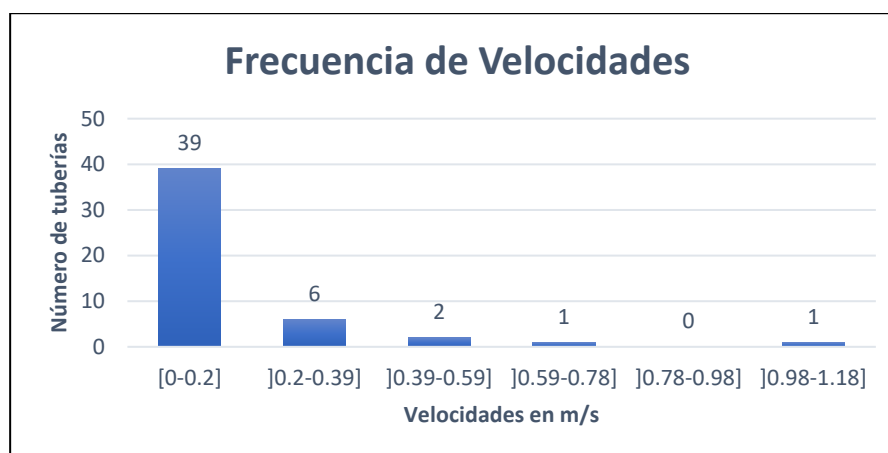
Para determinar si las velocidades se encuentran dentro del rango normativo, a continuación se observa las tablas de los resultados de las velocidades correspondientes en toda la red de agua potable en el sector Vela.

Tabla 31. Frecuencia de velocidades de la red actual San Salvador

Intervalo de presión en m.c.a.	Clase	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa acumulada
(i)	(Xi)	(fi)	(hi)	(Fi)	(Hi)
[0-0.2]	0.1	39	79.59%	39	79.59
]0.2-0.39]	0.29	6	12.24%	45	91.84
]0.39-0.59]	0.49	2	4.08%	47	95.92
]0.59-0.78]	0.69	1	2.04%	48	97.96
]0.78-0.98]	0.88	0	0.00%	48	97.96
]0.98-1.18]	1.08	1	2.04%	49	100

Fuente. Elaboración propia.

Gráfico 6. Frecuencia de velocidades de la red actual San Salvador



Fuente. Elaboración propia.

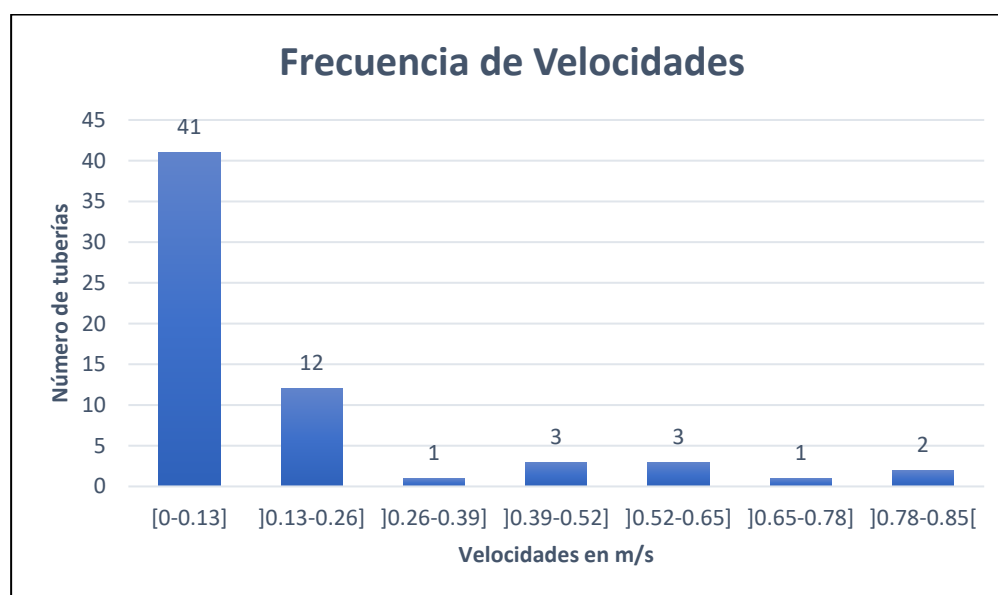
Tabla 32. Frecuencia de velocidades de la red actual Urb. Vela

Intervalo de presión en m.c.a.	Clase	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa acumulada
(i)	(Xi)	(fi)	(hi)	(Fi)	(Hi)
[0-0.13]	0.07	41	65.08%	41	65.08
]0.13-0.26]	0.2	12	19.05%	53	84.13
]0.26-0.39]	0.33	1	1.59%	54	85.71
]0.39-0.52]	0.46	3	4.76%	57	90.48
]0.52-0.65]	0.59	3	4.76%	60	95.24
]0.65-0.78]	0.72	1	1.59%	61	96.83
]0.78-0.85[	0.85	2	3.17%	63	100

Fuente. Elaboración propia.

Con los resultados de la Tabla 30, se desarrollo un gráfico estadístico.

Gráfico 7. Frecuencia de velocidades de la red actual Urb. Vela

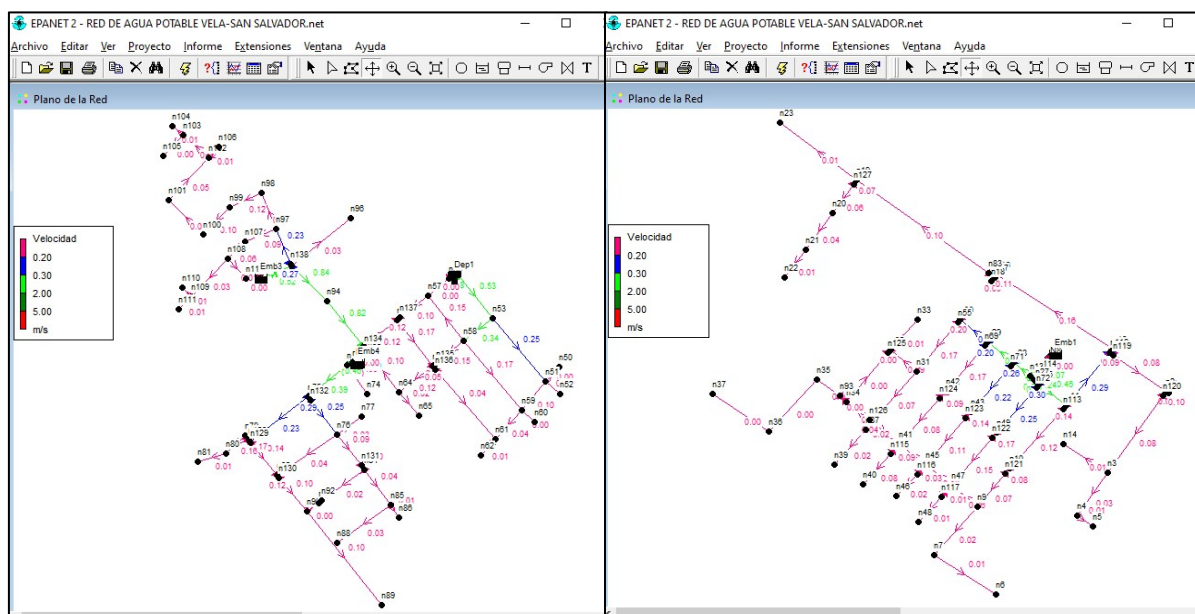


Fuente. Elaboración propia.

Se evidencia que las velocidades no cumplen con los rangos estipulados por la norma, la mayoría de las tuberías tienen valores menores a 0.30 m/s, a excepción de las tuberías a la salidas de los pozos y salidas del tanque. Los valores mínimos que se observan son de 0.01 m/s y valores máximos de 1.07 m/. Los valores por debajo del mínimo establecio por la norma

generarán que se presente sedimentación y colmatación de la tubería, lo que no permitirá que el agua fluya de manera correcta para su distribución. En resumen, se observa en los gráficos una frecuencia mayor al 90% de las tuberías de la red, no cumplen el criterio y el 10% restante se encuentra por encima de los 0.30 m/s.

Figura 31. Mapa de velocidades la red San Salvador-Urb. Vela



Fuente. Modelo de la red EPANET.

5.3. Resultado 3. - Alternativas de solución para las deficiencias hidráulicas encontradas en la red de agua potable según la NB-689.

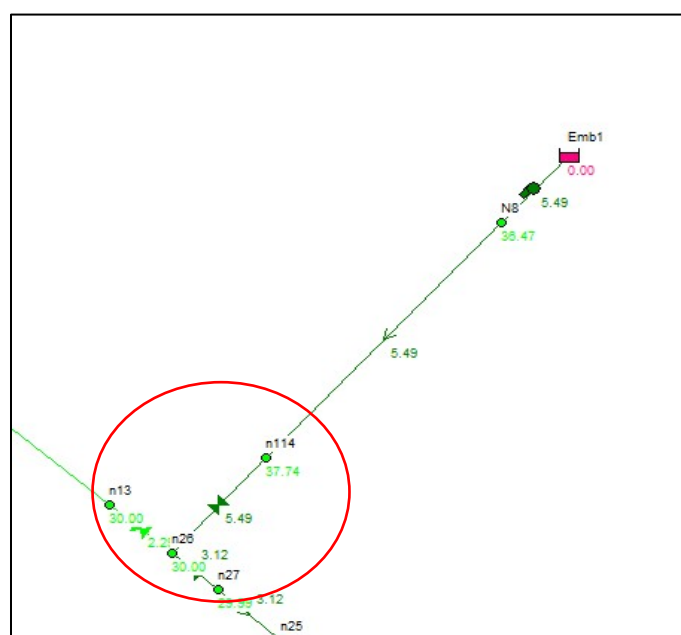
Con el fin de optimizar el modelo de la red, para que este opere bajo rangos de presión menor a 60 mca en la red de San Salvador, velocidades superiores a 0.30 m/s, y modelar el funcionamiento de la planta de tratamiento Vela, se propone la implementación de:

- Una Válvula reguladora de presión, localizada en la tubería principal a la salida del pozo San Salvador regulando una presión de 30mca (entre el nodo N8 y n26).
- Cerrar el paso de caudal en una tubería principal, con el fin de aumentar las velocidades en la red.

- Modelar el funcionamiento de la bomba que se encuentra en la planta de tratamiento en el zona Vela, esta bomba dota a la red un promedio de un litro por segundo y es utilizada para apoyar en los horarios de máximo consumo, debido a que en varios lugares se presentan presiones bajas. Se desea observar el comportamiento de la red al implementar esta fuente.
- Se implementará Válvula Regulatoras de Presión en los puntos más bajos para que este opere bajo rangos de presión menor a 60 mca en San Salvador y estas regularan una presión de 45mca.

5.3.1.1. 1er Alternativa

Figura 32. Válvula de regulación de presión a la salida del pozo San Salvador



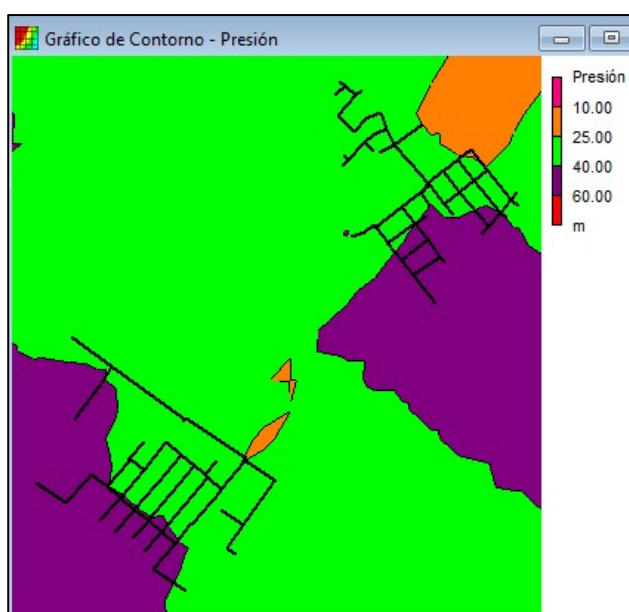
Fuente. Modelo de la red EPANET.

Al utilizar la válvula reguladora de presión en la tubería principal a la salida del pozo San Salvador, se observa que se regulan las presiones en los puntos más bajos de la red y se encuentran dentro del rango óptimo, ya que estas operaban con presiones por encima de 60mca. Los valores máximos que se generan ahora son de 53.55mca y los mínimos son de 24.48mca.

Al instalar una válvula VRP se tendrá una ventaja, la cual será evitar el uso de distintas válvulas VRP en varios puntos y regular a presiones menores de 60mca. Una desventaja será a la hora de realizar algún mantenimiento de la válvula por algún defecto o mal funcionamiento, se afectará a toda la red el suministro de agua y esto ocasionará problemas con los usuarios.

Las velocidades continúan por debajo del mínimo establecido 0.30 m/s, solo el 10% de toda la red cumple con estos límites. Las pérdidas de carga se encuentran dentro del rango normativo.

Figura 33. Gráfico de contorno de presiones Sector Vela



Fuente. Modelo de la red EPANET.

5.3.1.2. 2da Alternativa

Al cerrar la válvula de corte que se muestra en la Figura 34, se observó que la velocidades aumentan levemente en la zona central de la red, encontrándose por encima de los 0,30 m/s, esta zona es donde se centra la mayor población de B/ San Salvador, será una buena opción para realizar una limpieza en las tuberías.

