Lenguaje de Programación (Python) y Software de diseño (Epanet) para la Modelación y Simulación de Redes de Distribución de Agua Potable

Yeimy Paola Ramírez Torres

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniera Civil

Director
Diego Iván Sánchez Tapiero
Ingeniero Civil

Codirector 1
Julio Isaac Maldonado
M. Sc. Ingeniero Ambiental

Codirector 2
Manuel Antonio Contreras
M. Sc. Ingeniero Ambiental

Universidad de Pamplona
Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Civil Ambiental y Química
Programa de Ingeniería Civil
Pamplona, Norte de Santander
2019

Dedicatoria

A Él que no se ve, El que no se oye, pero a ***Él, Él, y Él****.*

A mi madre Yamileth Torres, pues ella es el motivo más hermoso por el cual luchar cada día para ser una excelente persona y profesional, por su tiempo, su esfuerzo, y apoyo brindado, ¡ÉL la sabrá recompensar!

A mis hermanos Andrés, Camila, y Catalina por llenarme de amor, compresión y por hacer tantos sacrificios para que yo estuviera siempre lo mejor posible, todo mi amor es para ellos.

Agradecimientos

Al amor de mi vida, la incondicional, la mejor, mi madre quien siempre ha estado al pendiente y al cuidado de mi salud fortaleciéndome y recordándome día a día la “Berraquera”, esa que por ser “Opita como la cholupa” llevo impregnada en mi ser.

A mi tía y madrina Yineth Ramírez, por ser un apoyo absoluto no solo durante mi proceso académico sino durante toda mi vida, no por nada las mejores tías son promovidas a madrinas.

Al ingeniero Diego Iván Sánchez, por ser mi guía y motivador desde el principio de este proceso quien contribuyó verdadera y significativamente en el desarrollo de este trabajo sin su apoyo esto no hubiese sido posible.

A los ingenieros Manuel Contreras y Víctor Verjel por su entera disposición e interés hacia mí con especial cariño y compresión apoyándome durante este proceso académico.

A la Universidad de Pamplona, a mis profesores y compañeros por acogerme y convertirme en una profesional en lo que con tanto esfuerzo y dedicación siempre anhele.

A Dios, que muchas veces figura ser el último como en esta ocasión, pero sin su ayuda nada de lo que soy sería.

¡¡¡gracias, gracias y gracias!!!

Tabla de Contenido

Pág.

INTRODUCCIÓN 13

1. OBJETIVOS 15
1.1 Objetivo General 15

1.2 Objetivos Específicos 15

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO 16

3. MARCO REFERENCIAL 17
3.1 Marco teórico 17

3.1.1 Red de distribución de agua. 18

3.1.2 Epanet. 19

3.1.2.1 Nodos. 20

3.1.2.2 Tuberías 21

3.1.3 Python. 21

3.1.4 Patrón de demanda. 22

3.1.5 Válvula reductora de Presión (VRP) 22

3.1.6 Consigna. 23

3.1.8 Epanettools. 23

3.1.9 IDLE (Integrated DeveLopment Environment for Python). 23

3.2 Estado del arte 23

3.3 Marco Legal 27

3.3.1 Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. . 27

3.3.2 Resolución No. 0330 de 8 de junio de 2017. 27

4.MÉTODOLOGIA 29
4.1 Trazado de la Red 29

4.2 Simulación de la Red de distribución en Epanet 29

4.2.1 Asignación de propiedades de las conexiones y conductos de la red 32

4.2.1.1 Caudal de diseño 33

4.2.1.2 Demanda Base en la Red De Distribución. 36

4.2.1.3. Asignación de la demanda base de cada nodo. 37

4.2.1.4. Asignación de propiedades a cada tubería. 37

4.3 Simulación de la Red de distribución combinado Python y Epanet 39

4.3.1 Enlace entre Python y Epanet. 39

4.3.2 Algoritmos en el IDLE de Python. 41

5. RESULTADOS 45
5.1 Trazado de la Red 45

5.2 Simulación de la Red de distribución en Epanet 46

5.2.1 Asignación de propiedades de las conexiones y conductos de la red. 47

5.2.1.1 Caudal de diseño. 47

5.2.1.2 Demanda Base en la Red De Distribución. 47

5.3 Diseño de la red Combinando Python y Epanet 54

6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS 59
6.1 Ingreso de datos 59

6.2 Visualizacion de Resultados 61

6.3 Adecuación a la Normatividad Actual 66

6.4 Cantidad de Iteraciones 67

7. CONCLUSIONES 70

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 72

APÉNDICES 75

Lista de Tablas

Tabla 1. Datos patrón de consumo ingresado en Epanet. 32

Tabla 2. Cálculo de Población 33

Tabla 3. Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar 33

Tabla 4. Caudal de diseño 34

Tabla 5. Resultados Caudal de Diseño 47

Tabla 6. Comparación tiempo de iteraciones 68

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo de pérdidas por fricción. 30

Ecuación 2. Perdidas por accesorios 31

Ecuación 3. Dotación bruta 34

Ecuación 4. Caudal medio diario. 35

Ecuación 5. Caudal máximo diario 35

Ecuación 6. Caudal máximo horario 36

Ecuación 7. Caudal de consumo en el nodo 37

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1.Localización geográfica de la zona de estudio 16

Ilustración 2. Datos iniciales opciones de hidráulicas 30

Ilustración 3. Datos iniciales opciones de tiempo..... 31

Ilustración 4.Curva de consumo horaria 32

Ilustración 5.Características de los nodos 37

Ilustración 6.Características de las tuberías 38

Ilustración 7. Propiedades válvula reductora de presión 39

Ilustración 8. IDLE de Python, importación de Epanettools y ruta. 40

Ilustración 9. Variable para guardar las conexiones y conductos de la red. 40

Ilustración 10. Variables del almacenamiento de atributos 41

Ilustración 11. Asignación de diámetros iniciales desde el IDLE de Python 42

Ilustración 12. Asignación patrón de demanda..... 43

Ilustración 13. Algoritmo de nodos con presiones negativas en la red..... 44

Ilustración 14. Algoritmo para hallar presiones en los nodos de la red 44

Ilustración 15. Trazado de la Red ejemplo 45

Ilustración 16. Trazado de red de diseño exportada a Epanet..... 46

Ilustración 17. Áreas de influencia a cada nodo..... 48

Ilustración 18. Simulación número 1, diámetros de tuberías iniciales 80.42mm 49

Ilustración 19. Informe de estado de la red. 50

Ilustración 20. Cambio de diámetros de las tuberías 50

Ilustración 21. Simulación número 2, cambio de diámetros..... 51

Ilustración 22. Red final de distribución de agua potable..... 52

Ilustración 23. Diámetros finales de la red en Epanet 53

Ilustración 24. Nodos con Presiones negativas y presiones en los nodos..... 54

Ilustración 25. Primera iteración, presiones menores a 15 m.ca..... 55

Ilustración 26. Nodos con presiones menores o iguales a 10 m.c.a..... 56

Ilustración 27.Trazado de la red Epanet (identificación de tuberías) 57

Ilustración 28. Segunda iteración, presiones menores o iguales a 15 m.c.a 58

Ilustración 29.Ingreso de datos en Epanet (izquierda) y en el IDLE de Python (derecha)..... 60

Ilustración 30. Tiempo de ingreso de datos 60

Ilustración 31. Resultados comparativos primera iteración en Epanet(izquierda), y la primera iteración con el uso de Python con el vínculo a Epanet (derecha)..... 62

Ilustración 32. Contraste de visualización de presiones en los nodos de la red Epanet(izquierda), con el uso de la combinación Python-Epanet (derecha). 63

Ilustración 33. Patrón de consumo de la red 64

Ilustración 34. Caudal periodo extendido de la tubería 25 65

Ilustración 35. Normatividad aplicada en la combinación de Python y Epanet para el diseño de redes de distribución 67

Ilustración 36. Porcentajes de Iteraciones..... 68

Ilustración 37.Rediseño de la red..... 69

Lista de Apéndices

Apéndice 1. Áreas y demanda de cada nodo 75

Apéndice 2. Reporte de los nodos a las 6hrs hora más crítica periodo extendido 77

Apéndice 3 Conductos de la red a las 6hrs hora más crítica en un periodo extendido 80

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad la implementación de los softwares Python y Epanet con el fin de optimizar el tiempo de la simulación y modelación de una red de distribución de agua potable. Para este fin se realizó un análisis de diferentes factores que fueron significativos en el momento de la simulación, estableciendo soluciones que permitieron mejorar los tiempos de cálculos y asimismo obtener resultados importantes como nodos con presiones negativas, velocidades en las tuberías, comportamiento de la curva de consumo en un periodo extendido, entre otras propiedades hidráulicas de la red. Lo anterior se llevó a cabo por medio del aprendizaje del lenguaje de programación Python, con el objeto de efectuar su interfaz enlazándola por medio de algoritmos con Epanet, en consecuencia, se mejoraron los resultados que este nos ofrece debido a que el software de simulación es por excelencia un programa que proporciona un entorno integral, no obstante en la actualidad no consigue suplir en su totalidad las nuevas necesidades en la realización de simulaciones hidráulicas, este puede ser mejorado con el uso de lenguajes de programación disminuyendo el grado de incertidumbre logrando un diseño óptimo con significativas reducciones en el tiempo de diseño y análisis de resultados.

Abstract

The purpose of this research work is the implementation of Python and Epanet software in order to optimize the simulation and modeling time of a drinking water distribution network. For this purpose an analysis of different factors that were significant at the time of the simulation was carried out, establishing solutions that allowed to improve the calculation times and also to obtain important results such as nodes with negative pressures, velocities in the pipes, behaviour of the consumption curve in an extended period, among other hydraulic properties of the network. This was done by learning the programming language Python, in order to make its interface linking it through algorithms with Epanet, consequently, the results were improved that this offers us because the simulation software is par excellence a program that provides an integrated environment, however at present can not fully meet the new needs in the conduct of hydraulic simulations, this can be improved with the use of programming languages reducing the degree of uncertainty achieving an optimal design with significant reductions in design time and analysis of results.

Introducción

La simulación y modelación de los sistemas de redes de distribución de agua potable son un instrumento de gran relevancia en el estudio, diseño, y sin lugar a dudas es un pilar fundamental para la toma de decisiones y hoy por hoy es una práctica necesaria dentro de los proyectos modernos de la ingeniería civil, de ahí que se adelanten investigaciones que permitan optimizar la calidad y el tiempo de diseño de sistemas de distribución de agua potable por medio de algoritmos que describan sucesos importantes en la red mediante la implementación de lenguajes de programación y softwares de diseño, pero para aprovechar adecuadamente dichas herramientas es necesario mejorar el grado de funcionalidad que nos permita alcanzar mejores, certeros, y eficaces resultados considerando conceptos que permitan cumplir con la condiciones mínimas de diseño de redes de distribución de agua potable según la normatividad vigente.

En la ejecución de este proceso el diseñador se ve enfrentado a una serie de inconvenientes representados en un gran número de incógnitas que se despliegan, constituyendo un indudable grado de complejidad a la hora de alcanzar el diseño óptimo, económico, práctico teniendo en cuenta diferentes variables de gran importancia en el proyecto, es por eso que desde este escenario da motivo a la responsabilidad de los profesionales que intervienen en el diseño realicen una minuciosa planeación y modelación mediante la implementación de lenguajes de programación que usados en conjunto con softwares como Epanet reduzcan al máximo el rango de iteraciones e incertidumbres que se pueden encontrar a lo largo del diseño de redes hidráulicas, logrando así innovar y mejorar en cuanto a calidad, tiempo, materiales y economía de los proyectos.

Finalmente, es necesario mencionar que a través del paso del tiempo la eficiente instalación de redes de distribución de agua potable ha sido un indicador del nivel de progreso, modernidad y calidad de vida del ser humano y de igual manera es un sinónimo de satisfactorias prácticas de diseño ingenieril.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Combinar el lenguaje de programación (Python) y el software de diseño (Epanet) para la modelación y simulación de redes de distribución de agua potable.

1.2 Objetivos Específicos

Diseñar la red de distribución de agua potable a evaluar en el software Epanet cumpliendo con las condiciones mínimas de diseño según el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, 2016 y la resolución 0330 de 2017

Crear algoritmos a través de Python para ser combinados con Epanet en el diseño de redes de distribución de agua potable

Simular la red de distribución a partir de los algoritmos generados obteniendo las condiciones mínimas de diseño de una manera más rápida y sencilla

Evaluar por medio de comparaciones los resultados obtenidos entre una modelación en Epanet con y sin la implementación de algoritmos obtenidos en Python

2. Descripción de la Zona de Estudio

La red de ejemplo para el diseño es el asentamiento humano de José Bernal que se encuentra ubicado al noroccidente de la ciudad de Cúcuta, enmarcado en las coordenadas 7°55’56.89” latitud Norte y 72°31’43.30” longitud Oeste del Meridiano de Greenwich, a una altura promedio de 275 msnm.