Figura 34. Válvula de Regulación de Presión San Salvador

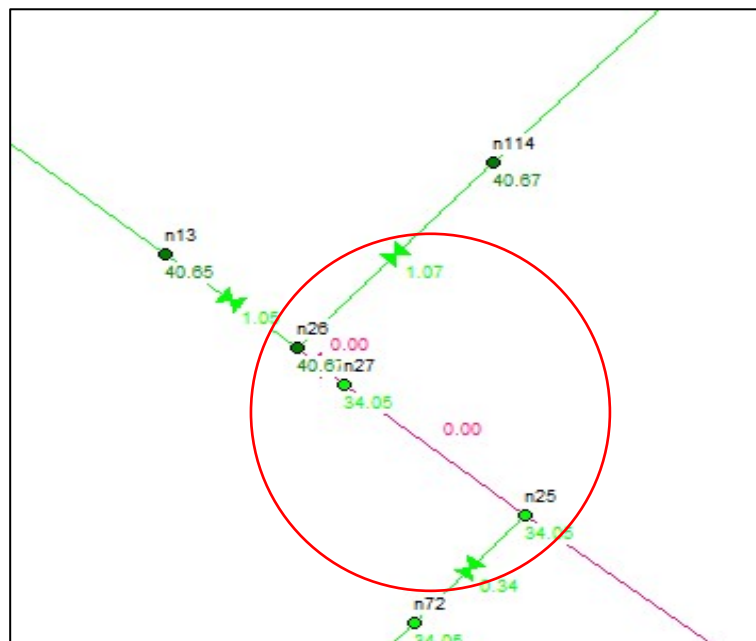
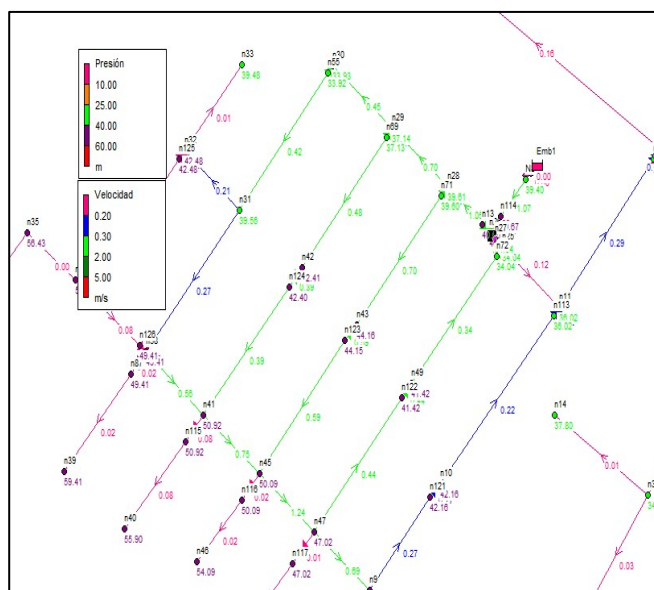


Figura 35. Red de agua potable San Salvador



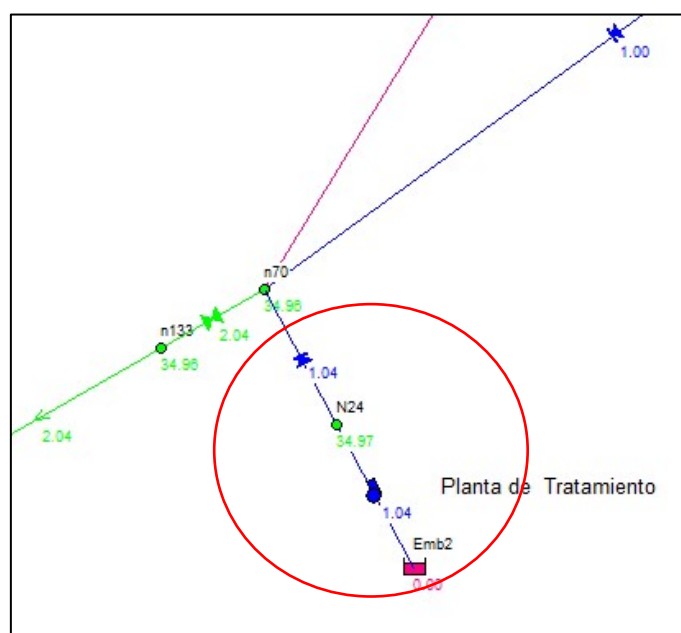
Fuente. Modelo de la red en EPANET.

5.3.1.3. 3er Alternativa

EPANET permite modelar una bomba con un caudal determinado a la red, de tal manera se implemento la planta de tratamiento Vela.

Al modelar la bomba en la planta de tratamiento, se observa el comportamiento de la red en esa zona. Según el operador técnico encargado del sector, la Urb. Vela sufre en horarios de máximo consumo la falta de agua y presiones bajas en los puntos más altos, por este motivo en la actualidad se pone en funcionamiento esta fuente logrando solucionar el problema que se presenta. No se cuenta con datos característicos de la bomba, por tal motivo se modeló una bomba con un caudal mínimo de 1 l/s. Se observa presiones y pérdidas de carga dentro de los límites y las velocidades aun por debajo de los 0.30 m/s.

Figura 36. Modelar la Bomba Planta de tratamiento Vela

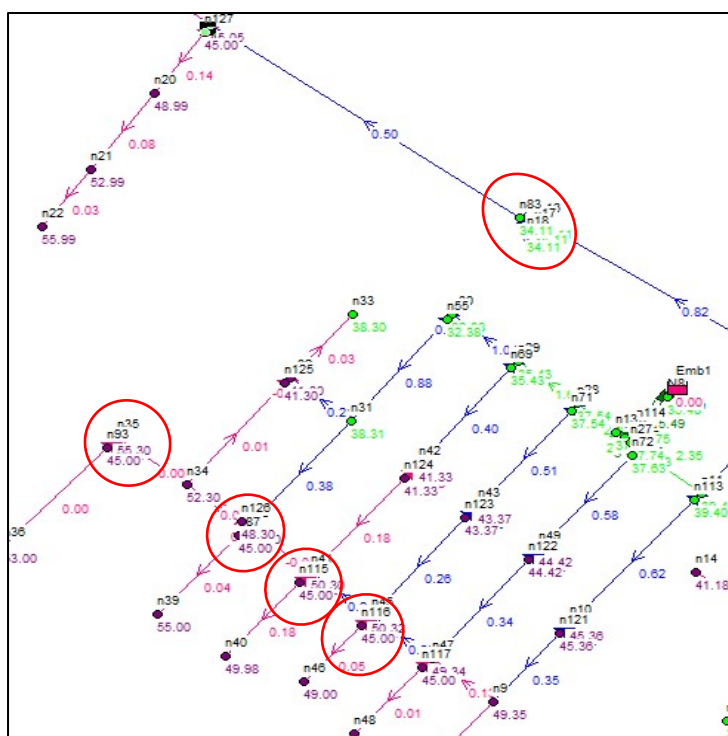


Fuente. Modelo de la red EPANET.

5.3.1.4. 4ta. Alternativa

Las válvulas reguladoras de presión que se modeló en los puntos bajos de la red en San Salvador, se observa la reducción de presión en 5 zonas que se muestran en la Figura 52, estos puntos: n35-n36, n19-n20, n38-n39, 41-40 y 45-46, con valores obtenidos de 56 mca a 50 mca por debajo de los 60 mca alcanzando disminuir sus presiones hasta un 13%. Esta es una opción que se puede tomar para evitar altas presiones en distintas zonas en la red actual.

Figura 37. Válvula de Regulación de Presión San Salvador



Fuente. Modelo de la red EPANET.

5.4. Resultado 4. – Modelación de escenarios del funcionamiento hidráulico de la red bajo distintas condiciones de demanda y suministro.

Se presenta en este trabajo, diferentes escenarios de modelación de la red de agua potable en el sector Vela, con el propósito de evaluar la respuesta de la red ante inesperadas situaciones que podrían ocurrir durante el suministro de agua al sector y observar como será el comportamiento hidráulico en ese preciso instante, si los parámetros se encuentran dentro de los límites que estipula la norma boliviana. A continuación se observará 5 escenarios distintos modelados en el software Epanet.

5.4.1. Escenario de modelación 1. – Rotura de Tubería

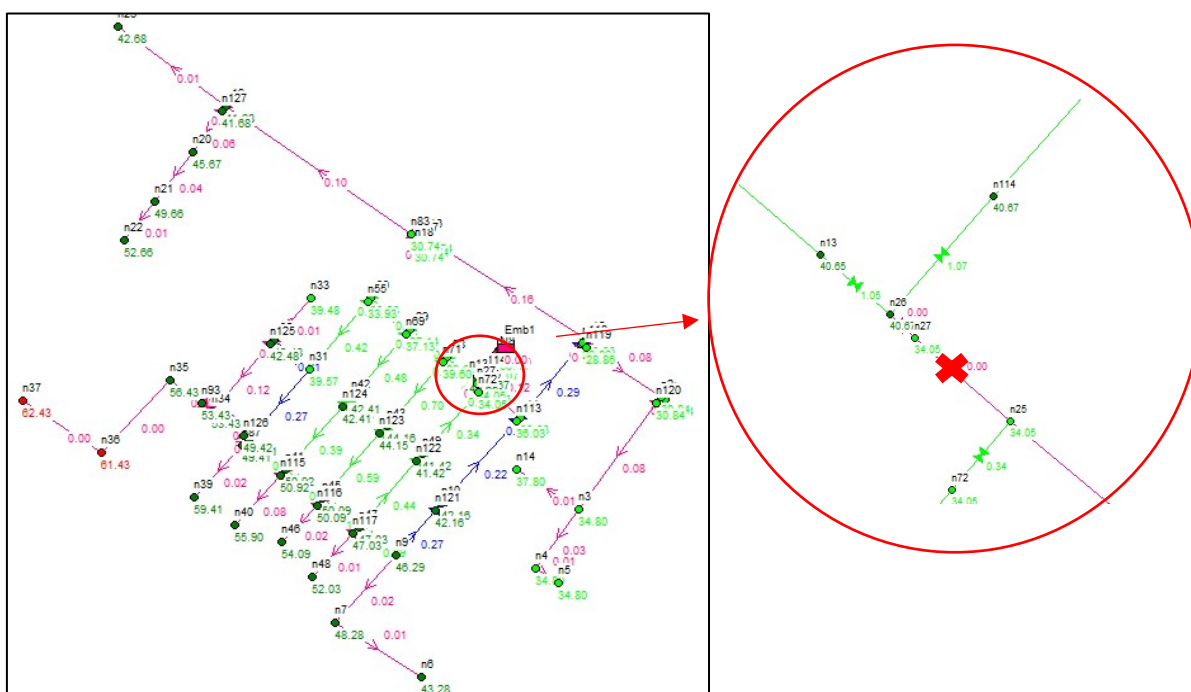
Para evaluar la respuesta de la red frente a inesperadas situaciones, se presenta el hipotético caso de roturas de tuberías secundarias o principales. Para modelar estas situaciones

se utilizó el primer modelo, el cual representa la situación actual de la red San Salvador y Urb. Vela.

5.4.1.1. Rotura de tubería 1.

- **San Salvador:** Rotura tubería principal (tubería T14, nodos n27-25) Figura 38, en este caso la respuesta de la red es similar al primer modelo con respecto a las presiones, pero las velocidades aumentan de manera considerable en la zona central de la red encontrándose dentro del rango normativo, las perdidas de carga se encuentran dentro de los rangos.

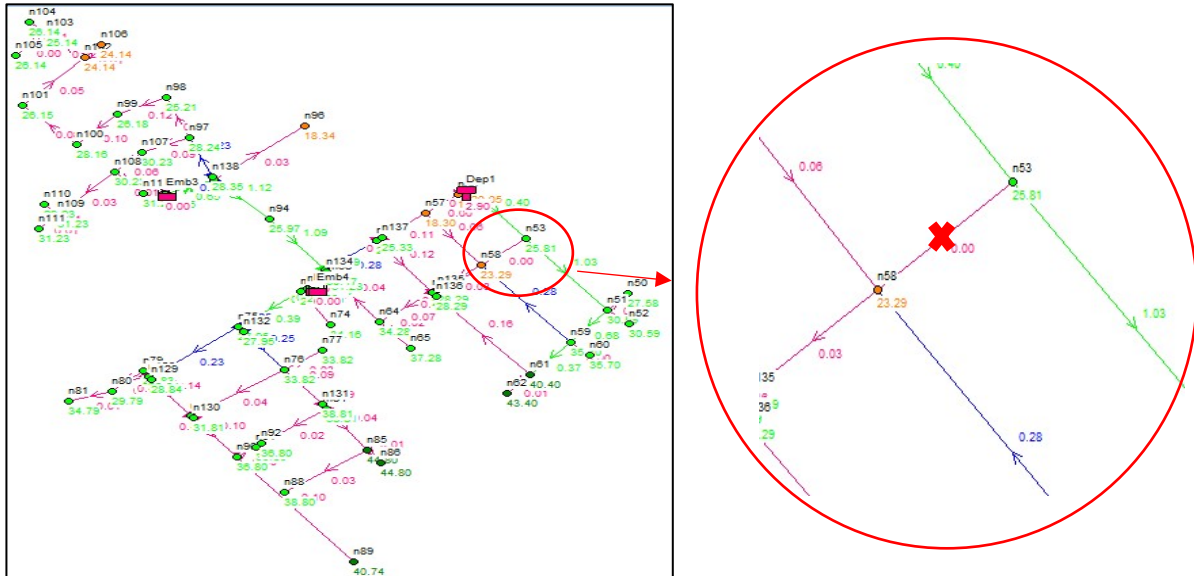
Figura 38. Rotura tubería 1 (EPANET)



Fuente. Modelo EPANET.

- **Urb. Vela:** Rotura de tubería principal (tubería p61, nodos n53-n58) Figura 39, en este caso la respuesta de la red es parecida al primer modelo, sin verse afectada negativamente, con respecto a las presiones, velocidades y pérdidas de carga.

Figura 39. Rotura tubería 1 (EPANET)

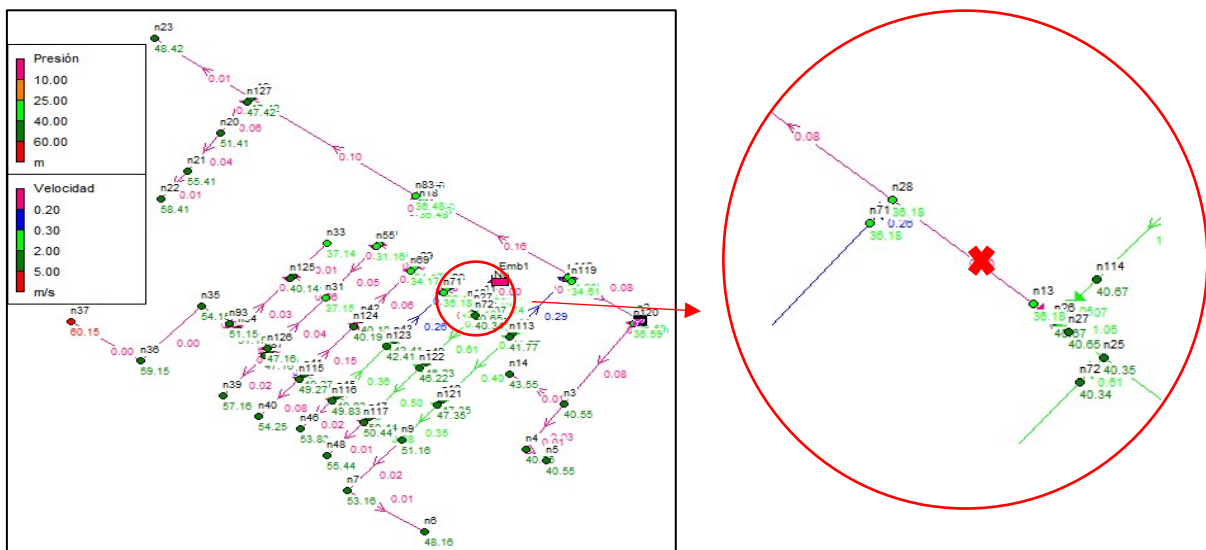


Fuente. Modelo EPANET.

5.4.1.2. Rotura de tubería 2.

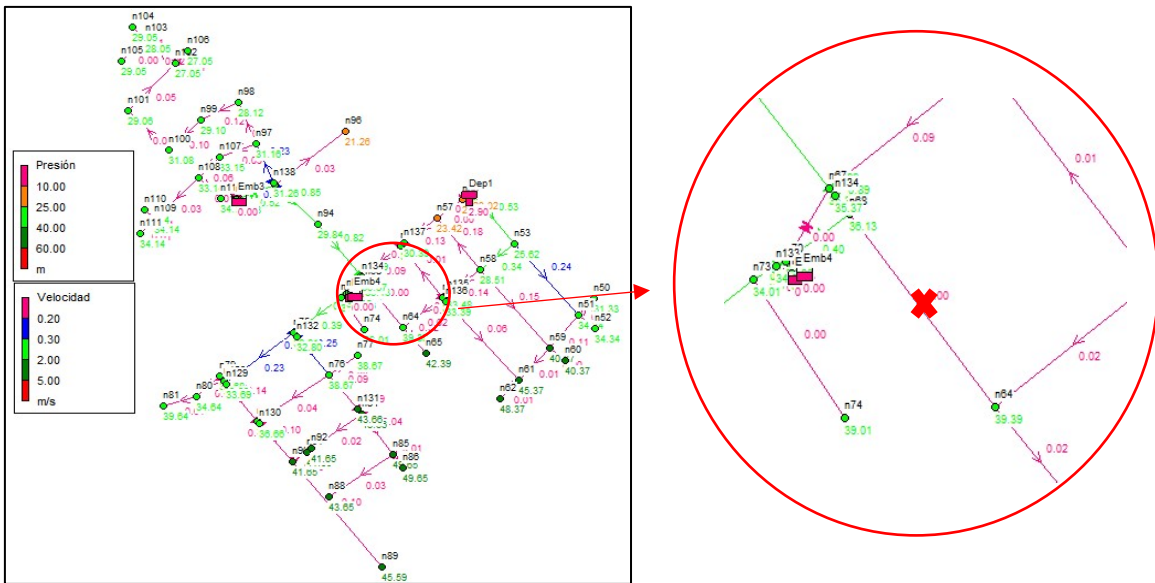
- San Salvador:** Rotura tubería principal (tubería T15, nodos n26-28) Figura 39, en este caso la respuesta de la red es diferente a el primer escenario de rotura que se simulo anteriormente, las velocidades en la zona central se encuentran por debajo de 0.30 l/s, las presiones y perdidas de carga existe poca variación.

Figura 40. Rotura tubería 2 (EPANET)



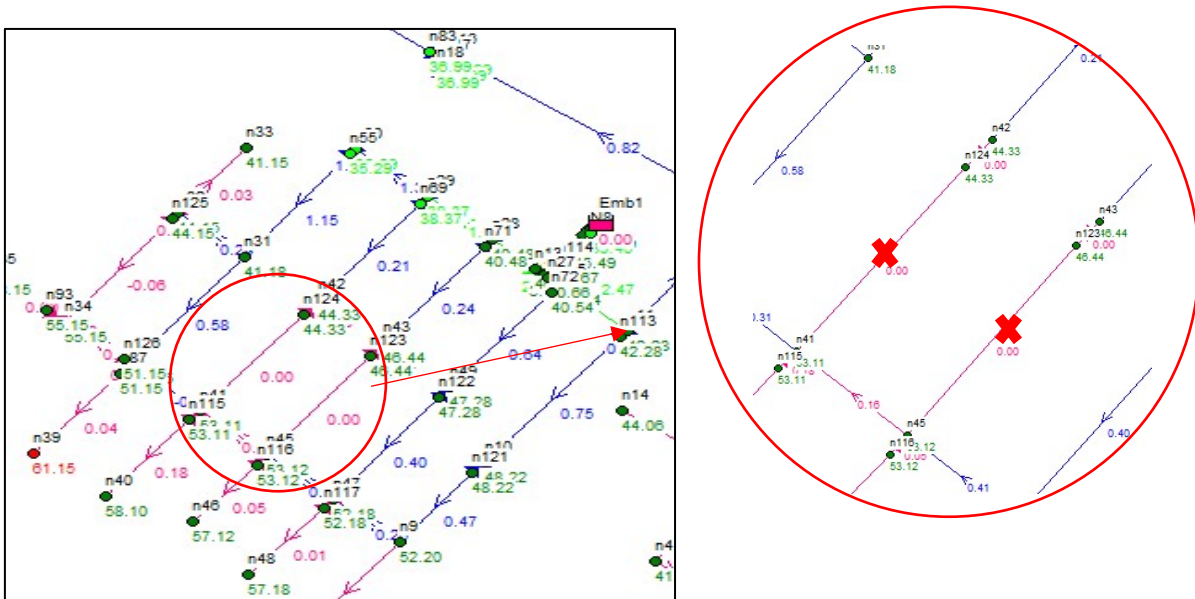
- **Urb. Vela:** Rotura de tubería principal (tubería p75, nodos n68-n64), en este caso la respuesta de la red es parecida al primer escenario de rotura 1, no afecta en gran medida a la zona con respecto a las presiones, velocidades y perdidas de carga.

Figura 41. Rotura tubería 2 (EPANET)



5.4.1.3. Rotura de tubería 3.

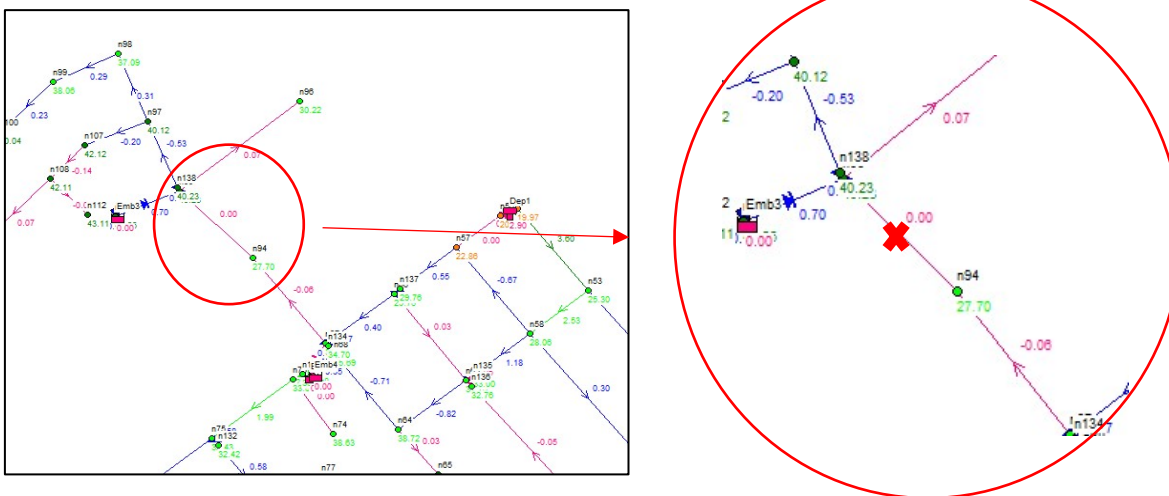
Figura 42. Rotura tubería 3 (EPANET)



Fuente. Elaboración propia.

- **San Salvador:** Rotura de tuberías secundarias (tubería T3, nodos n45-n43 y tubería T20, nodos n41-n42) Figura 42, las presiones prácticamente se mantienen, mientras que en el caso de caudal y de la velocidad existe un reordenamiento para compensar los tramos perdidos.
- **Urb. Vela:** Rotura de tubería principal (p100, nodos n95-n94) Figura 43, se observa una reducción y aumento de presión en diferentes de zonas, esta avería provoca que la Urb. Vela se divida en dos, en la zona izquierda suministrará a la red el pozo Vela y en la otra zona derecha tendrá que realizarlo el tanque elevado. Es una situación crítica debido que en algún momento del día se tendrá que respaldar el abastecimiento con el funcionamiento de la planta de tratamiento en caso de no solucionar la avería.

Figura 43. Rotura tubería 3 (EPANET)



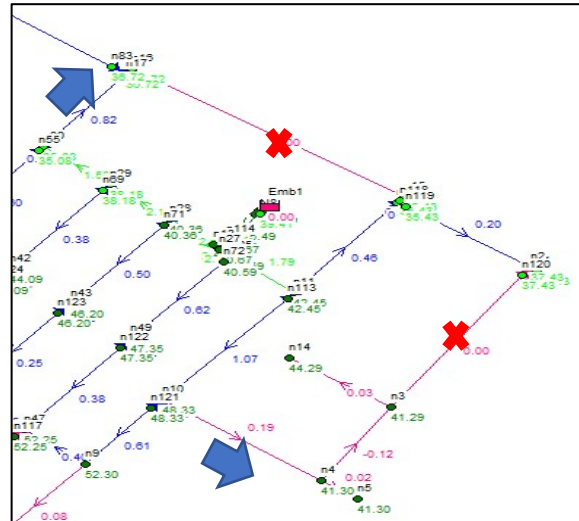
Fuente. Modelo EPANET.

5.4.1.4. Rotura de tubería 4.

- **San Salvador:** Rotura de tuberías secundarias (tubería p14, nodos n15-n16 y tubería T13, nodos n2-n3) Figura 44, antes estas situaciones se tuvieron que implementar dos tuberías (tubería T43, nodos n10-n4 y tubería T41, nodos n30-

n17) para evitar los cortes de suministro a los usuarios. Se observa que las presiones y velocidades se encuentran similares al primer modelo.

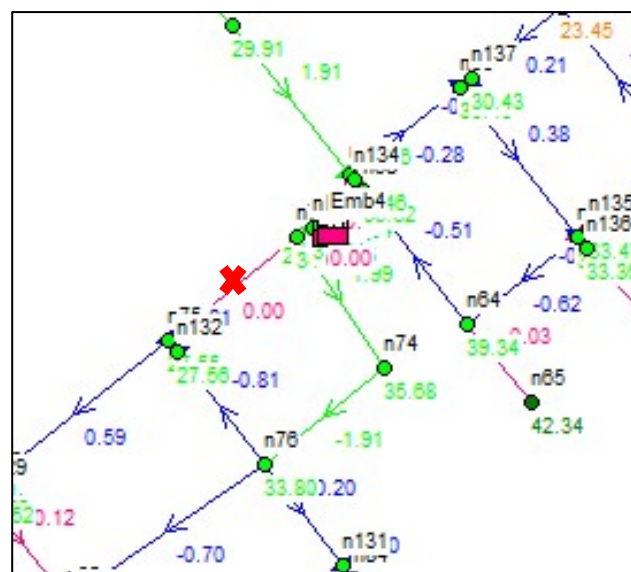
Figura 44. Rotura tubería 4 (EPANET)



Fuente. Modelo EPANET.

- **Urb. Vela:** Rotura de tubería principal (tubería p81, n73-n75) Figura 45, ante esta situación se conectaron las tuberías (p80-p83, nodo n74), no se observa cambios de presiones, solo redireccionamientos del caudal.

Figura 45. Rotura tubería 4 (EPANET)



Fuente. Modelo EPANET.

Teniendo en cuenta todos los escenarios que se realizaron anteriormente, se sugiere conectar los ramales abiertos que en diferentes partes de la red no se encuentran acopladas, para que de este modo no se dependa solamente de las tuberías principales para la conducción del agua, si en alguna ocasión llega a ocurrir una rotura, afectaría considerablemente a la red y varios usuarios.