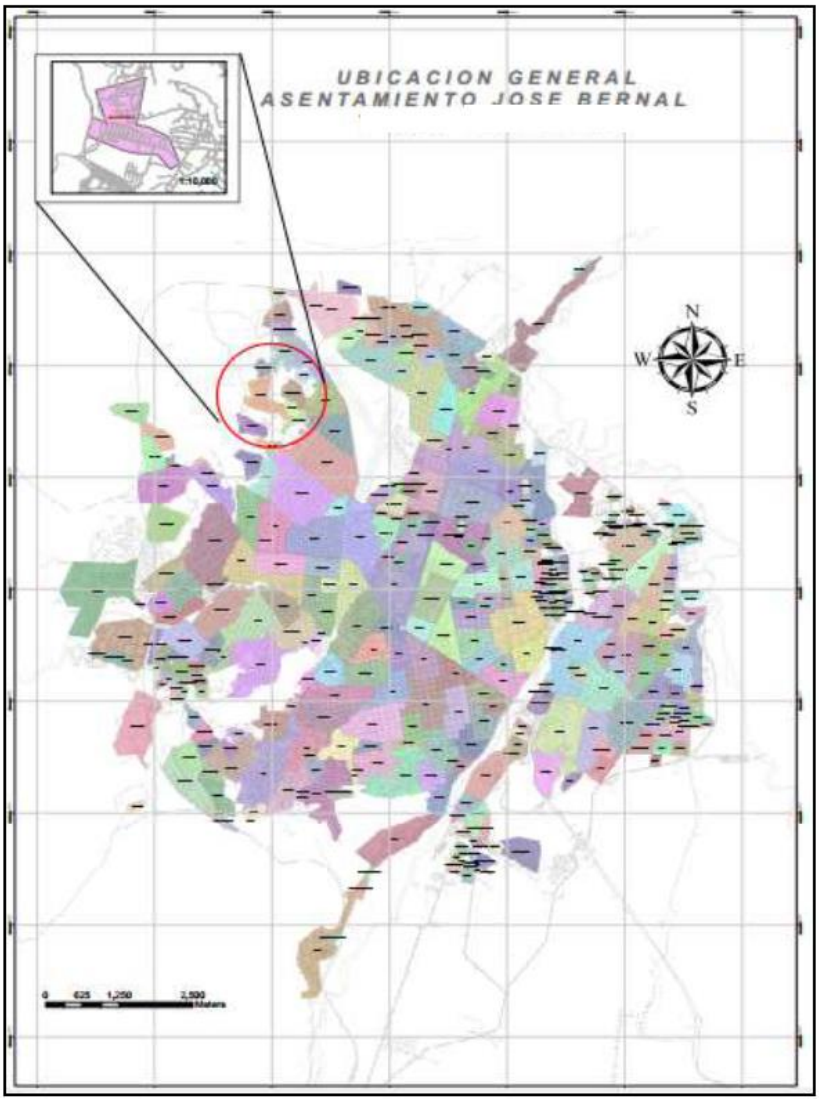


*Ilustración 1.*Localización geográfica de la zona de estudio
Fuente: (Sanchéz, 2017, pág. 18)

3. Marco Referencial

3.1 Marco teórico

El nivel de vida que caracteriza a una población está ligado, en gran parte, al agua. Las condiciones de presión y calidad del suministro varían en el espacio y en el tiempo. Los consumos de polígonos industriales son ampliamente diferentes de los de una zona residencial. Este problema de dos variables, espacial y temporal, sólo puede abordarse mediante procedimiento informáticos. Factores como el crecimiento poblacional y el desarrollo industrial influyen en la dinámica de crecimiento de la red de abastecimiento de una población. Las consecuencias de estas variaciones deben poder preverse con el objetivo de implantar las soluciones técnicas necesarias a tiempo a fin de que la demanda quede satisfecha. El compromiso de hacer llegar el producto a cada toma bajo unos requisitos mínimos de presión y calidad nos obliga a estudiar todas y cada una de las posibles eventualidades que puedan acontecer, (Alcaraz, 2006).

Desde principios de la década de los ochenta, el uso de la modelación y de simulación dentro de los proyectos de ingeniería se han hecho extensivos considerablemente. Esto se debe, entre otras cosas, al desarrollo exponencial de los soportes físicos que han permitido generar aplicaciones relativamente complejas, (Chocat, 1997). De ahí que los soportes de modelación representan un laboratorio “virtual” dentro del cual existen condiciones que deben ser controladas para que los resultados esperados tengan, en gran medida, errores mínimos, (Chocat *et al.*, 1999). Sin duda la modelación en la ingeniería hidráulica, es una herramienta básica para la elaboración de proyectos de desarrollo tecnológico, investigación y diseño.

Es importante destacar que la modelación hidráulica aumenta la confiabilidad de las estructuras proyectadas, esto significa que los diseños se ajustan más a las solicitaciones reales,

lo cual tiene un importante impacto económico. Por un lado, se disminuye el riesgo de diseñar una obra poco resistente que colapse fácilmente con las consecuentes pérdidas económicas o lo que es peor, en vidas humanas; mientras que por otro lado también se reduce la posibilidad de un diseño sobredimensionado que requiera de inversiones innecesarias. En otras palabras, la modelación hidráulica constituye una importante herramienta de optimización para el diseño de obras hidráulicas más que un simple cálculo teórico, (Ortiz, 2017).

3.1.1 Red de distribución de agua.

Es un sistema que permite recoger el agua de un sitio de captación o varios y transportarla hasta diversos puntos donde se encuentran los usuarios de la red de abastecimiento. (Corrales, 2018, p.11). por consiguiente la optimización del proceso de distribución es fundamental por todas las partes interesadas, ya que estamos mejorando por una parte el producto que se ofrece y por otra intentamos trabajar en un punto de rendimiento eficiente para la entidad que se dedica a su distribución. Cuenta con un conjunto de elementos interconectados que conducen el agua desde los puntos de alimentación a los de consumo, manteniendo unas condiciones cuantitativas y cualitativas óptimas. La topología del sistema da lugar a los siguientes tipos de redes:

Ramificadas: de forma arborescente, se caracterizan porque el agua tiene un único trayecto desde el punto de abastecimiento al punto de consumo. Es el caso de las redes de regadío. Para conocer el caudal que circula por una línea sólo es necesario aplicar la ecuación de continuidad en cada nudo, junto con la ecuación de la energía. Éstas pueden resultar poco compensadas, obteniéndose la solución a través de un cálculo directo, ya que en los puntos más alejados de la red las presiones son menores. También presentan problemas de calidad al estancarse el agua.

Malladas: están compuestas por circuitos cerrados formados por varias líneas. Nos ofrecen mayor garantía que las redes ramificadas, ya que el agua tiene distintos caminos para llegar al punto de consumo. Así mismo las presiones tienden a auto equilibrarse sin necesidad de infraestructuras. No pueden calcularse únicamente mediante la ecuación de continuidad, de modo que la determinación de caudales es más compleja, lo que hace imprescindible tenerlas modelizadas.

Mixtas: son las más comunes. Presentan mallas conectando las arterias principales y ramificaciones en las tuberías secundarias que llevan el agua al consumidor.

También es determinante la temporalidad a la hora de la modelación:

Simulación en periodo simple: los consumos en nudos, la piezometría y las características de los elementos de regulación no sufren alteraciones a lo largo del tiempo.

Simulación en periodo extendido: la variable tiempo se considera explícitamente. En todo caso considera que los tiempos de maniobra son muy superiores a los tiempos de viaje de las ondas de forma que no existe golpe de ariete.

3.1.2 Epanet.

Es un software de ordenador que realiza simulaciones en periodos prolongados del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de suministro a presión, ha sido desarrollado por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de EEUU (USEPA) la primera revisión oficial de la versión 2.0 fue lanzada en el año 2000, y distribuida libremente desde la página web de la agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos .Una red puede estar constituida por tuberías, nudos (uniones entre tuberías), bombas, válvulas y depósitos de almacenamiento o embalses. 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. (Alcaraz, 2006, p.5).

Epanet realiza simulaciones en período extendido del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de distribución a presión (Rossman, 2000). La metodología utilizada por el software calcula los caudales en las tuberías y alturas piezométricas en los nudos bajo la consideración de conservación de masa y energía. Las ecuaciones que se generan en el proceso son conocidas por su no linealidad, por lo cual se hace uso del método del gradiente para su solución (Todini, 1987). Epanet contiene un simulador hidráulico muy avanzado y una de sus grandes ventajas es que no existe límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesarse, los métodos de cómputo de las pérdidas de carga pueden calcularse mediante las fórmulas de Hazen Williams, de Darcy-Weisbach o de Chezy-Manning además de lo anterior contempla también las pérdidas menores en codos, accesorios, así mismo admite bombas de velocidad fija o variable, permite considerar varios tipos de válvulas, tales como válvulas de corte, de retención, y reguladoras de presión o caudal, permite considerar diferentes tipos de demanda en los nudos, cada uno con su propia curva de modulación en el tiempo. (Manual del Usuario Versión 2.00.12, 2017).

De esta manera, Epanet ofrece diversas opciones para visualización de resultados como lo son los reportes tabulares, perfiles, gráficos de variación en función del tiempo observaciones y selección por color de los resultados obtenidos.

3.1.2.1 Nodos.

Son elementos físicos utilizados para unir las tuberías. Los nodos o uniones sirven también como punto hidráulico de extracción o inyección de agua en la red. Para dibujar un

tramo de tubería es indispensable el uso de las conexiones o embalses; si se requiere dibujar una tubería simple, se introduce un nudo fuente (embalse) que funciona como punto inicial y luego se coloca un nudo final (conexión) o un embalse. (Solórzano, 2017).

3.1.2.2 Tuberías.

Son elementos que permiten el transporte de agua en una red dada. Para el caso de Epanet, las tuberías se encuentran siempre a presión y la dirección del flujo obedece al principio del gradiente hidráulico; por lo tanto, el agua se mueve de un punto de mayor a menor energía. (Solórzano, 2017).

3.1.3 Python.

Es un lenguaje de programación de computadoras que nació en 1991 y que ha ido ganando adeptos por dos razones principales. La primera es que es un lenguaje de alto nivel muy fácil de usar y la segunda es que es de código libre.

Una de las grandes ventajas de Python es que es independiente de la plataforma que se use, ya sea Windows, Mac o Unix. Los programas escritos en una plataforma corren en las otras plataformas. El único requisito es que haya sido realizado en la misma versión. Python tiene disponible una biblioteca estándar que le da al usuario a una gran cantidad de funciones para escribir código fuente muy simple pero poderoso.

La filosofía de la base de Python se resume en el documento PEP 20, llamado el Zen de Python. Las siguiente son las primeras líneas de este documento, para tener una idea de la filosofía de la base:

“Bello es mejor que feo

Explícito es mejor que implícito

Lo simple es mejor que lo complejo

Complejo es mejor que complicado

La legibilidad cuenta" (D. Steffelbauer, 2015).

De ahí que sea un lenguaje fácil de aprender con una amplia gama de paquetes adicionales para múltiples tareas. En 2013, Python fue el de más rápido en crecimiento de softwares programación en referencia a la PYPL (popularidad del lenguaje de programación); índice de hoy en día, con una cuota del 10,9% en todo el mundo y continúa creciendo. (D. Steffelbauer, 2015).

3.1.4 Patrón de demanda.

Se utiliza para variar el comportamiento de los caudales de demanda en las conexiones o nudos en función del tiempo. A esta particularidad se le conoce con el nombre de simulación en período extendido; según (Solórzano, 2017) el período extendido es el caso de un modelo real para una red de acueducto, dado que la población que es abastecida tiende a tener diferentes demandas en el día.

3.1.5 Válvula reductora de Presión (VRP).

La PRV limita la presión en un punto de la red, sobre un tramo de tubería. Epanet establece tres formas de operación:

Parcialmente abierta (es decir, activa) para mantener una presión aguas abajo, siempre y cuando la presión aguas arriba sea superior a ésta.

Totalmente abierta, cuando la presión aguas arriba está por debajo de la especificada en la propiedad.

Cerrada, si la presión aguas abajo es superior a la presión aguas arriba, para impedir el flujo inverso. Se deben tener en cuenta dos aspectos para la modelación de PRV: no se puede conectar una PRV directamente a un depósito o tanque (se puede utilizar una tubería para

separarlos), y adicionalmente una PRV no puede compartir la misma conexión o conectarse en serie.

3.1.6 Consigna.

Es el parámetro a controlar con un tipo de válvula totalmente abierta, es la presión, razón por la cual en la propiedad *Consigna* se debe introducir la presión deseada en la conexión o nudo aguas abajo de la válvula.

3.1.8 Epanettools.

Es una biblioteca de Python que permite al usuario llamar a todas las funciones del kit de herramientas de programadores de Epanet dentro de los scripts de Python. (Marco, 2019). Además, es uno de los principales puntos fuertes de Python por tratarse de una librería estándar que proporciona herramientas adecuadas para varias tareas. Esto se describe como su filosofía de "incluidas las baterías" (D. Steffelbauer, 2015, pág. 3).

3.1.9 IDLE (Integrated DeveLopment Environment for Python).

Es un entorno gráfico de desarrollo elemental que permite editar y ejecutar programas en Python, también es un entorno interactivo en el que se pueden ejecutar instrucciones sueltas de Python. En Windows, IDLE se distribuye junto con el intérprete de Python, es decir, al instalarlo en Windows también se instala IDLE. (Marco, 2019).

3.2 Estado del arte

Shoujun Zhoua, 2017, implementó Matlab para desarrollar una nueva plataforma de simulación hidráulica para la construcción de multifuentes y multianillo redes experimentales

basada en la teoría y el método de modelado de simulación. En combinación con el sistema de monitorización en línea de redes experimentales, la plataforma de simulación podía leer datos de operación en tiempo real, además fue diseñada con una estructura simple, interfaz fácil de usar con accesibilidad para promover una mayor investigación eficaz sobre las condiciones hidráulicas de las redes de calefacción de múltiples fuentes.

A. Ayad, 2013, utilizó la teoría de gráficos lineales tanto para el estado estacionario, como para el de simulación de períodos prolongados en una red de tuberías que incluye sus componentes hidráulicos (bombas, válvulas, uniones), introduciendo un método de cálculo de los flujos actualizados que mejore el tipo de convergencia. Se analizan las redes reales, para comprobar la fiabilidad del método propuesto, los resultados revelan el mejor rendimiento del método propuesto.

P. Skworcowa, 2013, considera la optimización de los programas de bombas y válvulas en redes complejas de distribución de agua a gran escala (RMD). El modelo de optimización se genera automáticamente en lenguaje GAMS a partir de un modelo hidráulico en formato Epanet y de datos adicionales, que describan las limitaciones operativas, las tarifas eléctricas y las configuraciones de las estaciones de bombeo. El documento describe cómo cada uno de los sistemas hidráulicos se modela con el fin de reducir el tamaño del problema, el modelo hidráulico completo se simplifica mediante la reducción de módulos, manteniendo las características no lineales del modelo. Posteriormente, un solucionador de programación no lineal CONOPT se utiliza para resolver el modelo de optimización. El enfoque propuesto se probó con un modelo de RMD a gran escala proporcionado en Epanet. La RMD incluye estructuras complejas e interacciones entre estaciones de bombeo para la solución de varios

escenarios considerando diferentes horizontes, etapas de tiempo, limitaciones operativas y cambios topológicos demostrando la capacidad del enfoque generando y resolviendo automáticamente problemas de optimización para una gran variedad de necesidades.