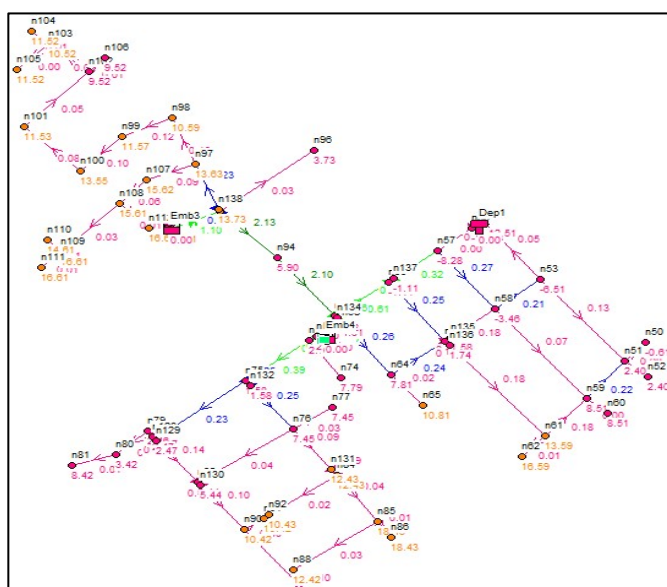
5.4.2. Escenario de modelación 2. –Regulación en el tanque de reserva

Urb. Vela

Se ha planteado realizar la modelación con EPANET, a la respuesta de la red ante la regulación del Tanque elevado en esta zona, se realizará varios niveles piezométricos dentro del mismo y se observará el comportamiento hidráulico.

- **Nivel piezométrico del tanque 0m:** En este nivel 0m del tanque elevado se presentan presiones muy bajas y presiones negativas, el pozo Vela no satisface con el suministro a toda la red. Una solución ante este caso se podría activar la bomba de la planta de tratamiento para tratar de compensar la demanda a toda la red.

Figura 46. Escenario de modelación 4 nivel piezométrico 0



Fuente. Modelo EPANET.

- **Nivel piezométrico del tanque 0.5m:** En este nivel 0.5m del tanque se observa presiones normales que varían entre 17.64 mca y 47.62 mca, se encuentran dentro del rango permitido y las velocidades están aun por debajo de los valores mínimos de la norma.
- **Nivel piezométrico del tanque 1.5m:** En este nivel 1.5m del tanque se observa presiones normales que se encuentran dentro del rango permitido y las velocidades están aun por debajo de los valores mínimos de la norma.

Ante estas situaciones que se presentaron no hubo muchas variaciones con respecto a las presiones y velocidades, solamente se tuvo un escenario negativo al tener un nivel piezométrico 0 m en el tanque. Se llega a la conclusión que, para evitar la disminución considerable de presiones y falta de agua, el tanque debe mantenerse con niveles de agua por encima del mínimo.

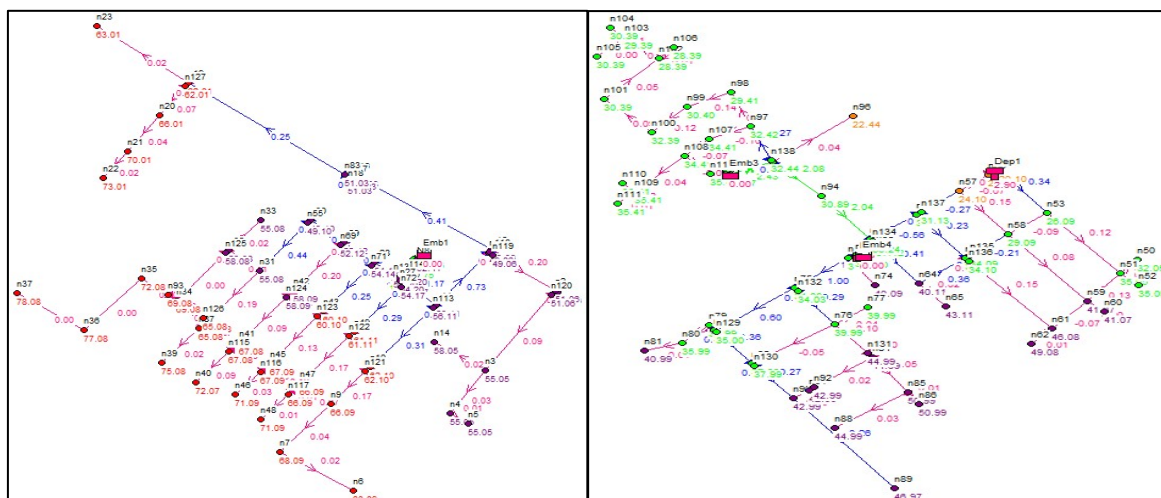
5.4.3. Escenario de modelación 3. – Estados de Carga

Se propone modificaciones a los estados de carga de la red, con estos valores observaremos cómo funciona el modelo en caso de baja o alta demanda y si las velocidades se sitúan dentro del rango establecido. Para conseguir una modelación más representativa de la realidad, EPANET nos permite asociar a cada consumo un factor multiplicativo en cada instante temporal. Con el fin de conocer la distribución de presiones en los nudos y velocidades en las tuberías de la red para cada uno de los estados de carga, se ha procesado el modelo para consumos totales comprendidos entre 50% a 150% del consumo total.

5.4.3.1. Demandas al 50%

A continuación, se disminuyó la demanda al 50% en cada nudo, para observar como se comporta la red con un menor consumo y si los parámetros hidráulicos están dentro de los parámetros establecidos por NB 689.

Figura 47. Demandas al 50% (presiones y velocidades) San Salvador-Urb. Vela



Fuente. Modelo EPANET.

San Salvador. Se observa un cambio considerable de presiones sobrepasando los máximos valores establecidos (presiones de 49.10mca a 78.08mca), las velocidades no cumplen con los rangos normativos que encuentran por debajo del mínimo 0.30 m/s. Para evitar esta situación, se debe instalar la válvula reguladora de presión en el tramo a la salida de la red ya mencionada anteriormente, de tal maenra, se conseguirá las presiones deseadas en la red.

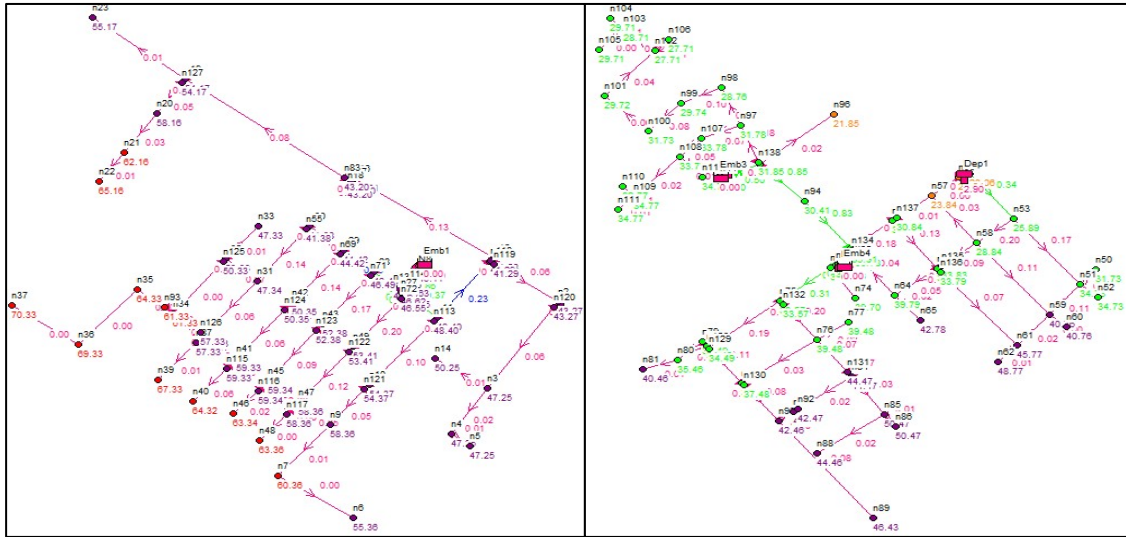
Urb. Vela. En este escenario se observa que las presiones se encuentran dentro del rango permitido (presiones de 20.10mca a 50.99mca), las velocidades continúan por debajo del mínimo 0.30 m/s.

5.4.3.2. Demandas al 80%

A continuación, se disminuyó la demanda al 80% en cada nudo, para observar con un menor consumo el comportamiento de la red.

San Salvador. Se observa que las presiones siguen sobrepasando los máximos valores establecidos (presiones de 45.11mca a 70.33mca), las velocidades no cumplen con los rangos normativos por debajo del mínimo 0.30 m/s.

Figura 48. Demandas al 80% (presiones y velocidades) San Salvador-Urb. Vela



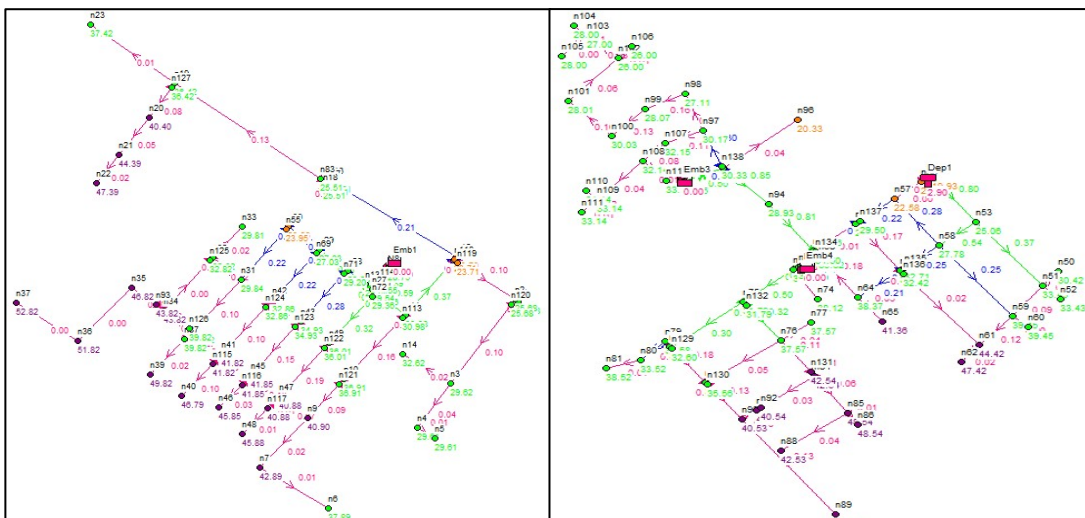
Fuente. Modelo EPANET.

Urb. Vela: Las presiones se encuentran dentro del rango permitido (presiones de 20.06 mca a 46.43mca), las velocidades continúan por debajo del mínimo 0.30 m/s.

A continuación, se aumentó la demanda al 130% en cada nudo, para observar con un mayor consumo el comportamiento de la red.

San Salvador. Las presiones se encuentran dentro de los establecido (presiones de 23.96mca a 52.82mca), las velocidades aun continúan por debajo del mínimo 0.30 m/s.

Figura 49. Demandas al 130% (presiones y velocidades) San Salvador- Urb. Vela



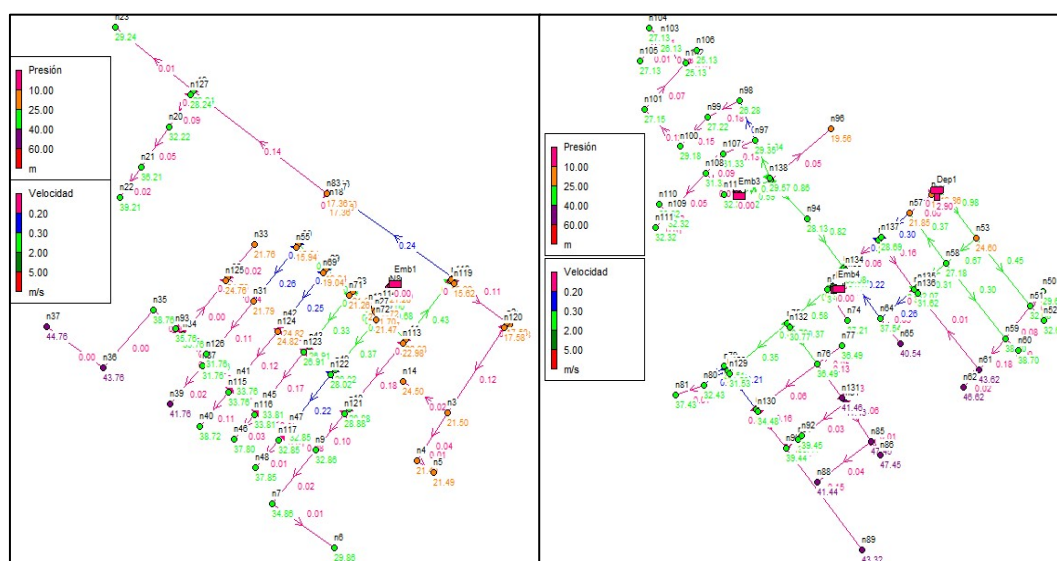
Urb. Vela. Las presiones se encuentran dentro del rango permitido (presiones de 19.93mca a 44.44mca), las velocidades continúan por debajo del mínimo 0.30 m/s.

5.4.3.3. Demandas al 150%

A continuación, se aumentó la demanda al 150% en cada nudo, para observar con un mayor consumo el comportamiento de la red.

San Salvador. Las presiones se encuentran dentro de los establecido (presiones de 15.62mca a 44.76mca), las velocidades aun continúan por debajo del mínimo 0.30 m/s.