Villagrán, C. (2018), desarrolló de modelos dinámicos de redes de agua a partir del paquete de simulación Epanet y posteriormente usó para la optimización de la operación en el entorno de desarrollo Python, justificando su libre distribución y eficacia**.**

Tiago Luna, 2018, presenta un método híbrido de optimización para mejorar la eficiencia energética de un suministro de agua, hacia una gestión más sostenible del agua en relación con el nexo agua-energía, se utilizó para optimizar el programa de bombeo durante el día para así conocer el consumo de agua a priori, definiendo el estado óptimo de la bomba para un periodo de tiempo específico (por ejemplo, cada 1 h), minimizando así los costes de explotación, así como el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono asociadas. La red de agua desarrollada fue simulada en Epanet la cual se utilizó para evaluar las soluciones teniendo en cuenta todas las restricciones físicas del sistema de suministro de agua (por ejemplo, los cumplimientos hidráulicos) y la demanda de agua adecuada para cada solución, incluyendo los límites de nivel de los tanques de almacenamiento de agua. A partir de las soluciones obtenidas, se concluye que la optimización de la programación de la bomba puede mejorar la eficiencia energética hasta un 15% en promedio (máximo del 25%) en comparación con la operación real, demostrando que se pueden utilizar herramientas digitales para optimizar el sistema con una inversión mínima en equipo o intervención física, aunque las soluciones óptimas dependen de la disponibilidad de agua y la demanda de agua.

(Ernesto Arandia, 2018)**,** efectúa el software Epanet para el modelado de redes de tuberías y análisis de sistemas de agua. llevando a cabo una comunicación que describe como epanet2toolkit, un paquete para acceder al motor de simulación de Epanet, y su interfaz de programación de aplicaciones del entorno R para informática y gráficos. El paquete puede ejecutar simulaciones de períodos prolongados de hidráulica y calidad del agua o crear aplicaciones personalizadas utilizando la función las capacidades de exploración, visualización y análisis de datos de R, epanet2toolkit permite el uso interactivo de software de diseño en una variedad de plataformas informáticas, proporcionando una comprobación de errores integrada y aportando una prueba disponible al público suite. El paquete está disponible a través de Comprehensive R Archive Network y GitHub.com.

Steffelbauera, Fuchs-Hanuscha. (2015), realizaron una introducción de Epanet orientado a objetos basado en Python (OOPNET) con el fin de abordar a los ingenieros de agua que podrían ser no tan familiarizados con complejos lenguajes de programación como C ++ o Java, con archivos de entrada convirtiéndolos a la estructura orientada a objetos de OOPNET manipulado y simulado con prescripción de Epanet interfaz de línea a través de Python.

Katherine A. Klise, 2017, desarrolló Network Tool for Resilience (WNTR) un paquete de código abierto Python™ diseñado para, simular los efectos de un terremoto en un sistema de distribución de agua. El estudio ilustra que la gravedad de los daños no sólo depende de la integridad del sistema y de la magnitud de los terremotos, sino que además de los recursos disponibles y las estrategias de reparación utilizadas para devolver el sistema a las condiciones normales de funcionamiento. Si bien los terremotos son particularmente preocupantes, ya que las

tuberías de distribución de agua enterradas son muy resistentes puede ser susceptibles de sufrir daños, el marco del software puede aplicarse a otros tipos de peligros, incluida la alimentación eléctrica, apagones e incidentes de contaminación.

3.3 Marco Legal

3.3.1 Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS.

Su propósito es fijar los criterios básicos, los requisitos mínimos y los valores específicos y límites que deben tenerse en cuenta en los diferentes procesos involucrados en la conceptualización, el diseño, la construcción, la supervisión técnica, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento de los sistemas de acueducto que se desarrollen en la República de Colombia, con el fin de garantizar su seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad técnica, eficiencia de operación, sostenibilidad y redundancia, dentro de un nivel de complejidad del sistema determinado. (RAS, 2016).

Cada uno de los títulos es un manual de prácticas de buena ingeniería que recoge el interés general del sector por lograr un acercamiento a las circunstancias reales del país, instaurando los criterios y recomendaciones para el diseño, construcción, supervisión técnica, interventoría, operación y mantenimiento propios de los sistemas de Agua potable y Saneamiento básico.

3.3.2 Resolución No. 0330 de 8 de junio de 2017.

“Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y

Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de2001, 0668 de 2003,1459 de 2005, 1147 de 2005 y 2320 de 2009".

Reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de planeación, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y continua la Resolución: "Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009".

Aplica para los prestadores de servicio públicos de acueducto, alcantarillado y aseo, a las entidades formuladoras de proyectos de inversión en el sector, a los entes de vigilancia y control, a las entidades territoriales y las demás funciones en el sector de agua potable y saneamiento básico, en el marco de la 142 de 1994. Así como a los diseñadores, constructores, interventores, operadores, entidades o personas contratantes que elabores o adelanten diseños, ejecución de obras, operen y mantengan obras, instalaciones o sistemas propios del sector de agua y saneamiento básico.

4.Métodologia

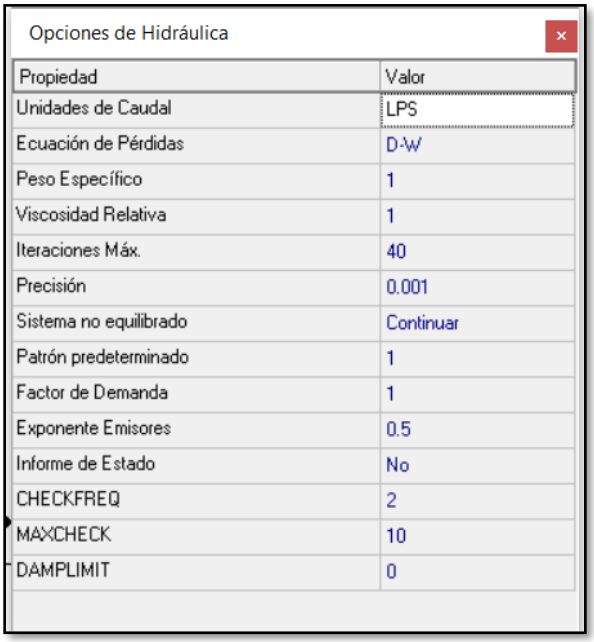
4.1 Trazado de la Red

El trazado de la red ejemplo del proyecto para la simulación y modelación fue suministrado por el ingeniero Diego Iván Sánchez en formato AutoCAD, dicha red corresponde al asentamiento humano José Bernal que se encuentra ubicado al noroccidente de la ciudad de Cúcuta en el que se tuvo en cuenta para el diseño los parámetros establecidos en la resolución 0330 del 8 de junio de 2017, específicamente el artículo 59 (localización de redes de acueducto) y el plano urbanístico obtenido de la topografía, este contiene sus respectivos accesorios, cuenta con verificaciones como lo son la distancia mínima horizontal de separación entre la línea de paramento y la red, además se realizó el control la profundidad mínima establecida por el RAS 2016 a cota clave de la tubería, asimismo se chequearon los perfiles de las vías derivados de la topografía realizada.

4.2 Simulación de la Red de distribución en Epanet

Para realizar la simulación en Epanet se usó EpaCAD que es un programa gratuito que permite convertir de forma sencilla ficheros que contenga una red de AutoCAD, en un fichero interpretable por Epanet. En este proceso, EpaCAD es capaz de reconocer de forma automática las principales propiedades de los elementos, creando las tuberías y los nodos con dimensiones reales. Posteriormente el archivo es guardado en el formato .net de Epanet.

Continuo a la articulación de la red, se procede a establecer las opciones hidráulicas en Epanet, como lo son la ecuación de pérdidas del sistema y el periodo extendido de un día tal como se enseña en las ilustraciones 2 y 3.



Opciones de Hidráulica

Propiedad	Valor
Unidades de Caudal	LPS
Ecuación de Pérdidas	D-W
Peso Específico	1
Viscosidad Relativa	1
Iteraciones Máx.	40
Precisión	0.001
Sistema no equilibrado	Continuar
Patrón predeterminado	1
Factor de Demanda	1
Exponente Emisores	0.5
Informe de Estado	No
CHECKFREQ	2
MAXCHECK	10
DAMPLIMIT	0

Ilustración 2. Datos iniciales opciones de hidráulicas

La ecuación para el cálculo de las perdidas por fricción manejada fue la de Darcy Weisbach (1875), establecida en el programa cuando se hizo la configuración de las opciones generales en el sistema.

$$\boldsymbol{hf = f\frac{l}{D} * \frac{V^2}{2g}}$$

Ecuación 1. Cálculo de pérdidas por fricción.

hf: Perdidas de fricción en la tubería en m.

V: Velocidad de flujo en la tubería m/s.

L: longitud de la tubería en (m)

D: Diámetro interno real

$V_2/2g$: Perdida de Carga

F: Coeficiente de fricción de Darcy Weisbach.

Perdidas por accesorios:

$$\boldsymbol{hfacc = \sum k * \frac{V^2}{2g}}$$

Ecuación 2. Perdidas por accesorios

hfacc: Pérdidas de fricción en accesorios (m)

$V_2/2g$: Carga de velocidad

ΣK: Coeficiente de pérdidas en accesorios.

Opciones de Tiempo

Propiedad	Hrs:Min
Duración Total	24:00
Intervalo Cálculo Hidráulico	1:00
Intervalo Cálculo Calidad	0:05
Intervalo Patrones	1:00
Tiempo Inicio Patrón	0:00
Intervalo Informe	1:00
Tiempo Inicio Informe	0:00
Tiempo Inicio Reloj	12:00 am
Estadística	NONE

Ilustración 3. Datos iniciales opciones de tiempo

Seguidamente se fijó al software la curva de consumo horaria suministrada por la empresa Aguas Kpital Cúcuta S.A E.S. P, con el fin de realizar la simulación en un periodo extendido de 24 horas. (Ilustración 4).

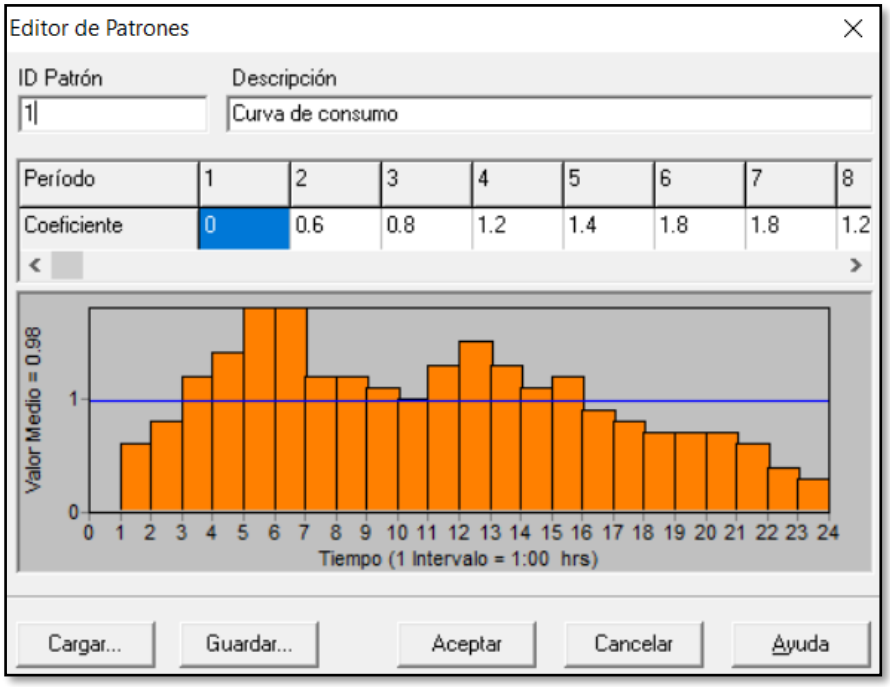


*Ilustración 4.*Curva de consumo horaria

Se muestra los datos de patrón de consumo insertados para un periodo de 24 horas en el software Epanet (Tabla 1).

Tabla 1. *Datos patrón de consumo ingresado en Epanet.*

Datos de Patrón de EPANET																								
Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Coeficiente	0	0.6	0.8	1.2	1.4	1.8	1.8	1.2	1.2	1.1	1.0	1.3	1.5	1.3	1.1	1.2	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.4	0.3

4.2.1 Asignación de propiedades de las conexiones y conductos de la red

Se ingresaron los datos de la elevación terreno para cada uno de los nodos de la red, las cotas se verificaron de la topografía provista de la zona y la demanda base del caudal se realizó por el método de áreas, para esto se llevó a cabo el cálculo de la población de diseño por el método de las densidades de saturación suministrada por el ingeniero Diego Sánchez obteniendo una densidad de 65 viviendas/hectáreas, igualmente se trabajó con una segunda densidad de 4.6

habitantes/vivienda puesto que la zona es un asentamiento, de esta forma se obtuvo el total de viviendas y la población futura correspondientemente, también se tuvo en cuenta la población flotante asumiendo un 5% de la población futura calculada (Tabla 2)

Tabla 2. *Cálculo de Población*

Cálculo de la Población						
Area (ha)	**N. Viv/ha**	**N. Hab/vi**	**Hab/viv**	**Población**	**Población flotante (5%)**	**Población Total**
23	65	4.6	300	6900	345	7245

La dotación neta del consumo fue obtenida de acuerdo a la tabla 1 del título 2, capitulo 1, artículo 43 de la Resolución 03030 del 8 de junio de 2017. (Ilustración 5).

Tabla 3. *Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar*
Fuente: Resolución 0330 de 2017

Altura Promedio sobre el nivel del mar de la zona atentida	Dotación Neta Máxima (L/HAB*DÍA)
>2000 m.s.n.m	120
1000-2000 m.s.n.m	130
<1000 m.s.nm	140

Debido a que la altura promedio sobre el nivel de la zona en estudio es de 320 m.s.n.m se determina que la dotación neta máxima por habitante es de 140(L/HAB*DÍA).

4.2.1.1 Caudal de diseño

Para el diseño de la red de distribución la resolución 0330 estipula en el capítulo 2 sección 1 artículo 47 los caudales de diseño (Ilustración 6) este nos indica que debe ser diseñada con el caudal máximo horario en caso de no tener información de la curva de consumo, sin embargo

(Cualla, 2003) argumenta que si se cuenta con la curva de consumo de debe diseñar con el Caudal medio diario (Qmd).

Tabla 4. *Caudal de diseño*
Fuente: Resolución 0330 de 2017

Componente	Caudal de Diseño
Captación fuente superficial	Hasta 2 veces QMD
Captación fuente subterránea	QMD
Desarenador	QMD
Aducción	QMD
Conducción	QMD
Tanque	QMD
Red de distribución	QMH

A continuación, se indica el proceso realizado para el cálculo del caudal de diseño de la red de distribución.