Figura 50. Demandas al 150% (presiones y velocidades) San Salvador-Urb. Vela



Fuente. Modelo EPANET

Urb. Vela. Las presiones se encuentran dentro del rango permitido (presiones de 19.86mca a 43.32mca), las velocidades continúan por debajo del mínimo 0.30 m/s y en algunos tramos se observa un aumento.

Se modificó el caudal total demandado de manera favorable, lo cual permitió modelar distintos estados de carga. Se identificó las nuevas distribuciones de presiones y velocidades, los resultados que proporciona EPANET quedan reflejados en los ANEXOS 4.

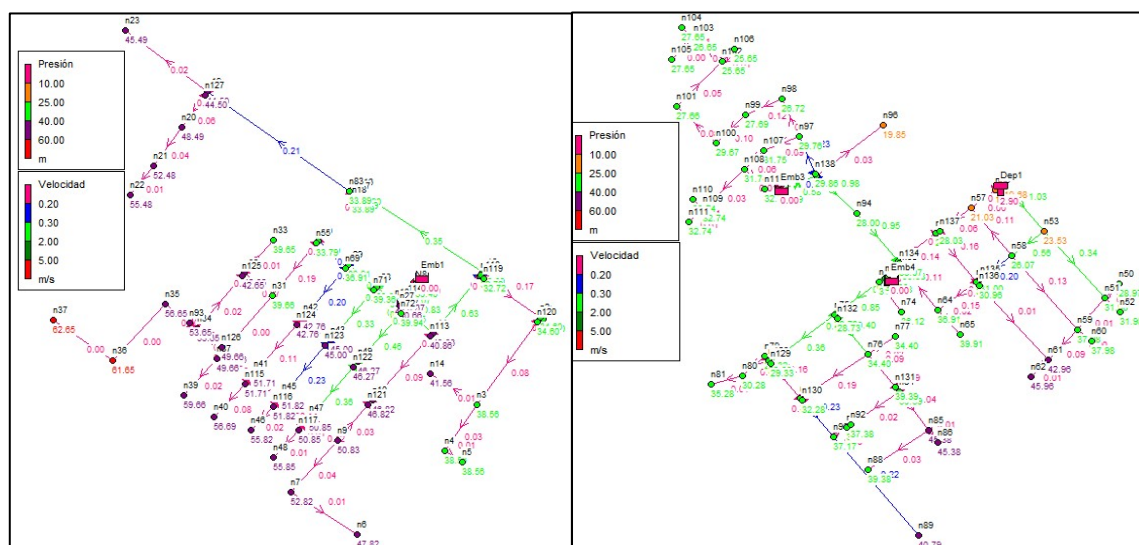
Si nos fijamos en los resultados, comprobamos que, como es lógico, debido a la disminución de la demanda, las presiones en toda la red han aumentado y las velocidades por todas las tuberías han disminuido, asimismo, al aumento de la demanda ocurre todo lo contrario.

5.4.4. Escenario de modelación 4. - Diámetros

Para observar el comportamiento de la red, específicamente las velocidades en las tuberías, se modificarán los diámetros que existen en la red. Teniendo en cuenta que este sector se encuentra en desarrollo de crecimiento poblacional, se adoptará diámetros de acuerdo a lo que establece la norma boliviana.

San Salvador-Urb. Vela: Se modificará con un diámetro de 2" (diámetro interno 54.5 mm) a la mayor parte de la red. Se observará el comportamiento de presiones y velocidades.

Figura 51. Modificación de diámetros 2" San Salvador-Urb. Vela



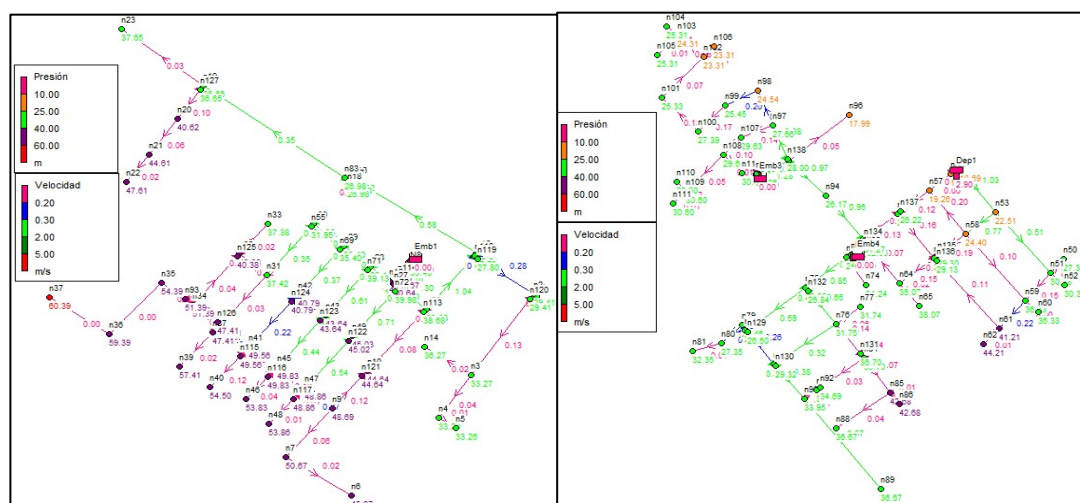
Fuente. Modelo EPANET.

San Salvador. Con el fin de conocer el comportamiento de la red ante la modificación de diámetros, se observa que las presiones no se modifican con respecto al primer modelo, en pocos tramos las velocidades aumentan, pero se siguen ubicando por debajo del mínimo establecido 0.30 m/s.

Urb. Vela. De igual manera con la red de San salvador el comportamiento de la red ante la modificación de diámetros, se observa que las presiones no se modifican con respecto al primer modelo, en pocos tramos las velocidades aumentan, pero se siguen ubicando por debajo del mínimo establecido 0.30 m/s.

San Salvador-Urb. Vela: Se modificará con un diámetro de 1 1/2" (diámetro interno 42.4 mm) a la mayor parte de la red. Se observará el comportamiento de presiones y velocidades.

Figura 52. Modificación de diámetros 1 1/2" San Salvador-Urb. Vela



Fuente. Modelo EPANET.

San Salvador. El comportamiento de la red en esta situación, se observa que en la zona central de la red de San Salvador las velocidades en las tuberías principales y secundarias se ubican por encima de los 0.30 m/s, en los puntos más bajos aun están por debajo de lo establecido. Las presiones se mantienen normales en todos los puntos.

Urb. Vela. El comportamiento de la red ante la modificación de diámetros, se observa que las presiones no se modifican con respecto al primer modelo, en varios tramos las velocidades aumentan, pero en dos zonas se siguen ubicando por debajo del mínimo establecido 0.30 m/s.

Por lo tanto, las dos situaciones que se presentaron anteriormente con la reducción de los diámetros, no fueron tan satisfactorios debido a que existen aún velocidades por debajo del mínimo establecido, esto ocurre por el poco caudal que circula por estos tramos, si el caudal demandado aumenta también ocurrirá con la velocidad en la tuberías. Además, el caudal está relacionado con las pérdidas de carga en la tubería, si el consumo aumenta la pérdida de carga también incrementará.

5.4.5. Escenario de modelación 5. – Periodo Extendido

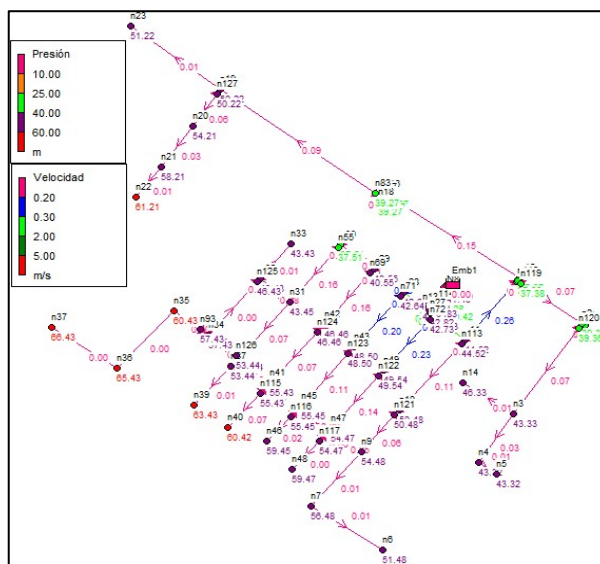
Hasta el momento, todas las simulaciones se han realizado mediante el análisis hidráulico en régimen permanente, es decir, para un instante determinado, pero EPANET permite también realizar una modelación más cercana a la realidad mediante el análisis en período extendido, pudiendo asociar a cada consumo un factor multiplicativo que aumente o disminuya la demanda en cada instante de tiempo.

No se va a profundizar en exceso este tipo de análisis en el presente trabajo debido a que no es el objetivo del mismo, el propósito de este apartado es solo de introducir otra de las posibilidades que aporta EPANET para el diseño y estudio de redes de agua potable.

Para llevar a cabo una simulación en período extendido es necesario crear una curva de modulación. En este caso, se adoptará una duración de 6 horas con un intervalo de 20min. La respuesta de la red en periodo extendido es la siguiente:

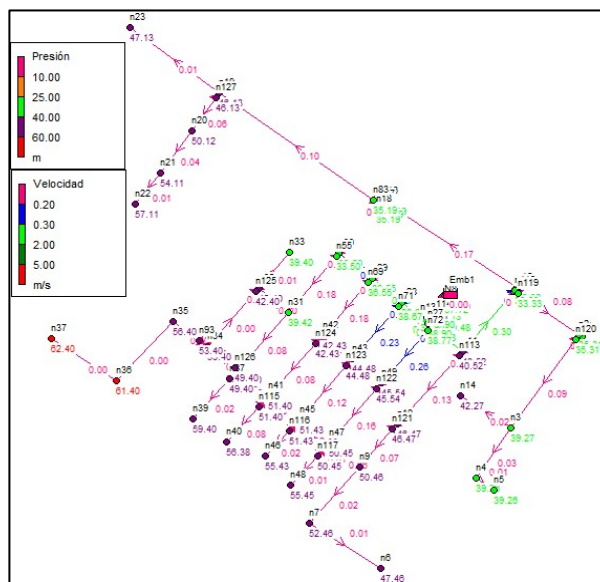
Entre las 9:20 am y las 11:20 am existe presiones altas en los puntos más bajos de la zona San Salvador con valores de 66.43 mca y las velocidades están por debajo del mínimo establecido 0.30 m/s. Durante este tiempo podrían llegar a producirse sobrepresiones que provocaran roturas en las tuberías en esas zonas.

Figura 53. Respuesta de la simulación entre las 9:20am a 11:20am San Salvador



Fuente. Modelo EPANET.

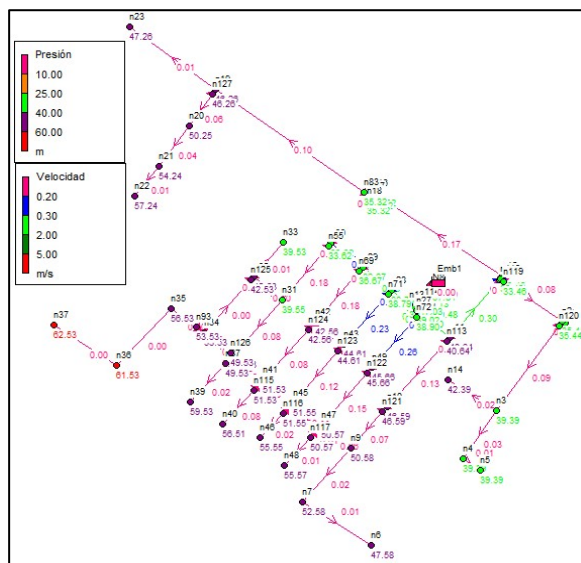
Figura 54. Respuesta de la simulación entre las 11:20am a 13:20am San Salvador



Fuente. Modelo EPANET.

Durante las horas 11:20am a 13:20pm de mayor demanda se observa que la red responde de forma satisfactoria con respecto a las presiones con 61.40 mca en el punto más bajo. Y la velocidad aun encontrándose por debajo de 0.30 m/s en toda la red.

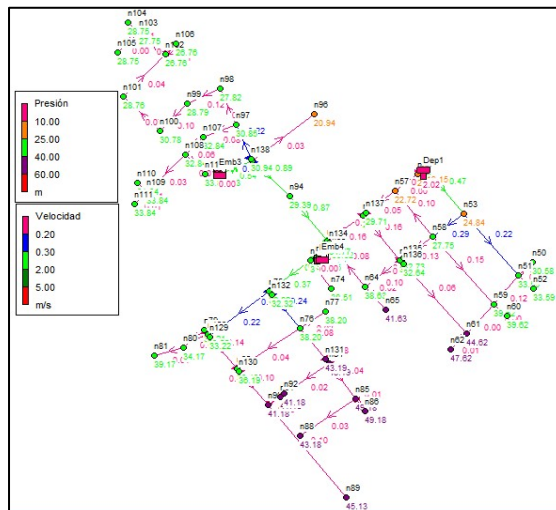
Figura 55. Respuesta de la simulación entre las 13:20pm a 15:20am San Salvador



Fuente. Modelo EPANET.

Durante las horas 13:20pm a 15:20pm de mayor demanda se observa que la red continua de forma satisfactoria con respecto a las presiones con 61.53 mca en el punto más bajo. Y la velocidad aun encontrandose por debajo de 0.30 m/s en toda la red.

Figura 56. Respuesta de la simulación entre las 9:20am a 11:20am Urb. Vela



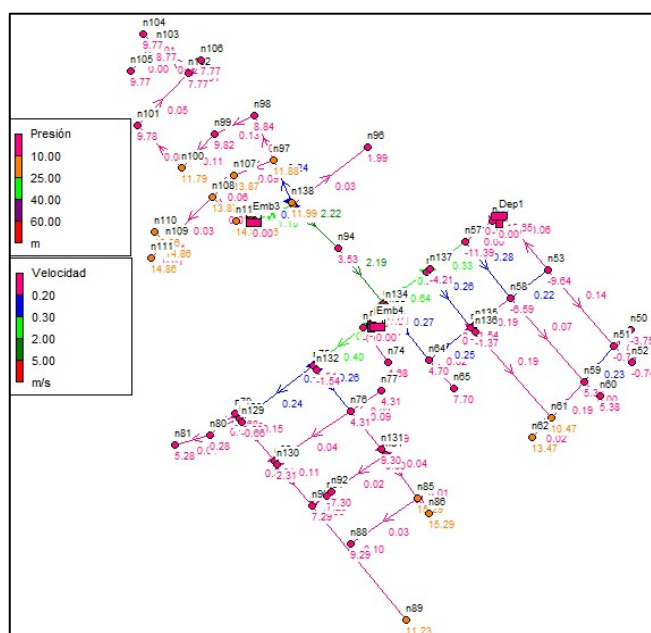
Fuente. Modelo EPANET.

Durante las horas 9:20am a 11:20am se observa que la red responde de forma satisfactoria con respecto a las presiones con 49.18 mca en el punto más bajo y 19.15 mca.

Dejando de lado como se comporta la velocidad que se encuentra por debajo de los 0.30 m/s en toda la red. El nivel piezométrico del tanque elevado está a una altura de 2.02 m.

Durante las horas 11:20am a 13:20pm se observa que la red responde de forma satisfactoria con respecto a las presiones con 48.03 mca en el punto más bajo y 18.20 mca. Dejando de lado como se comporta la velocidad por debajo de 0.30 m/s en toda la red. El nivel piezométrico del tanque elevado está a una altura de 1.08 m.

Figura 57. Respuesta de la simulación entre las 13:20pm a 15:20am Urb. Vela



Fuente. Modelo EPANET.

Durante las horas 13:20pm a 15:20pm se observa que la red sufrió bajas de presiones y valores negativos, esto se debe a que el tanque elevado suministra agua a la red conjuntamente con el pozo Vela, pero en el tanque no ingresaba caudal para restaurar el agua que demandaba la red, el motivo de que el pozo no logra cubrir las demandas de la red es por falta de capacidad en la bomba. A pesar de que la bomba cuenta con una potencia de 15 HP, su altura de impulsión es muy alta, más de 90 m. Según el operador técnico del sector, menciona que el tanque de almacenamiento se abastece en horarios de la noche y en horas de la mañana el tanque se llega

a vaciar hasta llegar a una altura mínima. Para solucionar este problema se debe apoyar con la planta de tratamiento, esta es una medida que se debe tomar ante la falta de agua en la red y solucionar esta situación crítica.

Otra solución es el cambio de dos tuberías principales (p100 y T28) de diámetro de 2", cambiarlas por unas tuberías de 3", y así disminuir la pérdida de carga en esos tramos.

5.5. Resultado 5. – Propuestas de esquemas hidráulicos cada 10 años, en función al escenario proyectado al año 2040.

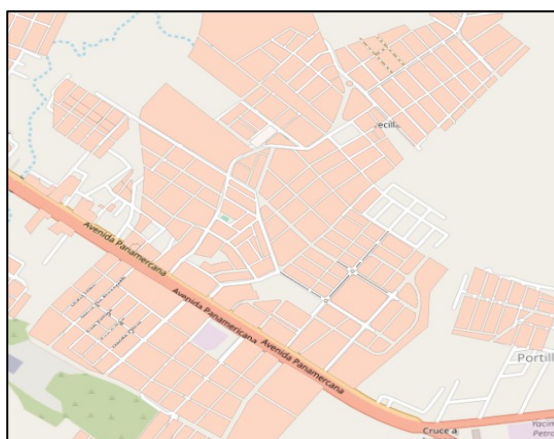
Con los datos recopilados, los cálculos realizados y los tramos trazados de las nuevas zonas definidas que serán abastecidas, se realiza la modelación de la red futura.

5.5.1. Modelación con una Proyección de la Red al Año 2030

Se determinó distintos parámetros para el cálculo, el crecimiento poblacional futuro, se realizó la proyección de un plano catastral de futuros usuarios en coordinación de la Dirección de Ordenamiento Territorial Tarija (DOT), consultas a los habitantes de la zona y al operador técnico de COSAALT encargado del sector, para obtener las nuevas distribuciones o ampliaciones que se realizarán y el lugar específico donde se emplazará las nuevas fuentes de abastecimiento.

Se propone la instalación del mallado de la tubería de transporte, tomando en cuenta que el crecimiento poblacional no es uniforme, es decir la construcción de viviendas en cada zona serán dispersas, por tal motivo se recomienda colocar estratégicamente las tuberías, para que los nuevos usuarios tengan la posibilidad de poder conectarse a la red principal en cualquier punto de la zona en estudio. Así se podrá obtener un suministro continuo a medida del incremento y necesidad de la población.

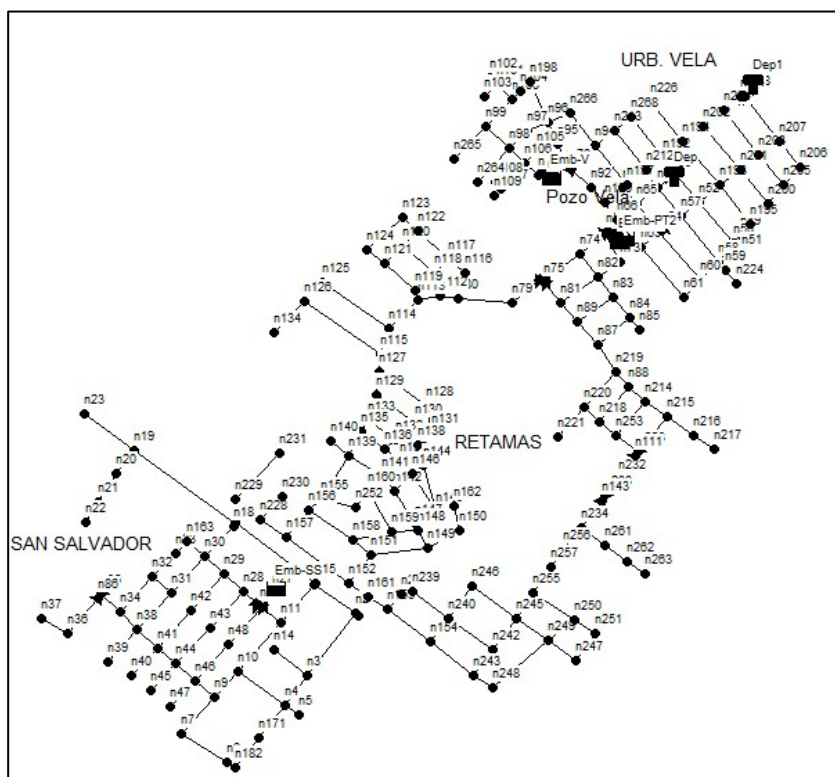
Figura 58. Catastro territorial Sector Vela



Fuente. Dirección de Catastro del Gobierno Autónomo Municipal de Tarija.

A partir de esta búsqueda de información se pudo elaborar una idea de la dirección que tomarán los asentamientos en los años futuros, permitiéndonos desarrollar el modelo de la red de agua potable futura.

Figura 59. Esquema futuro de la red (EPANET)



Fuente. Modelo EPANET.

La cota de los nuevos nodos se determinó a través del programa Google Earth y se verificaron algunos a través del plano de curvas de nivel mencionadas anteriormente. Luego se asignaron las demandas calculadas en el modelo EPANET.

En cuanto a los diámetros, se colocaron tuberías que varían de 1 ½", 2", 3", 4" y 6". Al modelar la red, se verificó las pérdidas de carga producidas, las presiones en los nodos y que las velocidades en las tuberías nuevas se encuentren dentro de los rangos normativos.

5.5.1.1.1. *Análisis de Oferta y Demanda.*

Se analizó la oferta de agua potable que será proyectada al año 2030 y la demanda de la población, basándose en los siguientes datos:

- Tasa de crecimiento de 2.6% y la población proyectada al año 2030 (San Salvador 1883 habitantes y Urb. Vela 1565 habitantes)
- Dotación de 100.41 l/hab/día.
- Nuevas zonas se incrementan como ser barrio Retamas, zona alta Urb. Vela y zona nueva Terminal. Todas estas zonas mencionadas se encuentran dentro del sector Vela.
- Población proyectada al 2030: Retamas (1615 habitantes), zona alta Urb Vela (700 habitantes) y zona nueva Terminal (59 habitantes).
- Instalación del nuevo Tanque de almacenamiento de 500m³ en la zona alta de Urb. Vela (cota 1910).

5.5.1.1.2. *Usos y Demandas Futuro*

La práctica totalidad del uso de agua en los sectores es de tipo doméstico, también existe de uso no domésticos, por ejemplo: Edificios, terminal de buses, canchas deportivas, plazas,

locales industriales, etc. Por el momento los terrenos que permanecen sin alguna construcción o que son áreas verdes, no están proyectadas de qué tipo de uso serán a futuro.

Tabla 33. Tipologías de usuarios y puntos de consumo

TIPO DE USUARIO	DOTACIÓN	
Dotación habitantes	100.41	l/hab/día
Dotación parqueo	2	l/m ² /día
Dotación Parque	2	l/m ² /día
Dotaciones locales deportivos	1	l/espectador. Día
Dotación local comercial	50	l/empleado. Día
Dotación edificio	100	l/cama. Día
Dotación Matadero	400	l/cabezaabatida/día
Dotación terminal	5	l/m ² /día
Dotación pileta	0.1	l/s

Fuente. Elaboración propia.

5.5.1.1.3. Caudal Unitario.

Posteriormente, se calculará el caudal unitario por usuario, y con este resultado se obtendrá las demandas en cada nudo, el procedimiento que se seguirá será el método de número de familias. Consiste en multiplicar el caudal unitario por el número de familias del área de influencia del nudo.

Tabla 34. Caudal unitario

CAUDAL UNITARIO		
Caudal habitantes	0.012	l/s
Caudal parqueos	0.012	l/s
Caudal pileta	0.100	l/s
Caudal parque	0.045	l/s
Caudal local deportivo 1	0.001	l/s
Caudal edificios	0.069	l/s
Caudal matadero	0.012	l/s
Caudal terminal	0.622	l/s

Fuente. Elaboración propia.

Figura 35. Resultados obtenidos de Investigaciones elaboradas en la UAJMS

UNIVERSTARIOS	RESULTADOS OBTENIDOS			
	Zona de estudio	Dotación lts/hab. Día	K1 s/u	K2 s/u
Yanna Torrez Aviles	El Molino	207.07	1.2	1.91
Melvin J. Huanca Doria M.	El Molino	161.1	1.203	1.3615
Yimy R. Cadena O.	Las Panosas	185.336	1.46	1.464

Fuente. Proyecto de investigación: Estimación de dotación media diaria de agua potable y calibración de coeficientes K1 y K2, Tesista Yimy Raúl Cadena Ortiz.

A partir de estos resultados se promedió los tres resultados obtenidos de la investigación y se realizó la evaluación del estado futuro, para proponer las mejoras que permitan que la red de agua potable funcione correctamente con el paso de los años. Los cálculos realizados se encuentran en los ANEXOS 10. En la siguiente tabla se observará la frecuencia de las presiones y velocidades, resultado de la modelación futura..

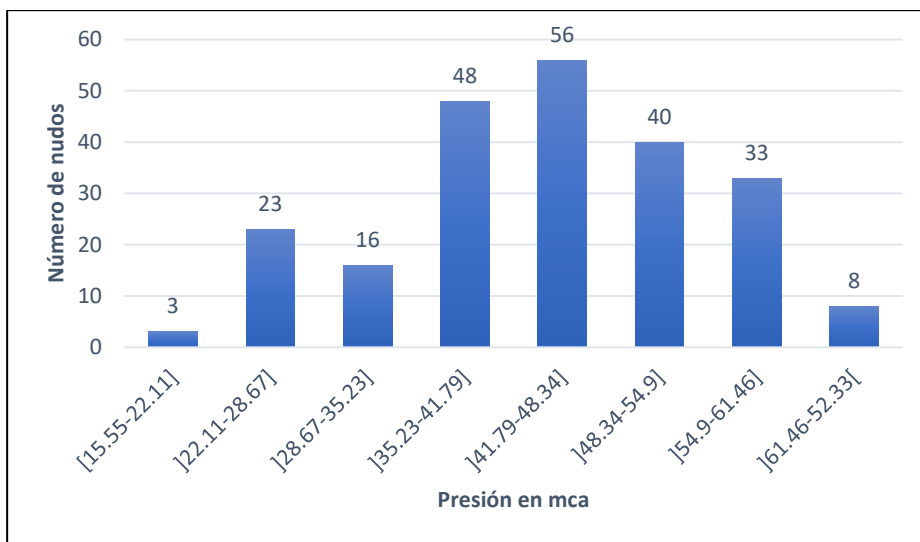
Tabla 36. Frecuencia de presiones de la red futura

Intervalo de presión en m.c.a.	Clase	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa acumulada
(i)	(Xi)	(fi)	(hi)	(Fi)	(Hi)
[15.55-22.11]	18.83	3	1.32%	3	1.32
]22.11-28.67]	25.39	23	10.13%	26	11.45
]28.67-35.23]	31.95	16	7.05%	42	18.5
]35.23-41.79]	38.51	48	21.15%	90	39.65
]41.79-48.34]	45.06	56	24.67%	146	64.32
]48.34-54.9]	51.62	40	17.62%	186	81.94
]54.9-61.46]	58.18	33	14.54%	219	96.48
]61.46-52.33[	64.74	8	3.52%	227	100

Fuente. Elaboración propia.