4.2.1.1.1 Dotación Bruta

Para el cálculo de la dotación bruta conforme con la resolución 0330 del 8 junio del 2017 en el Artículo 44 en la que se presenta la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{Dbruta = \frac{dneta}{1 - p\%}}$$

Ecuación 3. Dotación bruta

Donde,

Dbruta: Dotación bruta

dneta= Dotación neta

%P= Porcentaje de pérdidas técnicas máximas para el diseño.

Para el porcentaje del índice de aguas no contabilizadas IANC según resolución 0330 indica en el parágrafo 44 que este no debe superar el 25% en todos los módulos del sistema.

4.2.1.1.2 Caudal Medio Diario.

Este caudal es el calculado para una población proyectada y para su cálculo se tiene en cuenta la dotación bruta estipulada, según el (RAS, 2016) este caudal corresponde al promedio de los consumos diarios en periodo de un año y puede calcularse con la siguiente ecuación expresada en la ecuación B.2.9 del título B.

$$\boldsymbol{Qmd = \frac{p * dbruta}{86400}}$$

Ecuación 4. Caudal medio diario.

Qmd: Caudal medio diario

dbruta: dotación bruta.

P: Población proyectada.

4.2.1.1.3 Caudal Máximo Diario.

El caudal máximo horario (QMD), corresponde al consumo máximo registrado durante las 24 horas a lo largo de un periodo de un año, se calcula mediante la ecuación B.2.10 expuesta en el titulo B del RAS-2016.

$$\boldsymbol{QMD = Qmd * k1}$$

Ecuación 5. Caudal máximo diario

QMD: Caudal máximo diario

Qmd: Caudal medio diario

K1= Coeficiente de consumo máximo diario.

El coeficiente de consumo máximo diario, K1 se implementó lo expuesto por la resolución 0330 del 8 junio de 2017 en su parágrafo2 del artículo 47, donde estipula que, para poblaciones

mayores a 12500 habitantes al periodo de diseño, el factor no podrá ser superior a 1.2, acogiéndose para el cálculo del caudal máximo diario del sistema de acueducto.

4.2.1.1.4 Caudal Máximo Horario.

Este caudal Corresponde al consumo máximo registrado durante una hora en un periodo de un año sin tomar en cuenta el caudal de incendio. Se calcula, mediante la ecuación B.2.11 en el titulo B del RAS-2106.

$$\boldsymbol{QMH = QMD * K2}$$

Ecuación 6. Caudal máximo horario

QMH: Caudal máximo horario.

QMD: Caudal medio diario.

K2: Coeficiente de consumo máximo horario.

El coeficiente máximo horario k2, expuesto por la resolución 0330 del 8 junio de 2017 en su parágrafo 2 del artículo 47, donde estipula que, para poblaciones mayores a 12500 habitantes al periodo de diseño, el factor no podrá ser superior a 1.5, de ahí que se adopta para el cálculo del caudal máximo horario del sistema de acueducto**.**

4.2.1.2 Demanda Base en la Red De Distribución.

Para la estimación de los caudales de diseño de la simulación y dimensionamiento de la red de distribución se utilizó el método de Áreas, donde se determina para cada nodo de la red el área de atribución, para luego aplicar el caudal especifico unitario (L/S*Ha) determinado para cada tipo de uso de abastecimiento. Se calcula mediante la ecuación B.7.11 expuesta en el capítulo B del RAS-2016.

$$\boldsymbol{Qi = Ai * Qe}$$

Ecuación 7. Caudal de consumo en el nodo

Qi: Caudal de consumo en el nodo i (l/s)

Qe: Caudal especifico por unidad de superficie (l/s/ha).

Ai: Área de influencia o área abastecida por el nodo i (Ha).

4.2.1.3. Asignación de la demanda base de cada nodo.

Posteriormente se asignaron las demandas correspondientes a cada nodo. (Se tomo como ejemplo el nodo N10). (Ilustración 5).

Conexión N10

Propiedad	Valor
*ID Conexión	N10
Coordenada-X	190.28
Coordenada-Y	91.78
Descripción	
Etiqueta	
*Cota	298
Demanda Base	0.19
Patrón de Demanda	1
Categoría de Demanda	1
Coef. Emisor	
Calidad Inicial	
Fuente de Calidad	
Demanda Actual	No Disponible
Altura Total	No Disponible
Presión	No Disponible

*Ilustración 5.*Características de los nodos

4.2.1.4. Asignación de propiedades a cada tubería.

Se establecieron las características para las tuberías del sistema como lo son la rugosidad del material (PVC) y el diámetro interno mínimo determinado por la resolución 0330 de 8 de junio de 2017 en su artículo 63 (diámetro mínimo de 75 mm para sectores urbanos).

Inicialmente a todas las tuberías se les asignó un diámetro de 80.42 mm (3 pulgadas) con

RDE de 21 en PVC tipo 1 con presión de trabajo de 23°C de 14,06 kg/cm antes dar inicio a las simulaciones en el programa. (Se toma como ejemplo la tubería p10). Es importante señalar que la longitud de las tuberías no fue modificada debido a que la red exportada conserva las dimensiones reales del formato AutoCAD.

Tubería p10

Propiedad	Valor
*ID Tubería	p10
*Nudo Inicial	N8
*Nudo Final	N10
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	45.18
*Diámetro	80.42
*Rugosidad	0.0015
Coef. de Pérdidas	5
Estado Inicial	Abierto
Coef. Flujo	
Coef. Pared	
Caudal	No Disponible
Velocidad	No Disponible
Pérd. Unit.	No Disponible

*Ilustración 6.*Características de las tuberías

Durante el proceso se evidenció que la presión en el punto de derivación de la red matriz es mayor a la permitida por la normatividad colombiana para las redes menores o internas de acueducto, la anterior información fue suministrada por la empresa Aguas Kpital S.A E.S.P después de llevarse a cabo una simulación de la red principal. En consecuencia, se hace necesario disponer una válvula reductora de presión (VRP) y de esta manera garantizar un buen comportamiento y funcionamiento interno de la red, puesto que la presión que llega es mayor y

puede afectar las tuberías internas. En el software se introdujo una VRP estableciendo tentativamente una consigna (presión de salida) de 40 mca y un diámetro de la válvula de 12” debido a que la red matriz del municipio para esta zona en es especifico es de este diámetro. (Ilustración 7).

Válvula 5

Propiedad	Valor
*ID Válvula	5
*Nudo Inicial	val2
*Nudo Final	Nval
Descripción	
Etiqueta	
*Diámetro	293.07
*Tipo	Reductora
*Consigna	40
Coef. Pérdidas	5
Estado Fijo	Ninguno
Caudal	0.00
Velocidad	0.00
Pérdidas	42.30
Calidad	0.00
Estado	Activo

Ilustración 7. Propiedades válvula reductora de presión

4.3 Simulación de la Red de distribución combinado Python y Epanet

En el proceso de la simulación con la combinación de Python y Epanet fue necesario efectuar las siguientes actividades, cabe resaltar que los códigos y algoritmos creados funcionan para cualquier red a diseñar, sin embargo, se debe cambiar la ruta de búsqueda del archivo de Epanet en cada script de Python.

4.3.1 Enlace entre Python y Epanet.

Se realizó el enlace de la red de diseño con el lenguaje de programación Python por medio de su biblioteca *epanettools*, importando las funciones del kit de herramientas de programadores de Epanet dentro de los scripts y cada uno de sus elementos como lo son los nodos, las tuberías y en general todos los objetos que conforman la red, como se muestra a

continuación en el entorno de trabajo ejecutable IDLE de Python, además se crea una variable que nos almacene la ruta donde está ubicada la red de diseño en Epanet. (Ilustración 8).

```
*epanettools.py - C:/Users/JEIMY/Desktop/RED_ACUEDUCTO/simulacion_python/epanettools.py (3.7.5)*
File  Edit  Format  Run  Options  Window  Help
#Red de Acueducto asentamiento JOSE BERNAL CUCUTA
import epanettools
from epanettools.epanettools import EPANetSimulation,Node, Link, Network
from epanettools.examples import simple #aquicargamos la red de ejemplo
import os #libreria para usar acciones del sist OPerativo
import pprint #libreria que usamos para ver diccionarios


#EN LA SIGUIENTE VARIABLE GUARDAREMOS LA RUTA DONDE ESTA NUESTRA RED
ruta="C:/Users/JEIMY/Desktop/RED_ACUEDUCTO/simulacion_python/RED ESTATICA QMH - python.inp"
```

Ilustración 8. IDLE de Python, importación de Epanettools y ruta.

Seguido a esto se crearon variables que almacenen todas las conexiones y los conductos de la red las cuales hemos nombrado como nodos y links respectivamente. (Ilustración 9), de esta manera Python los reconoce como objetos del entorno epanettools.

```
#Red de Acueducto asentamiento
import epanettools
from epanettools.epanettools import EPANetSimulation, Node, Link ,Network
from epanettools.examples import simple #cargamos la red
import os #libreria del Sistema Operativo
import pprint #libreria para ver diccionarios

red="C:/Users/JEIMY/Desktop/RED_ACUEDUCTO/simulacion_python/RED ESTATICA QMH - p
simulacion=EPANetSimulation(red)

#VARIABLE PARA GUARDAR LOS NODOS Y CONDUCTOS

nodos=simulacion.network.nodes
links=simulacion.network.links

simulacion.run()
```

Ilustración 9. Variable para guardar las conexiones y conductos de la red.

Como es sabido los nodos y las tuberías tienen ciertos atributos que son representativos dentro del diseño de la red de distribución, por esta razón se hace necesario almacenar estas propiedades en variables para tenerlas en cuenta en el momento de interactuar y evaluarlos dentro del entorno de Python, tales como: demanda, presión, elevación (en los nodos) y

velocidad, diámetro, caudal (en las tuberías). En la ilustración 10, se muestra la creación de las variables que guarden las propiedades de los objetos de la red.

```
*VARIABLES.py - C:\Users\JEIMY\Desktop\RED_ACUEDUCTO\python\VARIABLES.py (3.7.5)*
File  Edit  Format  Run  Options  Window  Help
#Red de Acueducto asentamiento
import epanettools
from epanettools.epanettools import EPANetSimulation, Node, Link ,Network
from epanettools.examples import simple #cargamos la red
import os #libreria del Sistema Operativo
import pprint #libreria para ver diccionarios

red="C:/Users/JEIMY/Desktop/RED_ACUEDUCTO/simulacion_python/RED ESTATICA QMH - p
simulacion=EPANetSimulation(red)

#VARIABLE PARA GUARDAR LOS NODOS Y CONDUCTOS

nodos=simulacion.network.nodes
links=simulacion.network.links

simulacion.run()
#ATRIBUTOS DE LOS NODOS
demandas=Node.value_type["EN_DEMAND"]
presiones=Node.value_type["EN_PRESSURE"]
elvaciones=Node.value_type["EN_ELEVATION"]

#ATRIBUTOS DE LOS CONDUCTOS
diametros=Link.value_type["EN_DIAMETER"]
caudales=Link.value_type['EN_FLOW']
velocidades=Link.value_type["EN_VELOCITY"]
Ln: 3  Col: 0
```

Ilustración 10. Variables del almacenamiento de atributos

4.3.2 Algoritmos en el IDLE de Python.

Por medio del aprendizaje de lenguaje de programación Python se crearon diferentes algoritmos que facilitaran el proceso de simulación y que nos permitieran acceder y cambiar las propiedades de los objetos de la red con el fin de obtener un diseño adecuado de una manera más rápida y presentando una estructura fácil de comprender e interpretar cumpliendo con las condiciones de diseño estipuladas en la normatividad colombiana.

Se desarrollaron algoritmos para ejecutar cambios de valores en los atributos de los objetos de la red por valores deseados o estableciendo diferentes condiciones hidráulicas, y de esta manera obtener un diseño óptimo de la red de distribución de agua potable.

Finalmente se fijó el diámetro interno inicial de 80.42 mm con RDE DE 21, para todos los conductos de la red por medio de un algoritmo desde Python efectuado en el motor de cálculo en Epanet. (Ilustración 11)

```
ruta="C:/Users/JEIMY/Desktop/Nueva carpeta/f.inp"
simulacion=EPANetSimulation(ruta)

#usar en ******ENsetlinkvalue para cambiar los parametros
#guardaremos los diametros
diam=Link.value_type["EN_DIAMETER"]
d=simulacion.ENsetlinkvalue

for d in links: #me hace un ciclo con el numero de conduc
    if simulacion.ENgetlinkvalue(d,diam)[1]: #comparar el
        simulacion.ENsetlinkvalue(d,diam,80.42) #reemplaz

import tempfile

simulacion.ENsaveinpfile("C:/Users/JEIMY/Desktop/Nueva ca
```

Ilustración 11. Asignación de diámetros iniciales desde el IDLE de Python

Seguidamente se asigna el patrón de demanda a cada uno de los nodos de la red, por medio de un algoritmo en el que se evalúa el patrón para cada nodo de la red. (Ilustración 12)

hacer_cambvarios.py - C:\Users\JEIMY\Desktop\RED_ACUEDUCTO\python\hacer_cambvarios.py (3.7.5)

File Edit Format Run Options Window Help

```
import epanettools
from epanettools.epanettools import EPANetSimulation,Node, Link, Network
from epanettools.examples import simple #aquicargamos la red de ejemplo
import os #libreria para usar acciones del sist OPerativo
import pprint #libreria que usamos para ver diccionarios
#importamos librerias y dependencias necesarias

#EN LA SIGUIENTE VARIABLE GUARDAREMOS LA RUTA DONDE ESTA NUESTRA RED

ruta="C:/Users/JEIMY/Desktop/RED_ACUEDUCTO/python/RED ESTATICA QMH - python.inp"#los slach debe ser estos:////


simulacion=EPANetSimulation(ruta)

#GUARDAREMOS LOS PATRONES
pt=Node.value_type["EN_PATTERN"]

#usar en ******ENsetnodevalue para cambiar los parametros de la red*******

nodos=simulacion.network.nodes

p=simulacion.ENsetnodevalue

for p in nodos: #me hace un ciclo con el # de nodos que existen
    if simulacion.ENgetnodevalue(p,pt)[1]: #comparar el valor de c/patron con la condición planteada
```

Ilustración 12. Asignación patrón de demanda

A modo de ejemplo se muestran algoritmos que muestran los nodos que presentan presiones negativas (Ilustración 13), además se expone el código para hallar las presiones de los nodos con la (Ilustración 14).

```
simulacion=EPANetSimulation(red)

#VARIABLE PARA GUARDAR LOS NODOS Y CONDUCTOS

nodos=simulacion.network.nodes
links=simulacion.network.links

simulacion.run()
#PRESIONES NEGATIVAS DE LA RED

presiones=Node.value_type["EN_PRESSURE"]
presiones_neg=sorted([y.id for x,y in nodos.items() if min(y.results
if len(presiones_neg)==0:
        print('La red no presenta nodos con Presiones negativas')
else:
        print('Los nodos con presiones negativas son:')
        print(presiones_neg)
```

Ilustración 13. Algoritmo de nodos con presiones negativas en la red

```
simulacion=EPANetSimulation(red)

#VARIABLE PARA GUARDAR LOS NODOS Y CONDUCTOS

nodos=simulacion.network.nodes
links=simulacion.network.links

simulacion.run()

#PRESIONES DE LOS NODOS DE LA RED
print ("PRESIONES DE LOS NODOS")
for x,y in nodos.items():
    if min (y.results[presiones]):
       print ("Nodo {} -- presión = {}".format (y.id, round (min(simulacion.network.nodes[y.id].
```

Ilustración 14. Algoritmo para hallar presiones en los nodos de la red

5. Resultados

5.1 Trazado de la Red

En la ilustración 15, se muestra la red ejemplo para el diseño suministrada por el ingeniero Diego Iván Sánchez en formato AutoCAD, del asentamiento José Bernal obtenida mediante el levantamiento topográfico de la zona.