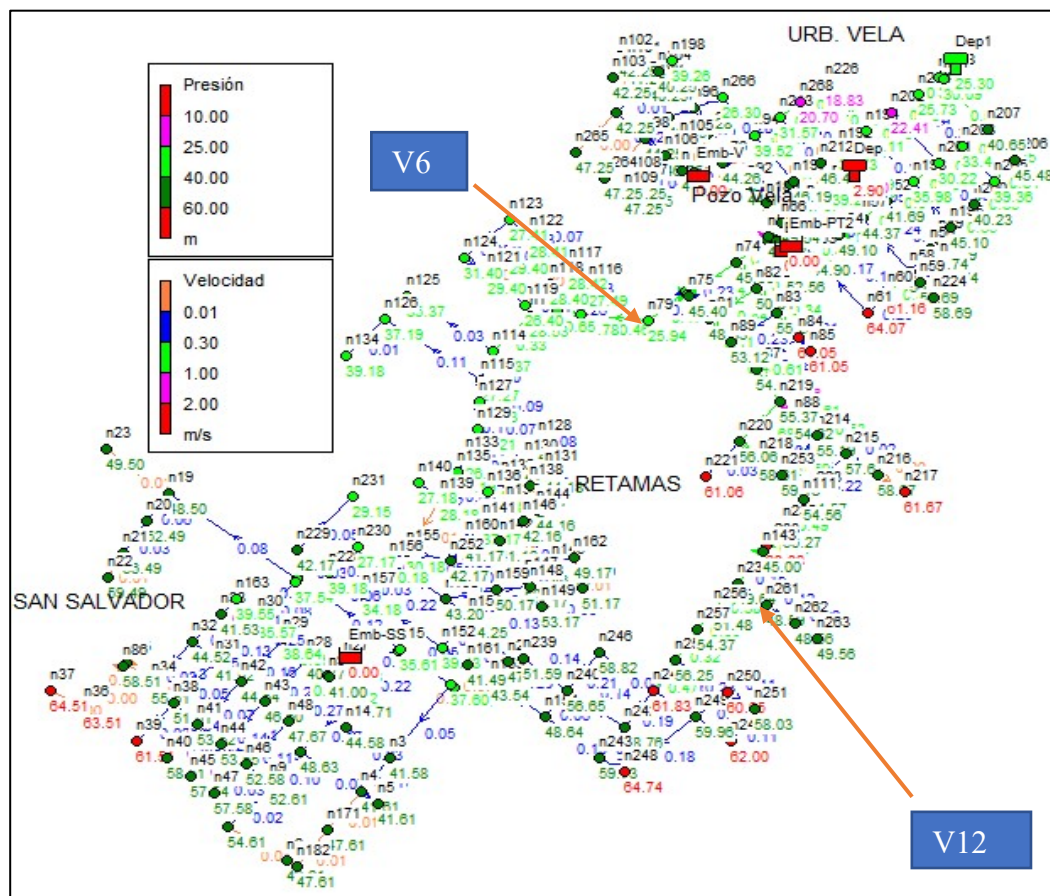
Se observa en la Tabla 37 los resultados de la modelación futura, al evaluar la red proyectada del sector Vela, se establece que la mayor frecuencia de presiones se encuentran entre 20 mca a 55mca, con una presión máxima de 64.07 y una presión mínima de 18.83 mca., estos valores se encuentran dentro de los parámetro limites establecidos por la NB 689.

Gráfico 8. Frecuencia de presiones de la red futura



Fuente. Elaboración propia.

Figura 60. Modelación de la red al año 2030 (EPANET)



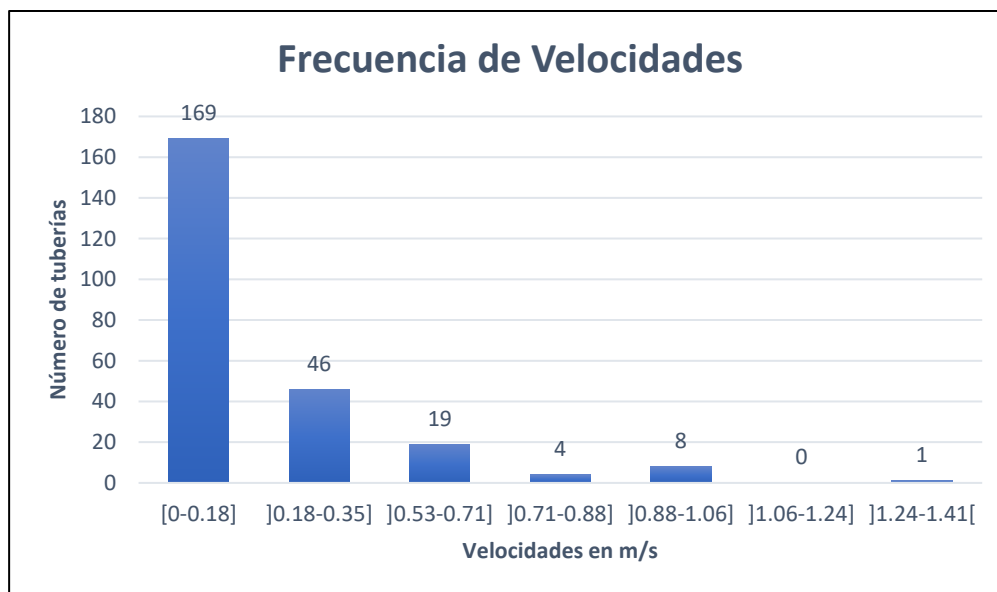
Fuente. Modelo EPANET.

Tabla 37. Frecuencia de velocidades de la red futura

Intervalo de presión en m.c.a.	Clase	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa acumulada
(i)	(Xi)	(fi)	(hi)	(Fi)	(Hi)
[0-0.18]	0.09	169	60.79%	169	60.79
]0.18-0.35]	0.27	46	16.55%	215	77.34
]0.35-0.53]	0.44	31	11.15%	246	88.49
]0.53-0.71]	0.62	19	6.83%	265	95.32
]0.71-0.88]	0.8	4	1.44%	269	96.76
]0.88-1.06]	0.97	8	2.88%	277	99.64
]1.06-1.24]	1.15	0	0.00%	277	99.64
]1.24-1.41[	1.33	1	0.36%	278	100

Fuente. Elaboración propia.

Al analizar los resultados de la velocidades en la tuberías, se observa que más de un 30% se encuentran por encima de los 0.30 m/s, es un porcentaje satisfactorio, porque a medida que aumentan las demandas, las presiones y las velocidades van estabilizándose, de tal manera que, en la modelación para el año 2040 las perspectivas serán mejores.

Gráfico 9. Frecuencia de velocidades de la red futura

Fuente. Elaboración propia.

El Tanque de almacenamiento de 500 m³ proyectado a futuro, suministrará un caudal de 10.72 l/s a la red (Urb. Vela, Retamas, zona terminal), el pozo Vela se encuentra sin funcionamiento para la proyección futura. El pozo San Salvador produce un caudal de 5.43 l/s.

Es necesario instalar válvulas especiales, para optimizar el funcionamiento de la red en el sector Vela, se ubicó una Válvula de Regulación de caudal V6 en los nodos n77-n78 y una Válvula Reductora de Presión V12 en los nodos n233-n234, con el objetivo de reducir las presiones en zonas bajas de la red y evitar pérdidas de carga elevadas.

5.5.2. Modelación con una Proyección de la Red al Año 2040

5.5.2.1. Análisis de oferta y demanda

Se analizó la oferta de agua potable que será proyectada al año 2040 y la demanda de la población, basándose en los siguientes datos:

- Población proyectada al 2040 (San Salvador 2434 habitantes y Urb. Vela 2023 habitantes) Retamas (2080 habitantes), zona alta Urb. Vela (1045 habitantes) y zona nueva Terminal (89 habitantes).
- Dotación de 110.92 l/hab/día.

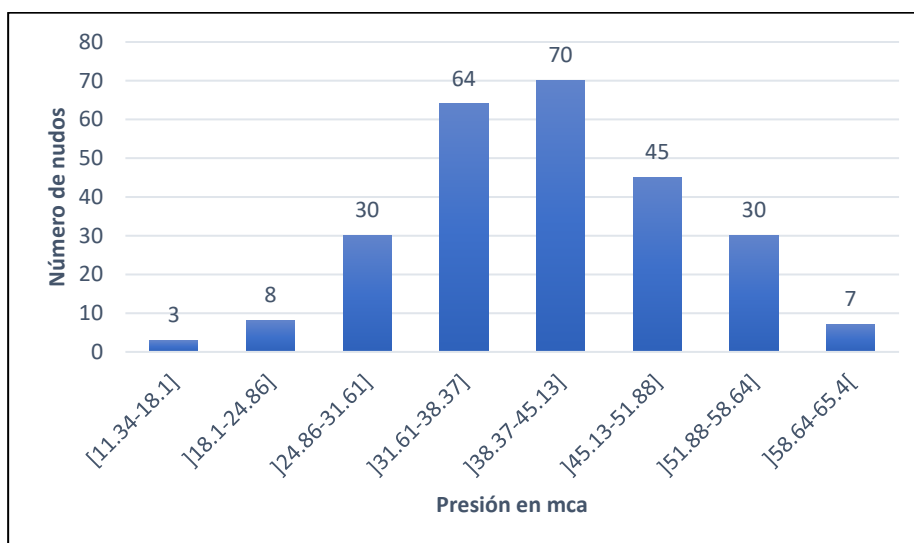
Tabla 38. Frecuencia de presiones de la red futura

Intervalo de presión en m.c.a.	Clase	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa acumulada
(i)	(Xi)	(fi)	(hi)	(Fi)	(Hi)
[11.34-18.1]	14.72	3	1.17%	3	1.17
]18.1-24.86]	21.48	8	3.11%	11	4.28
]24.86-31.61]	28.23	30	11.67%	41	15.95
]31.61-38.37]	34.99	64	24.90%	105	40.86
]38.37-45.13]	41.75	70	27.24%	175	68.09
]45.13-51.88]	48.51	45	17.51%	220	85.6
]51.88-58.64]	55.26	30	11.67%	250	97.28
]58.64-65.4[	62.02	7	2.72%	257	100

Fuente. Elaboración propia.

Se observa en la Tabla 37 los resultados de la modelación futura, al evaluar la red proyectada del sector Vela, se establece que la mayor frecuencia de presiones se encuentran entre 20 mca a 55mca, una presión máxima de 61.11 mca y una presión mínima de 14.78 mca, estos valores se encuentran dentro de los parámetro limites establecidos por la NB 689.

Gráfico 10. Frecuencia de presiones de la red futura



Fuente. Elaboración propia.

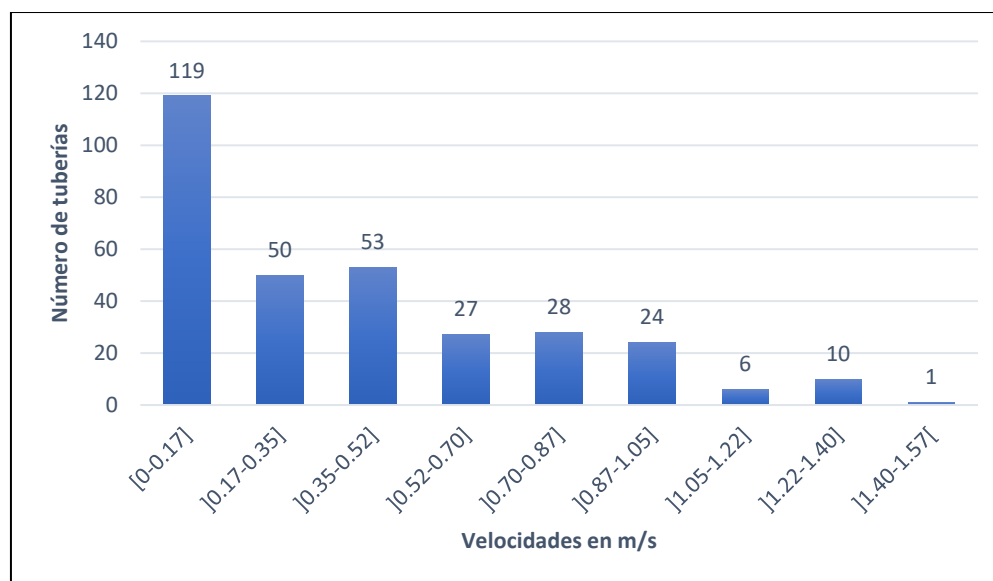
Tabla 39. Frecuencia de velocidades de la red futura

Intervalo de presión en m.c.a.	Clase	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa acumulada
(i)	(Xi)	(fi)	(hi)	(Fi)	(Hi)
[0-0.17]	0.09	119	37.42%	119	37.42
]0.17-0.35]	0.26	50	15.72%	169	53.14
]0.35-0.52]	0.44	53	16.67%	222	69.81
]0.52-0.70]	0.61	27	8.49%	249	78.3
]0.70-0.87]	0.79	28	8.81%	277	87.11
]0.87-1.05]	0.96	24	7.55%	301	94.65
]1.05-1.22]	1.14	6	1.89%	307	96.54
]1.22-1.40]	1.31	10	3.14%	317	99.54
]1.40-1.57[	1.49	1	0.31%	318	100

Fuente. Elaboración propia.

Al evaluar los resultados de la velocidades en la tuberías, se observa que más de un 50% se encuentran por encima de los 0.30 m/s, es un porcentaje muy satisfactorio, porque a medida que aumento las demandas, las presiones y las velocidades van estabilizándose.