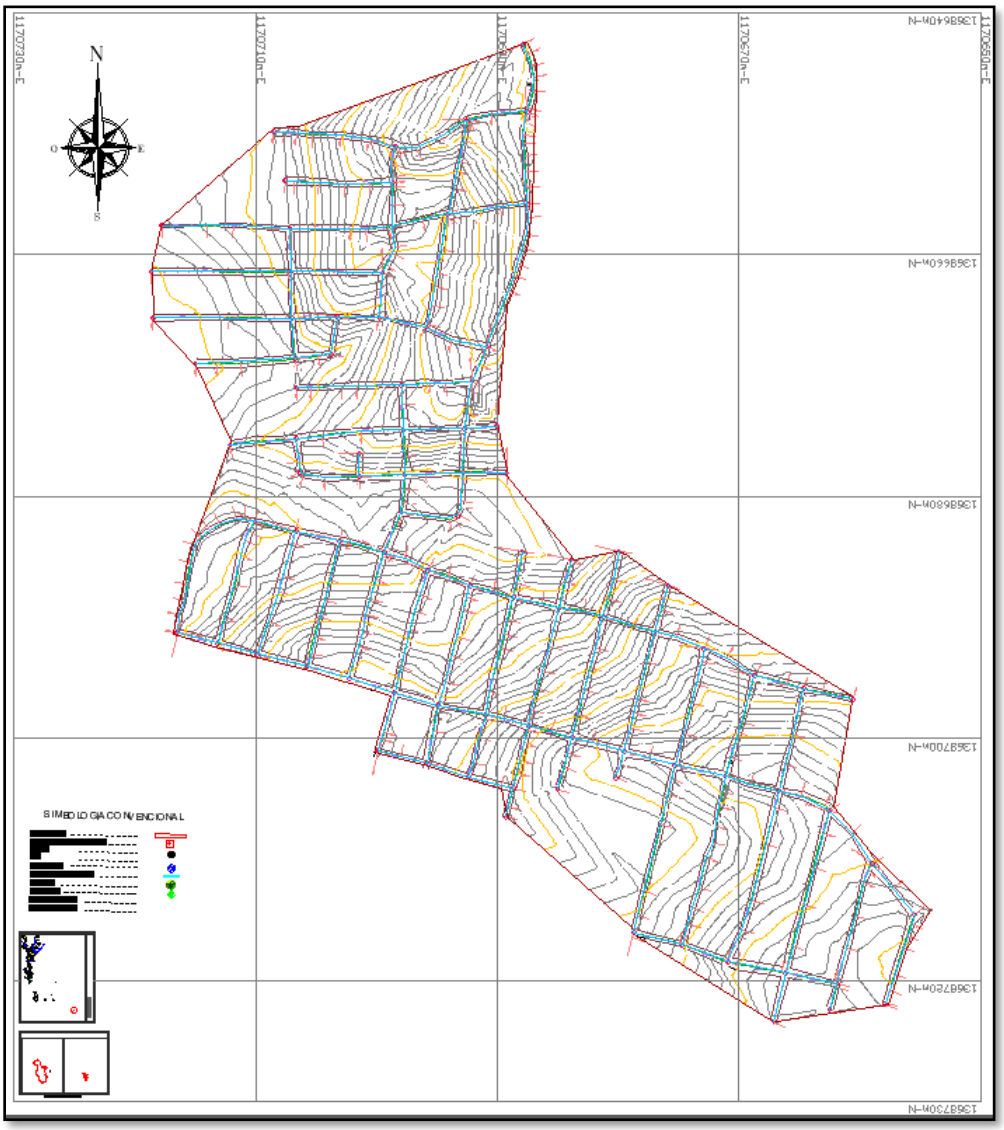


Ilustración 15. Trazado de la Red ejemplo
Fuente: Aguas Kpital Cúcuta S.A. E.S
RED_ACUEDUCTO\TOPOGRAFIA\Trazado de la red.pdf

5.2 Simulación de la Red de distribución en Epanet

Se exporto la red de AutoCAD al formato. net con el software EpaCAD como se observa en la Ilustración 16, el visor de Epanet con los nodos y las tuberías de la red.

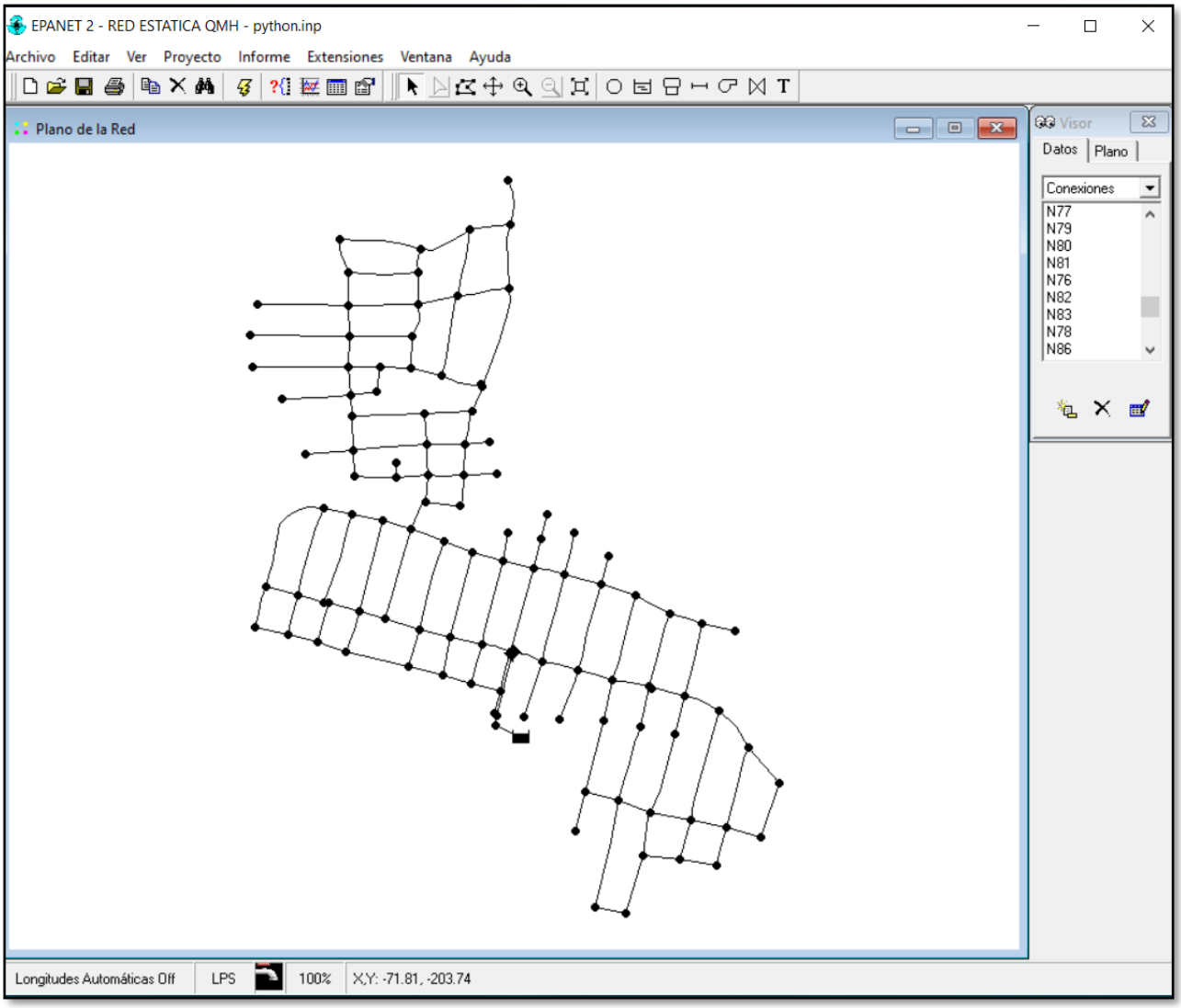


Ilustración 16. Trazado de red de diseño exportada a Epanet

5.2.1 Asignación de propiedades de las conexiones y conductos de la red.

5.2.1.1 Caudal de diseño.

En la Tabla 3, se observan los resultados de la dotación bruta, del caudal medio diario (Qmd), máximo diario (QMD) y máximo horario (QMH), obtenidos de la aplicación de las ecuaciones descritas anteriormente en la metodología (Ecuaciones 3,4,5,6), siendo utilizados para el cálculo del caudal de diseño de la red de acueducto, como se puede observar el caudal de diseño es de 44 l/s.

Tabla 5. Resultados Caudal de Diseño

Resultados de Cálculo de Caudal de Diseño	
% Perdidas IANC	25%
Dotación neta (L/Hab*día	140
Dotación Bruta (L/hab*día)	187
K1 (-)	1.2
K2 (-)	1.5
Qmd (l/s)	24
QMD (l/s)	29
QMH (l/s)	44

5.2.1.2 Demanda Base en la Red De Distribución.

En la ilustración 17, se muestran las áreas de influencia de cada nodo del sistema de acueducto, donde se observa que se toma el área total del asentamiento a servir, evaluando así la demanda base por unidad de área con la ecuación 7 descrita en la metodología. En el Apéncide 1 se presenta la demanda base para cada uno de los nodos del sistema.

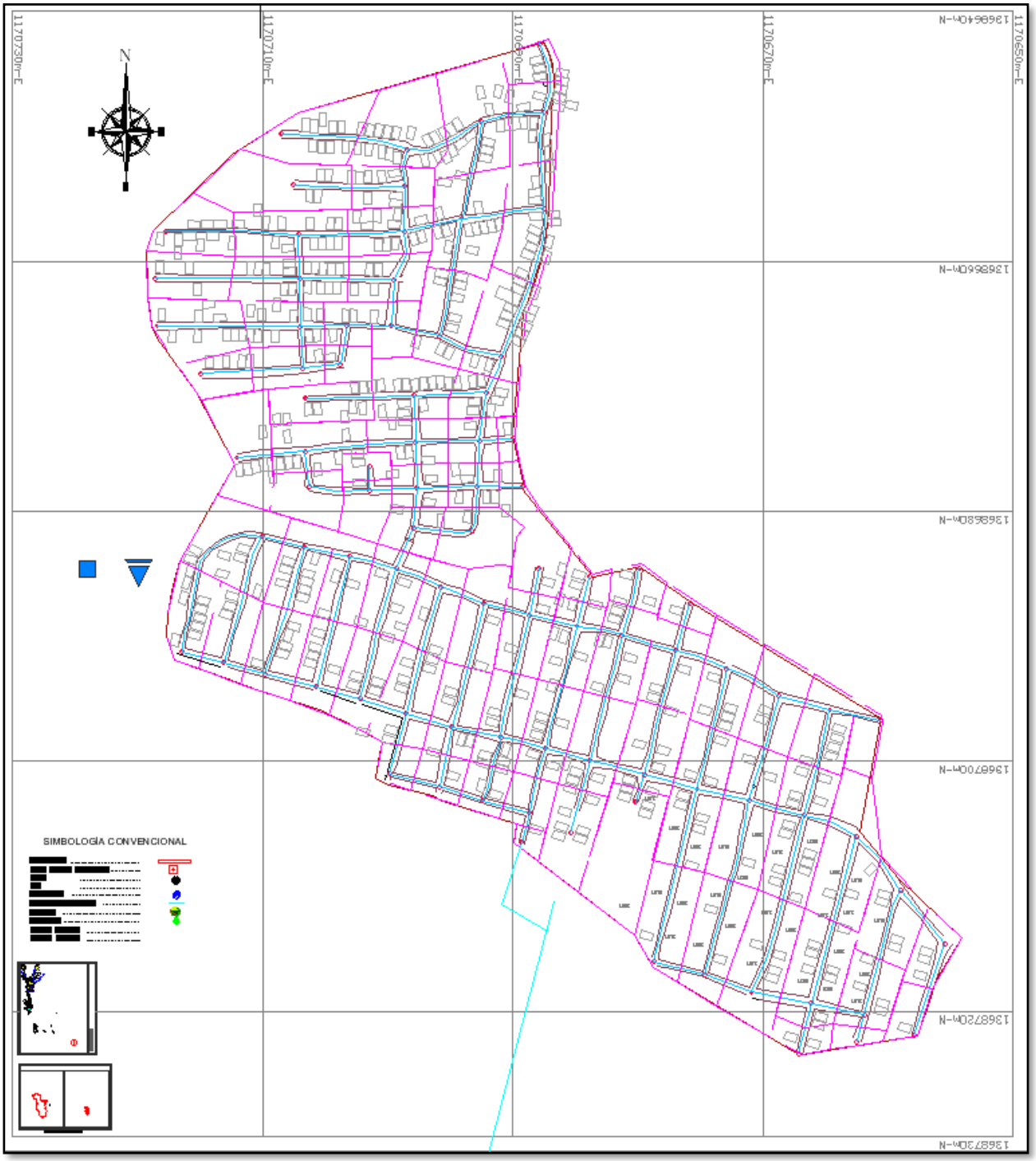


Ilustración 17. Áreas de influencia a cada nodo
Fuente: Aguas Kpital Cúcuta S.A. E.S.P
RED_ACUEDUCTO\TOPOGRAFIA\Areas tributarias.pdf

A continuación, se exponen algunos de los resultados de las diferentes iteraciones que se realizaron, inicialmente el diámetro de las tuberías es 80.42 mm (3”) cabe resaltar que se utilizan diámetros para altas presiones con un RDE de 21 PVC tipo 1 con presión de trabajo de 23°C de 14,06 kg/cm.

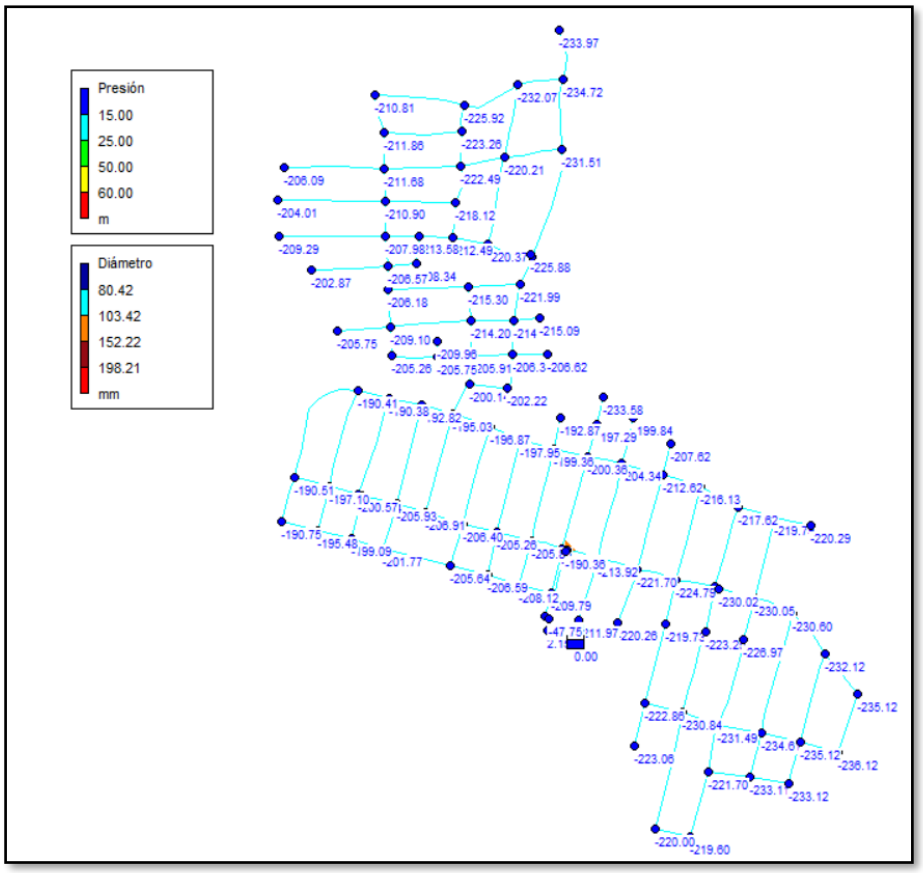


Ilustración 18. Simulación número 1, diámetros de tuberías iniciales 80.42mm

En esta primera simulación podemos observar que tenemos presiones negativas en toda la red (Ilustración 18), además Epanet nos muestra mensajes de advertencia de presiones negativas en el sistema durante todo el periodo de 24 horas. (Ilustración 19).

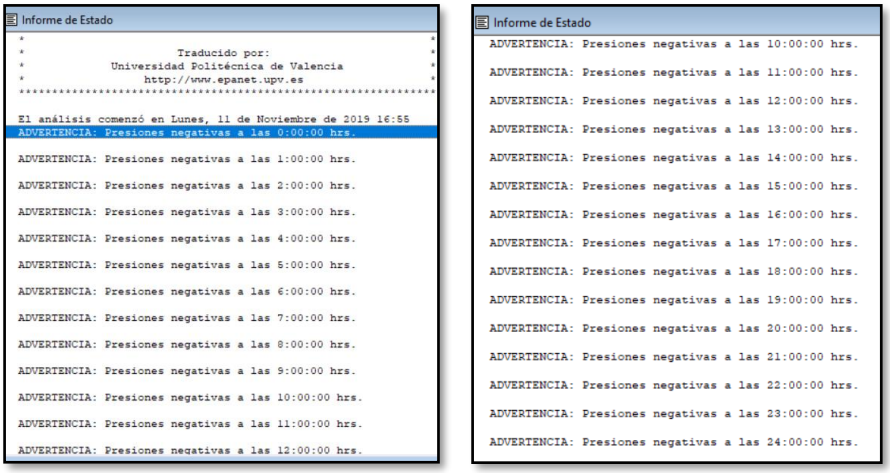


Ilustración 19. Informe de estado de la red.

En vista de los resultados obtenidos de la simulación se procede a aumentar los diámetros desde la fuente de a abastecimiento hasta conectarse a la VRP, estableciendo diámetros de 293.07 mm, equivalentes a 12 pulgadas. (Ilustración 20).

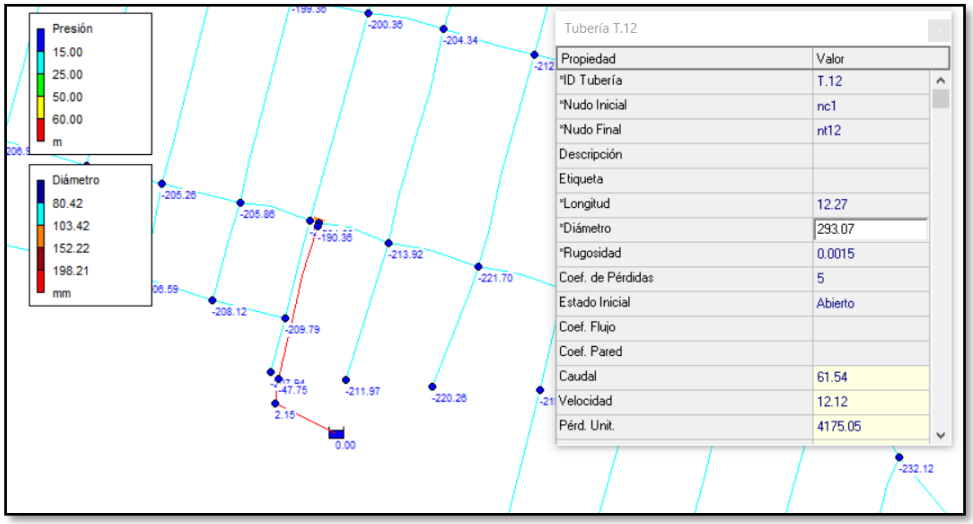


Ilustración 20. Cambio de diámetros de las tuberías

Con este cambio de diámetro ya no presentamos mensajes de advertencia sobre presiones negativas en nuestra red (Ilustración 21), sin embargo, de acuerdo con la resolución 0330 del 8

de junio de 2017 articulo 61 se deben garantizar presiones dinámicas de servicio mínimo de 15 m.c.a, para poblaciones mayores a 12500 habitantes.

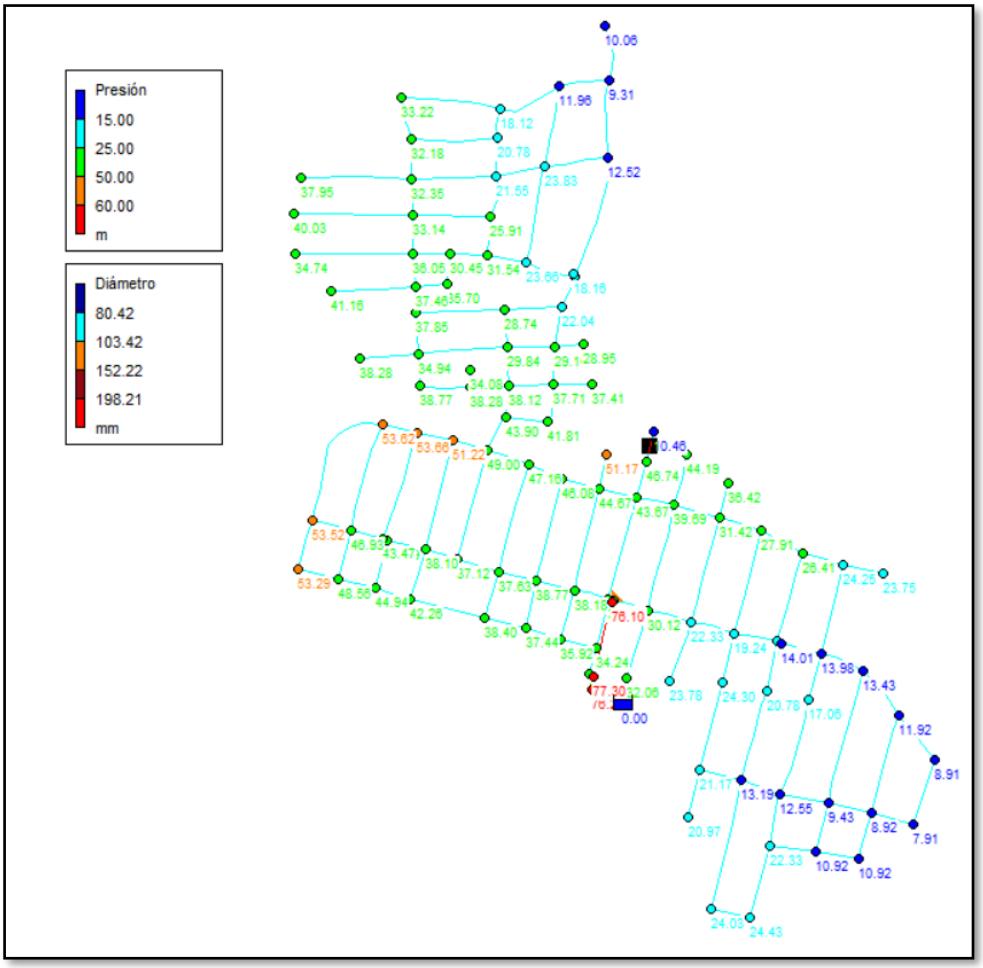


Ilustración 21. Simulación número 2, cambio de diámetros

Para poder cumplir con la normatividad fue necesario realizar diferentes cambios estratégicos de diámetros en las tuberías y después de más de 20 iteraciones en el software se consigue obtener el diseño óptimo de la red de distribución logrando de esta manera alcanzar presiones aceptables e inclusive por criterio se decide disminuir la presión de entrada de la válvula llegando después de diferentes iteraciones obtener una consigna de 33.8 m.c.a. y un diámetro de 103.42 mm (4 pulgadas).

finalmente se obtiene el diseño de la red de distribución de agua potable cumpliendo con la normatividad actual, no obstante se evidencian nodos con presiones menores a 15 m.c.a pero sus áreas representan menos del 5% del área total de servicio de la red, lo que es permitido según la resolución 0330 en el artículo 61 parágrafo 1 en el que se expone que: “el área a abastecer con presión dinámica inferior puede corresponder hasta el 5% del área total, siempre que la presión mínima sea superior o igual de 10 m.c.a para poblaciones de diseño mayores a 12.500 habitantes”.

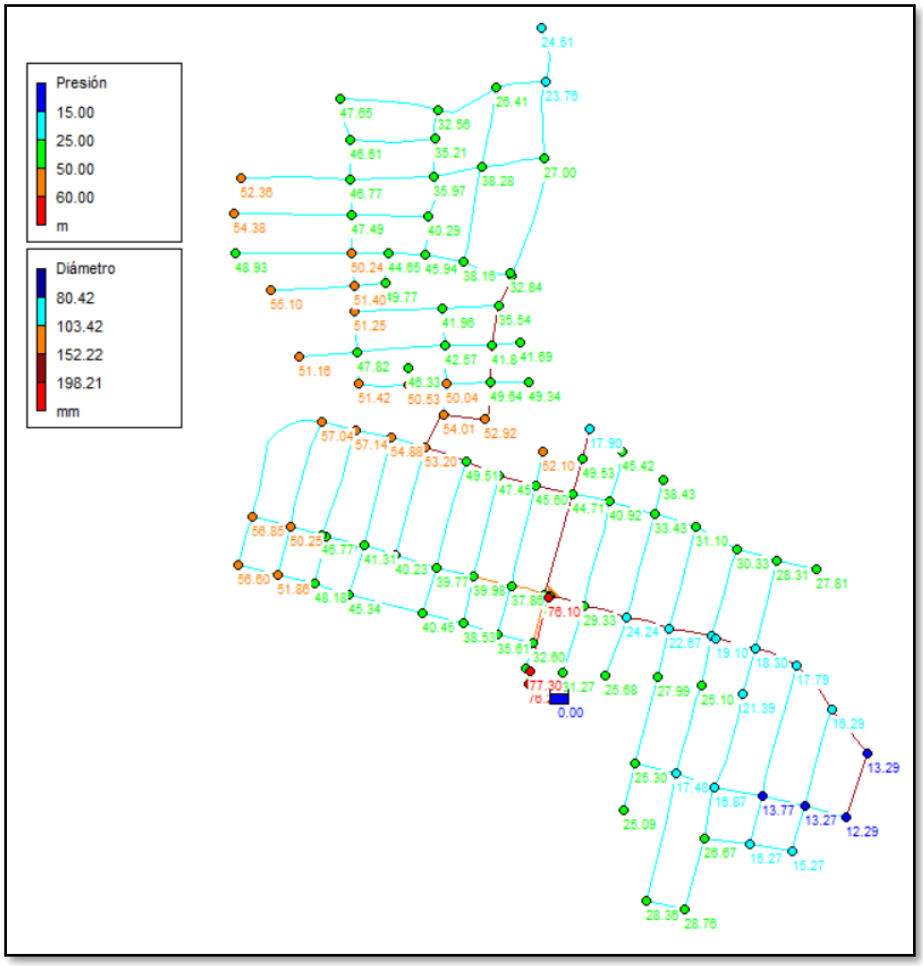


Ilustración 22. Red final de distribución de agua potable.