Gráfico 11. Frecuencia de presiones de la red futura

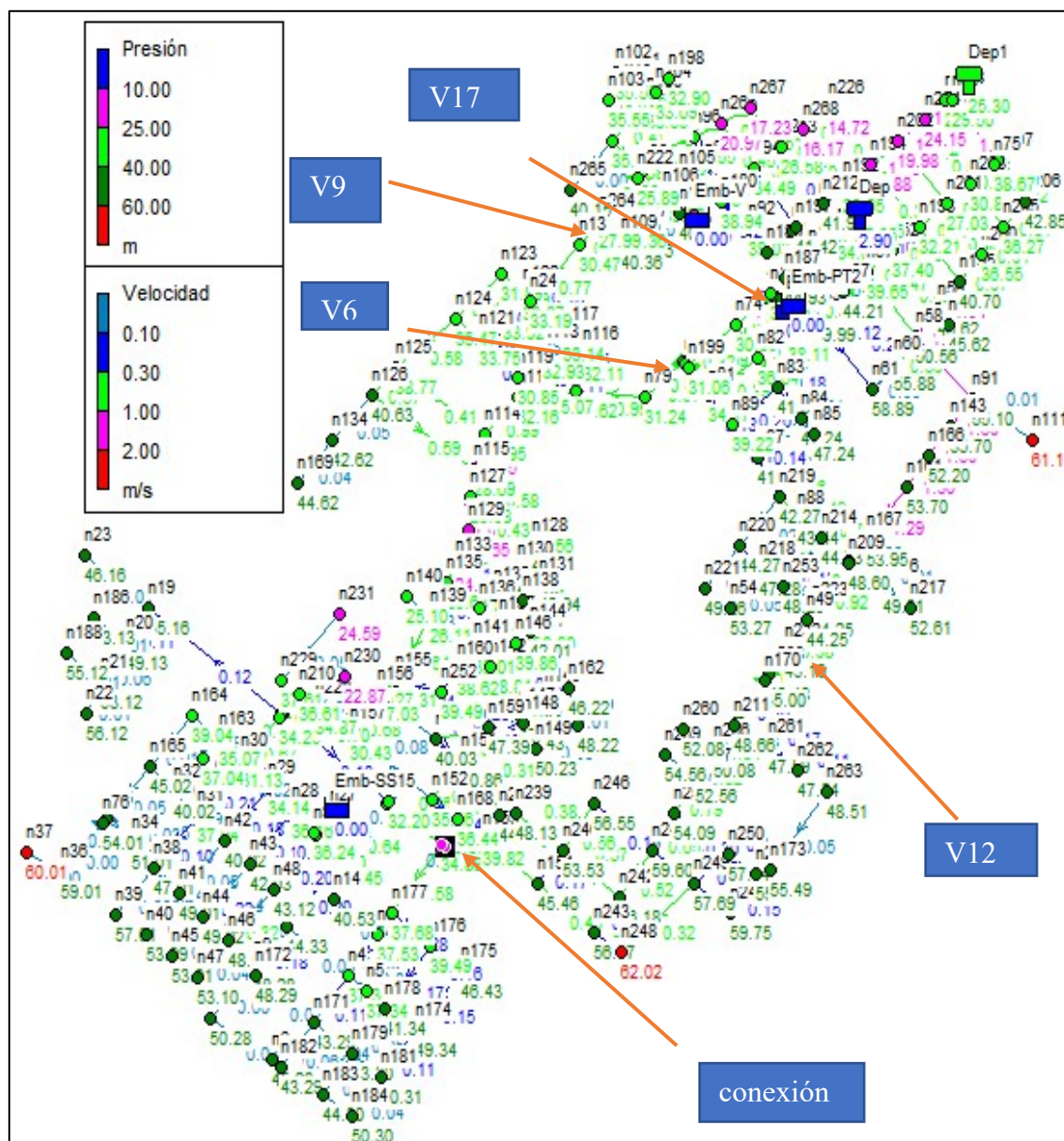


Fuente. Elaboración propia.

Para que el modelo futuro propuesto tenga un funcionamiento óptimo, es necesario la instalación de dos nuevas válvulas especiales en la red, además de las ya instaladas anteriormente, dos válvulas de regulación de caudal en los nodos: V17 en nodos n98-n264 y V9 en nodos n69-n72, también se conectó a la red San Salvador dos tuberías p315 a los nodos n168-n2 y p314 a los nodos n210-n16, el Pozo San Salvador cumplió su ciclo de vida útil y no tiene la capacidad de abastecer las demandas proyectadas.

Al analizar los resultados de la modelación futura, nos demuestra que con el paso del tiempo y al aumento de demandas, se logra estabilizar las velocidades en gran parte de las tuberías y las presiones en los nudos, la perspectiva de la red de agua potable en sector Vela es mucho mejor logrando un óptimo funcionamiento hidráulico.

Figura 61. Modelación de la red al año 2040 (EPANET)



Fuente. Modelo EPANET.

La modelación futura de la red en periodo estático, permitió evaluar el comportamiento hidráulico del sector Vela, observando todos los parámetros que establece en la NB 689.

6. CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Con la modelación inicial mediante el software EPANET, se evaluó el comportamiento hidráulico de la red de agua potable del sector Vela
- La red de agua potable actual en el b/San Salvador está operando con caudales similares a los demandados por los usuarios.
- El aforo realizado en el pozo San Salvador, determinó un valor de caudal medio de 5.50 l/s y en comparación con los caudales demandados actuales de 5.49 l/s (determinados con base a la caracterización de la demanda), se puede aseverar que se tiene control y se extrayendo el caudal necesario.
- La Urb. Vela opera con caudales superiores a lo que se extrae del pozo, el aforo realizado tiene un valor de caudal medio de 2.72 l/s, en comparación con los caudales demandados actuales de 5.66 l/s (determinados con base de la caracterización de la demanda).
- La comparación de los resultados obtenidos de la modelación hidráulica en EPANET, con la resolución manual de los métodos tradicionales, permitió comprobar que las presiones y velocidades de toda la red son similares.
- Actualmente la red de agua potable en el B/ San Salvador, está funcionando óptimamente.
- Las tuberías de la red en el sector Vela, están sobredimensionadas, no se encuentran en armonía con el caudal que demandan los usuarios.
- No hay un control exhaustivo de las presiones en la red de San Salvador, se observa presiones mayores a 60 mca, esto provocaría daños a los componentes de la red.

- Las presiones en la red de la Urb. Vela se encuentran dentro de los rangos establecidos por la norma boliviana.
- El tanque elevado colabora al pozo Vela con el abastecimiento, logrando cubrir la demanda que requiere toda la red de agua potable en la Urb. Vela.
- La totalidad de la red en el sector Vela, no cumple los valores óptimos de velocidad, como consecuencia de las altas presiones y diámetros superiores, se ubican en su mayoría por debajo de los 0.30 m/s, de modo que será insuficiente para el arrastre de sedimentos, generando colmatación de tuberías.
- Las válvulas reductoras de presión (VRP) propuestas en el modelo, son vitales en la red de San Salvador para controlar las sobrepresiones debido al relieve irregular que presenta el terreno, obteniendo presiones en toda la red entre 24mca a 54 mca.
- Se pudo valorar las cualidades de EPANET, para realizar modelaciones en distintos escenarios del funcionamiento hidráulico, como ser: roturas de tuberías, regulación del tanque elevado Vela, estados de carga de la red y modificación de diámetros en toda la red.
- Las roturas que se modelaron, no provocaron muchas afectaciones a la red, con respecto a las presiones, ni al suministro de agua a los usuarios.
- Con las modificaciones a los estados de carga de la red (50% a 150% del consumo total), se observó cómo funciona el modelo en caso de baja o alta demanda, determinando el comportamiento de las presiones en los nudos y las velocidades en las tuberías.

- Con la reducción de los diámetros en las tuberías, no se logró optimizar toda la red, debido a que los caudales que circulan en los ramales secundarios son demasiado bajos.
- Con la modelación en periodo extendido, se observó cómo es el comportamiento hidráulico de toda la red en un periodo de 6 horas.
- Con la propuesta del modelo hidráulico proyectado al año 2040, se obtuvo un funcionamiento óptimo.
- Al analizar los resultados de la modelación proyectada, se establece que a medida que pasa el tiempo y al aumento de demandas se logra estabilizar en la mayoría de los tramos las velocidades y presiones, la perspectiva de la red es mucho mejor.
- La instalación de las válvulas reguladoras de presión y caudal en los puntos estratégicos de la red proyectada, lograron optimizar toda la red de agua potable en sector Vela.
- La implementación de este trabajo tiene una gran utilidad, por su innovación de utilizar el software EPANET, inaccesible en las asignaturas cursadas.
- Se establece que el software es muy útil e importante para el análisis hidráulico de una red de abastecimiento de agua, por lo tanto, los conocimientos adquiridos tras la realización del trabajo serán de gran ayuda.
- Por lo tanto, se concluye que, en la presente investigación, la hipótesis fue confirmada.

En conclusión, en este proyecto se han logrado cumplir todos los objetivos marcados al inicio del mismo, consiguiendo modelar la red de distribución de agua potable del sector Vela.

6.2. RECOMENDACIONES

Con base al trabajo de ingeniería realizado, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda seguir actualizando el Modelo Hidráulico, en el caso de que las redes de distribución de agua potable se sigan ampliando o existan variaciones.
- En conjunto con el control de la cantidad de agua en la red, se debe controlar el incremento de la presión que será consecuencia de la reducción de caudal.
- Para que el funcionamiento de la red en el B/ San Salvador sea óptimo, se deberá implementar la válvula reguladora de presión, que debe ser colocada en lugares estratégicos, como se plantearon en la modelación en EPANET.
- Como el recurso hídrico es importante para la vida es urgente que la entidad que administra el agua potable, dedique presupuesto para la localización de nuevas fuentes para cubrir las demandas a futuro en la Urb. Vela.
- Al haber realizado el análisis del modelo en años futuros, se recomienda implementar las válvulas de control de presión y caudal que se plantearon en la modelación para tener un mejor funcionamiento en todo el sector Vela.
- Se recomienda el uso del software EPANET porque ha demostrado su eficiencia en la elaboración de modelos hidráulicos para eventos y situaciones adversas en las cuales la red de distribución ha respondido de la forma esperada, buscando soluciones o bien permitiendo detectar problemas. Esto permite tener respuestas rápidas antes de que ocurran dichos eventos y poder dar un mejor servicio a la población.

BIBLIOGRAFÍA

- Arnold Narváez S. A. (2016). *Análisis del sistema de agua potable Oscar Zamora mediante la modelación para verificar el funcionamiento actual y analizar la factibilidad de ampliación del mismo.*
- Arocha Ravelo, S.(1977). *Abastecimiento de agua. Caracas: Vega.*
- Borja S. M., (2012). *Metodología de la investigación científica para ingenieros*
- Cadena Ortiz Y. R., (2018). *Estimación de la dotación media diaria de agua potable y calibración de los coeficientes de caudal máximo diario (K1) y máximo horario (K2) para un área piloto dentro del barrio las Panosas-ciudad de Tarija.*
- Catastro Multifinalitario deTarija: <http://catastro-tarija.bo/mapas>
- Conagua, (2019), *Manual de agua potable, modelación hidráulica y en redes de agua potable.*
- COSAALT Ltda. (2017). *Información de la gestión Institucional. Obtenido de ANESAPA:*
<http://www.anesapa.org/empresas-socias/cosaalt/>
- Castillo Monge A. D., (2017). *Modelacion hidraulica del sistema de agua potable de la ciudad de la Concordia, Canton La Conocordia, Provincia De Santo Domingo.*
- De Plaza Solórzano J. S., (2017). *Ejercicios basicos de mecanica de fluidos e hidraulica aplicados a traves del software de distribucion gratuita EPANET 2.0.*
- Dirección Nacional de Saneamiento Básico, (2011). *Reglamento Nacional de Instalaciones Sanitarias domiciliarias.*
- Guías Normas APA 7° edición. <https://normas-apa.org/>
- Instituto Nacional de Estadística. (febrero de 2015). *Características de la Población. Obtenido de Censo de Población y Vivienda 2012 BOLIVIA:*
- Ministerio de Servicios y Obras Públicas, (2004). *Reglamentos técnicos de diseño para sistemas de Agua potable (NB-689).*

- Niño Rojas Victor M., (2011). *Metodología de la Investigación, diseño y ejecución*.
- Objetivos de Desarrollo Sostenible, (2015). *Objetivo N° 6: Garantiza la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos*.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Plan maestro integral de agua y saneamiento del valle central de Tarija- Bolivia, (2015). *Estudio de identificación N° 1 mejoramiento y ampliación del sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Tarija*.
- Pérez M., (2017). *MODELACIÓN DEL SISTEMA DE ABASTO DE AGUA POTABLE SANTA MARTA-VARADERO EMPLEANDO EL SOFTWARE EPANET 2.0VE*
- Pérez Suárez N., (2017). *Modelación del sistema de abasto de agua potable Santa Marta empleando el software Epanet*.
- Pérez, R., et al. (2004). *Análisis del comportamiento hidráulico de la red de abastecimiento de la ciudad de Córdoba mediante EPANET*.
- Red de distribución de agua potable abierta o cerrada, (2013).
<http://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/red-de-distribucion-de-agua-potable-abierta-o-cerrada/>
- Rocha Felices, A. (2007). *Hidráulica de tuberías y Canales. Perú*.
- Rojas Llanos A. M., Meneses Toro D., (2017). *Actualización del catastro y evaluación de la red matriz del acueducto veredal Arvudea en Acacías, Meta*.
- Rossman L. A. (2017). *EPANET 2 MANUAL DEL USUARIO*.
- Goñi Ortiz S., (2017). *Diseño y optimización de la red de abastecimiento del municipio de Beire*.
- Sotelo Ávila G., (1996). *Hidráulica General, Volumen 1-Fundamentos*.