En la ilustración 23, se muestra el entorno de trabajo de Epanet donde se identifican los diámetros finales de la red de distribución de agua potable para el asentamiento.

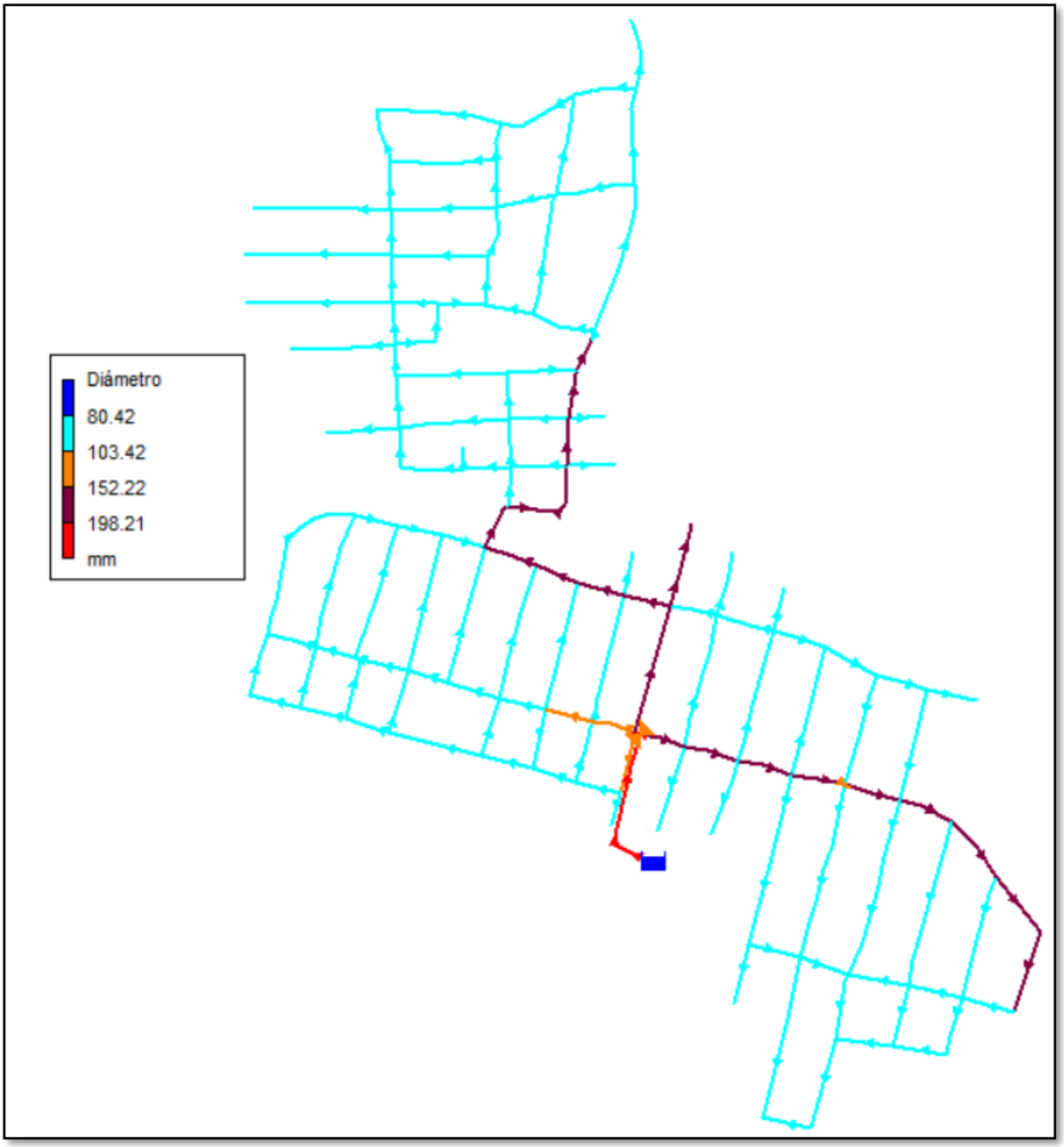


Ilustración 23. Diámetros finales de la red en Epanet

5.3 Diseño de la red Combinando Python y Epanet

Inicialmente se realiza una verificación de las presiones al inicio de la simulación cuando se tiene toda la red con tubería de diámetro interno de 80.42 mm con un RDE de 21, en este proceso el Shell de Python nos imprime los identificadores de los nodos con presiones negativas y su valor. (Ilustración 24).

```
Python 3.7.5 Shell
File  Edit  Shell  Debug  Options  Window  Help
Python 3.7.5 (tags/v3.7.5:5c02a39a0b, Oct 15 2019, 00:11:34) [MSC v.1916 64 bit
(AMD64)] on win32
Type "help", "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
= RESTART: C:\Users\JEIMY\Desktop\RED_ACUEDUCTO\python\PRESIONES_Y_PRESIONES_NEG
ATIVAS.py
Los nodos con presiones negativas son:
['4', 'N1', 'N10', 'N100', 'N101', 'N11', 'N12', 'N13', 'N14', 'N15', 'N16', 'N1
7', 'N18', 'N19', 'N2', 'N20', 'N21', 'N22', 'N23', 'N24', 'N25', 'N26', 'N27',
'N28', 'N29', 'N3', 'N30', 'N31', 'N32', 'N33', 'N34', 'N35', 'N36', 'N37', 'N38
', 'N39', 'N4', 'N40', 'N41', 'N42', 'N43', 'N44', 'N45', 'N46', 'N46A', 'N47',
'N48', 'N49', 'N5', 'N50', 'N51', 'N52', 'N53', 'N54', 'N55', 'N56', 'N57', 'N58
', 'N59', 'N6', 'N60', 'N61', 'N62', 'N63', 'N64', 'N65', 'N66', 'N67', 'N68', '
N69', 'N7', 'N70', 'N71', 'N72', 'N73', 'N74', 'N75', 'N76', 'N77', 'N78', 'N79'
, 'N8', 'N80', 'N81', 'N82', 'N83', 'N84', 'N85', 'N86', 'N87', 'N88', 'N89', 'N
9', 'N90', 'N91', 'N92', 'N93', 'N94', 'N95', 'N96', 'N97', 'N98', 'N99', 'h1',
'h2', 'nt12', 'val1', 'val2']
PRESIONES DE LOS NODOS
Nodo N1 -- presión = -240.51
Nodo N2 -- presión = -239.51
Nodo N5 -- presión = -236.5
Nodo N7 -- presión = -239.0
Nodo N6 -- presión = -237.5
Nodo N4 -- presión = -239.5
Nodo N8 -- presión = -234.99
Nodo N9 -- presión = -235.87
Nodo N13 -- presión = -235.23
Nodo N16 -- presión = -227.25
Nodo N96 -- presión = -224.13
Nodo N10 -- presión = -234.44
Nodo N14 -- presión = -233.24
Nodo N95 -- presión = -227.64
Nodo N12 -- presión = -224.17
Nodo N11 -- presión = -224.67
Nodo N15 -- presión = -222.0
Nodo N17 -- presión = -229.18
Nodo N18 -- presión = -220.5
Nodo N20 -- presión = -226.16
Nodo N19 -- presión = -224.71
Nodo N24 -- presión = -218.7
                                                                Ln: 117  Col: 4
```

Ilustración 24. Nodos con Presiones negativas y presiones en los nodos

Se procede a realizar el cambio de diámetro del tramo de tubería que va desde la fuente de abastecimiento hasta la válvula reductora de presión (VRP) previamente instalada, se cambia el diámetro de todo el tramo por un diámetro interior de 293.07 mm. Con RDE de 21.

Despues de realizar cambios de diametro de la tubería , corremos de nuevo el Shell de Python, este nos indica que ya no existen presiones negativas en la red de distribución, y ademas configuramos para que nos muestre los nodos cuya presion es menor a 15 m.c.a (Ilustración 25).

```
Python 3.7.5 Shell
File  Edit  Shell  Debug  Options  Window  Help
Python 3.7.5 (tags/v3.7.5:5c02a39a0b, Oct 15 2019, 00:11:34) [MSC v.1916 64 bit
(AMD64)] on win32
Type "help", "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
= RESTART: C:\Users\JEIMY\Desktop\RED_ACUEDUCTO\SIMULACION_COMB_PY_EPA\7.PRESION
ES_MENORES_15MCA.py
***LA RED NO PRESENTA PRESIONES NEGATIVAS***

*** NODOS CON PRESIONES MENORES A 15 M.C.A***

Nodo N1 -- presión = 7.91
Nodo N2 -- presión = 8.91
Nodo N5 -- presión = 11.92
Nodo N7 -- presión = 9.43
Nodo N6 -- presión = 10.92
Nodo N4 -- presión = 8.92
Nodo N8 -- presión = 13.43
Nodo N9 -- presión = 12.55
Nodo N13 -- presión = 13.19
Nodo N10 -- presión = 13.98
Nodo N79 -- presión = 12.52
Nodo N86 -- presión = 9.31
Nodo N87 -- presión = 11.96
Nodo N90 -- presión = 10.06
Nodo N3 -- presión = 10.92
Nodo h2 -- presión = 14.01
Nodo 4 -- presión = 10.46
```

Ilustración 25. Primera iteración, presiones menores a 15 m.ca.

Según la normatividad en la resolución 0330 en el artículo 61 parágrafo 1 en el que se expone que: “el área a abastecer con presión dinámica inferior puede corresponder hasta el 10% del área

total, siempre que la presión mínima sea superior o igual de 12 m.c.a para poblaciones de diseño mayores a 12.500 habitantes”. Además de que se puede abastecer con presión dinámica hasta del 5% del área total siempre que la presión mínima sea de 10 m.c.a para poblaciones de diseño mayore a 12500.

Python nos imprime los nodos con presión menores o iguales a 10 m.c.a (Ilustración 26), en él nos indica que la presión de en los nodos N1, N2, N7, N4 y N86 están por debajo de los 10 m.c.a, por lo tanto, según la normatividad no estaría cumpliendo con la presión mínima de diseño.

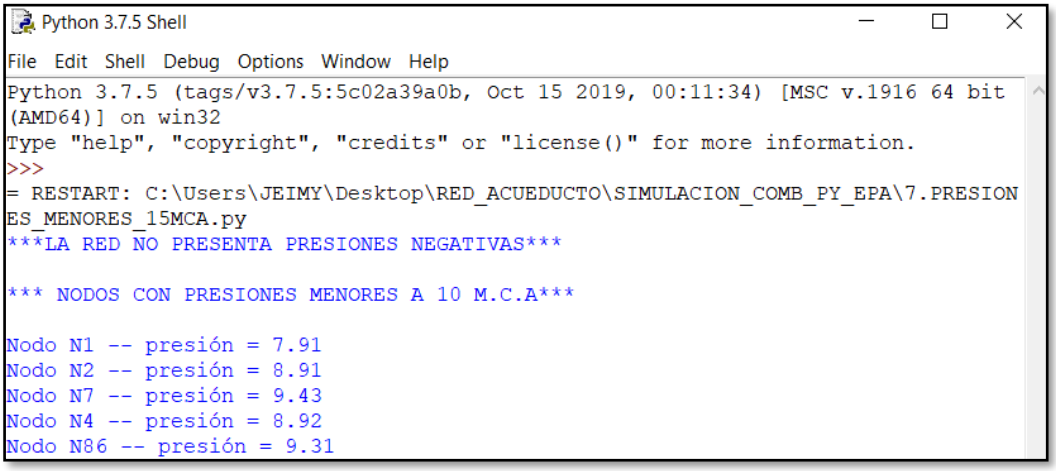


Ilustración 26. Nodos con presiones menores o iguales a 10 m.c.a

Por lo anterior se hace necesaria la modificación del diámetro de la tubería para esto se apoyó de el visor de Epanet (Ilustración 27) donde podemos identificar las tuberías a las que se debe modificar el diámetro debido a que la presión de los nodos a los que se conectan es muy baja.

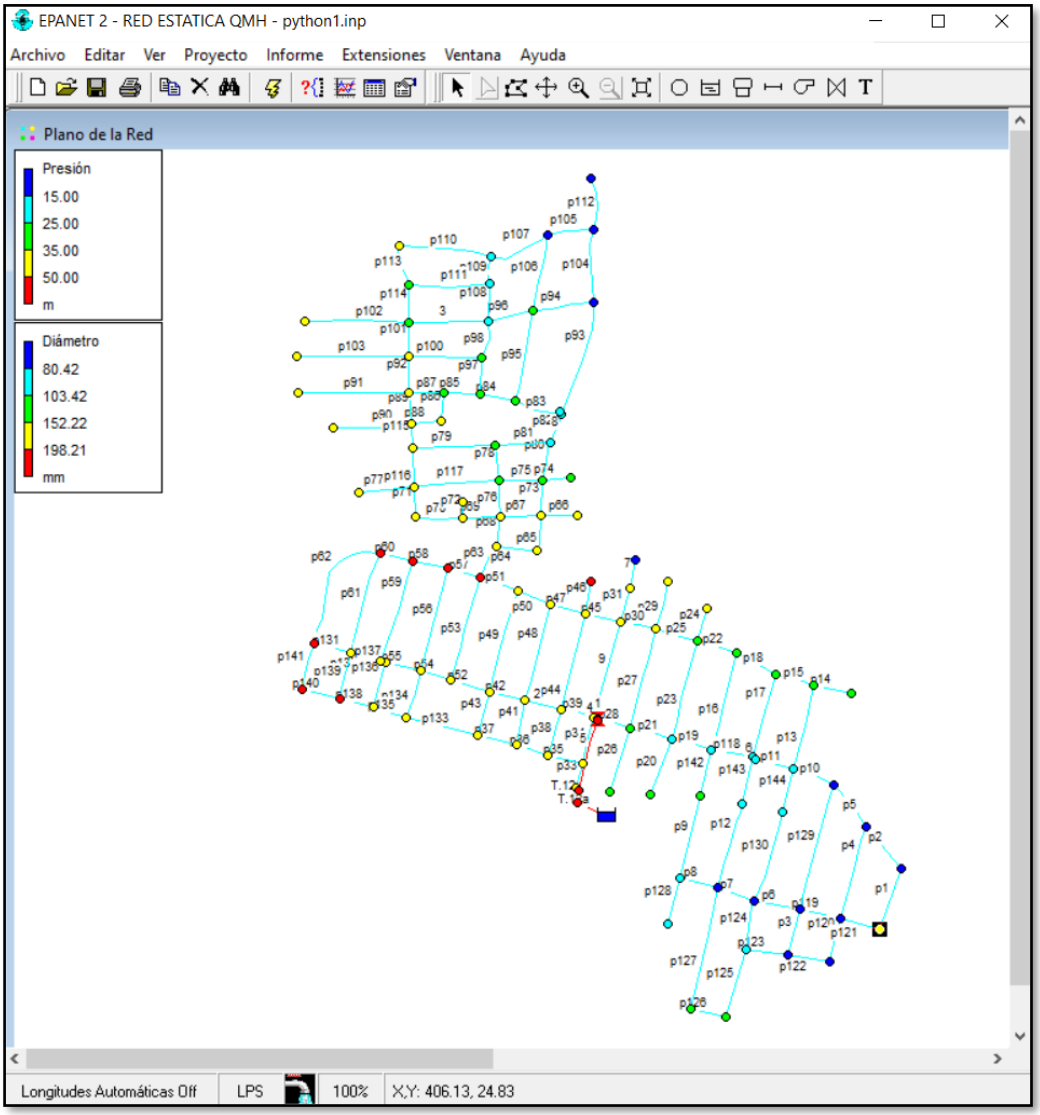


Ilustración 27. Trazado de la red Epanet (identificación de tuberías)

Por consiguiente, se modifican los diámetros de dichas tuberías y en la válvula reductora de presión, desde el IDLE de Python con el que obtienen presiones menores o iguales a 15 m.c.a, a los que se les calcula el porcentaje de área en relación al área total como se evidencia en la Ilustración 28, donde ninguna de las áreas supera el 5% del área total del proyecto. Lo que nos

indica que en estos nodos se cumple la normatividad colombiana vigente (RAS, 2016 y la resolución 03030 de 2017).

```
Python 3.7.5 Shell
File  Edit  Shell  Debug  Options  Window  Help
Python 3.7.5 (tags/v3.7.5:5c02a39a0b, Oct 15 2019, 00:11:34) [MSC v.1916 64 bit
(AMD64)] on win32
Type "help", "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
= RESTART: C:\Users\JEIMY\Desktop\RED_ACUEDUCTO\SIMULACION_COMB_PY_EPA\9.PRESION
ES_MENORES_12.py
***LA RED NO PRESENTA PRESIONES NEGATIVAS***

*** NODOS CON PRESIONES MENORES A 15 M.C.A***

Nodo N86 -- presión = 12.79
Nodo N90 -- presión = 13.53
Nodo Emb1 -- presión = 0.0

Porcentajes de area de nodos con presiones menores a 15 mca

N86-- % de area=1.08
N90-- % de area=0.54
```

Ilustración 28. Segunda iteración, presiones menores o iguales a 15 m.c.a

6. Análisis Comparativo de Resultados

A continuación, se realiza la comparación y el análisis de los resultados obtenidos entre la modelación realizada en Epanet y la ejecutada con la combinación de Python y Epanet, esto mediante aspectos que pueden ser determinantes en la disminución del tiempo de diseño y en la obtención de un proyecto en óptimas condiciones y de la mano con la normatividad vigente colombiana.

6.1 Ingreso de datos

En el proceso del diseño para cumplir con las condiciones mínimas de servicio fue necesario realizar cambios en los diámetros de las tuberías que así lo solicitaban, en esta labor tenemos una gran ventaja al usar algoritmos desde Python debido a que en Epanet como se observa en la parte izquierda de la ilustración 29, se debió ingresar un diámetro de 293.07 mm a un total de cuatro líneas de tuberías que lo requerían lo que se vio reflejado en aproximadamente un tiempo de 60 segundos, en cambio en el IDLE de Python conectado a la biblioteca de epanettools (lado derecho de la ilustración 31) con solo la elaboración del algoritmo estamos ingresando el diámetro de 293.07 mm al tramo de cuatro conductos de la red con un tiempo máximo de 20 segundos.

En consecuencia, si se usa para el proyecto la combinación del lenguaje de programación

(Python) y el software de diseño (Epanet) se estaría generando una disminución de tiempo considerable para el diseñador con diferencias significativas como se representa en la Ilustración 30.

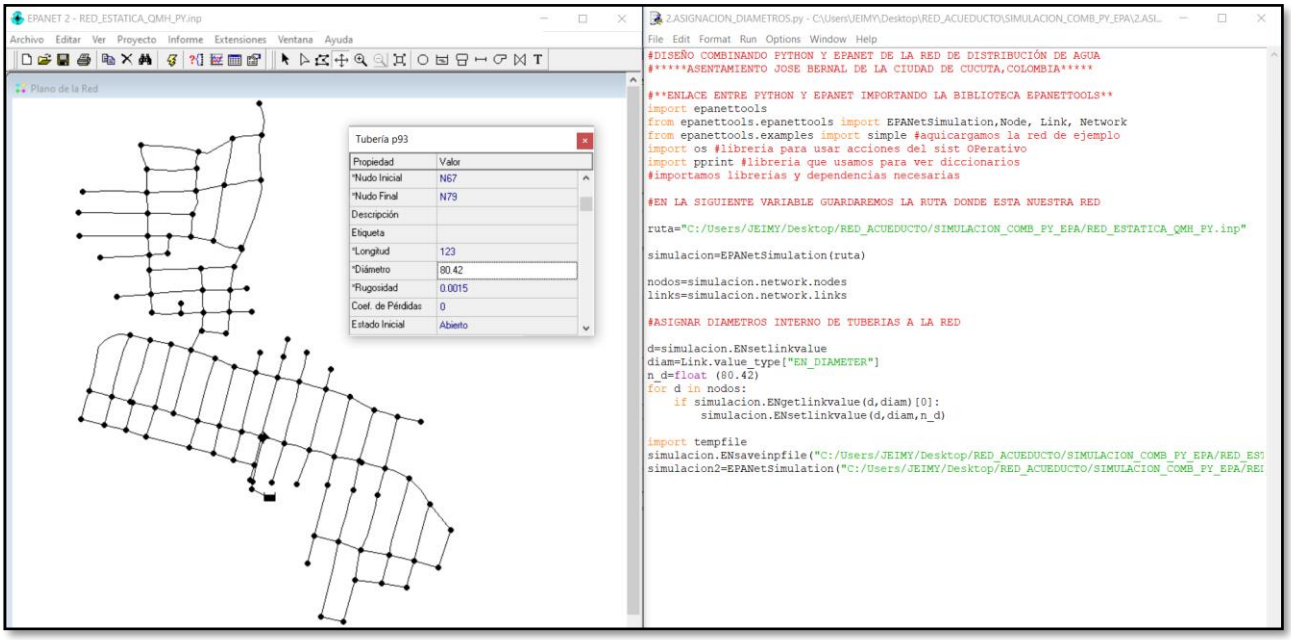


*Ilustración 29.*Ingreso de datos en Epanet (izquierda) y en el IDLE de Python (derecha).

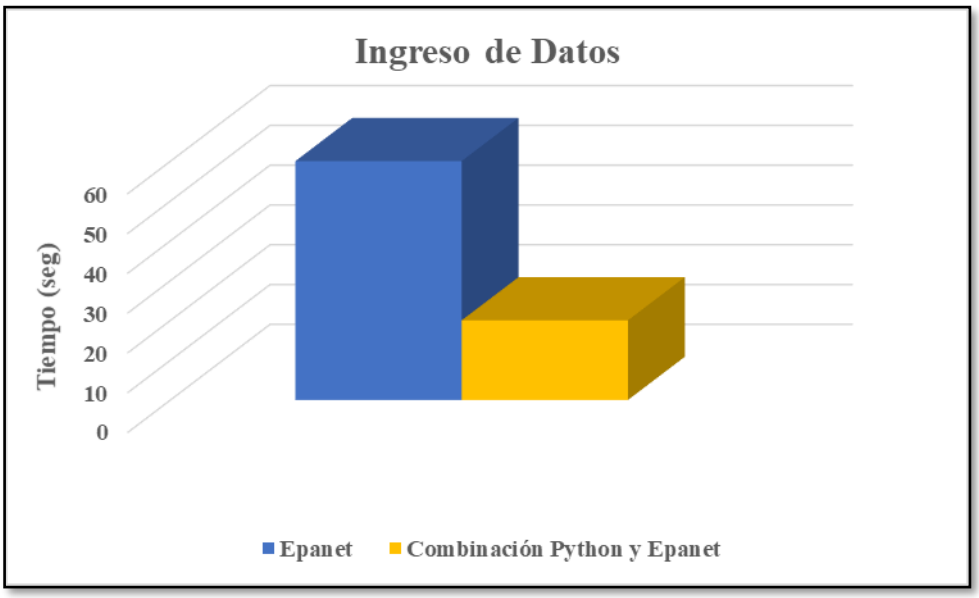


Ilustración 30. Tiempo de ingreso de datos

6.2 Visualizacion de Resultados

La visualización de resultados es un término general que describe cualquier esfuerzo para ayudar a las personas a comprender la importancia de los datos colocándolos en un contexto visual. Los patrones, las tendencias y las correlaciones que, en ocasiones, pueden pasar desapercibidos en los datos pueden exponerse y reconocerse más fácilmente con las librerías de visualización de datos. (Gónzalez, 2018). Es así que es una de las características más importantes que debe tener un software a la hora de diseñar, en otras palabras, es la forma en la cual se reflejen y se muestran los datos de salida y de allí depende en gran magnitud la toma decisiones acertadas dentro de un proyecto.

Dentro de este marco podemos iniciar observando los resultados de la primera iteración con el software Epanet en el que obtienen mensajes de advertencia los cuales indican que existen presiones negativas dentro de la red (Ilustración 32, lado izquierdo), y que comparado con los resultados obtenidos entre el enlace de Python y Epanet (Ilustración 33, lado derecho), en los que se muestra cada uno de los nodos donde se presentan estas presiones negativas, podemos señalar que la simulación con el vínculo de los dos softwares es más precisa, dándonos de esta forma una información concreta de las conexiones donde existen problemas de presiones en la red y en consecuencia logremos realizar los cambios en los elementos que así lo requieran, sin afectar los atributos de otros objetos, incluso la visualización de las características hidráulicas de cada uno de los objetos se nota ordenada y fácil de entender como se muestra en la ilustración 32, en la que se contrastan los resultados de las presiones de los nodos con los dos tipos de simulación realizada.

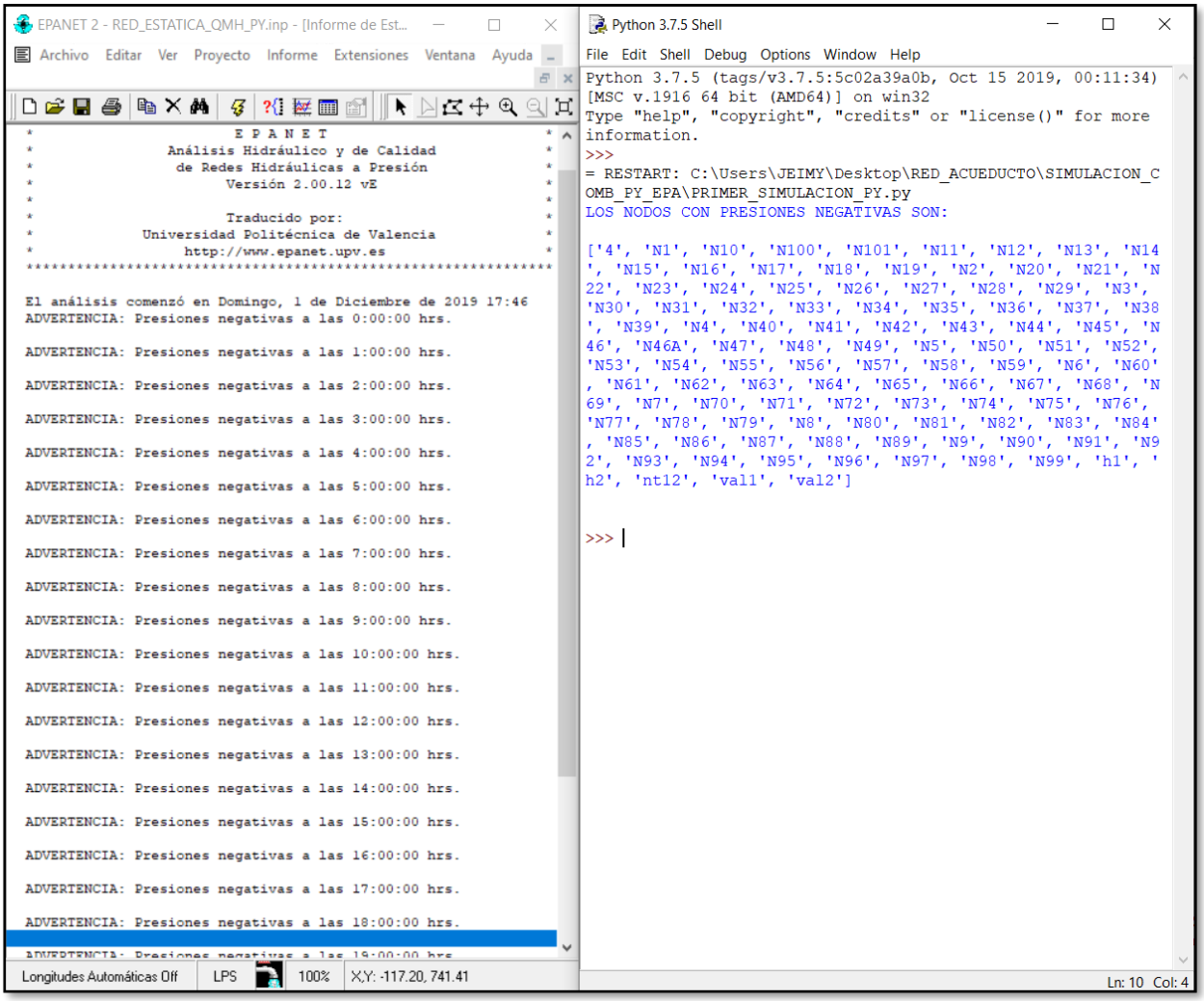


Ilustración 31. Resultados comparativos primera iteración en Epanet(izquierda), y la primera iteración con el uso de Python con el vínculo a Epanet (derecha).

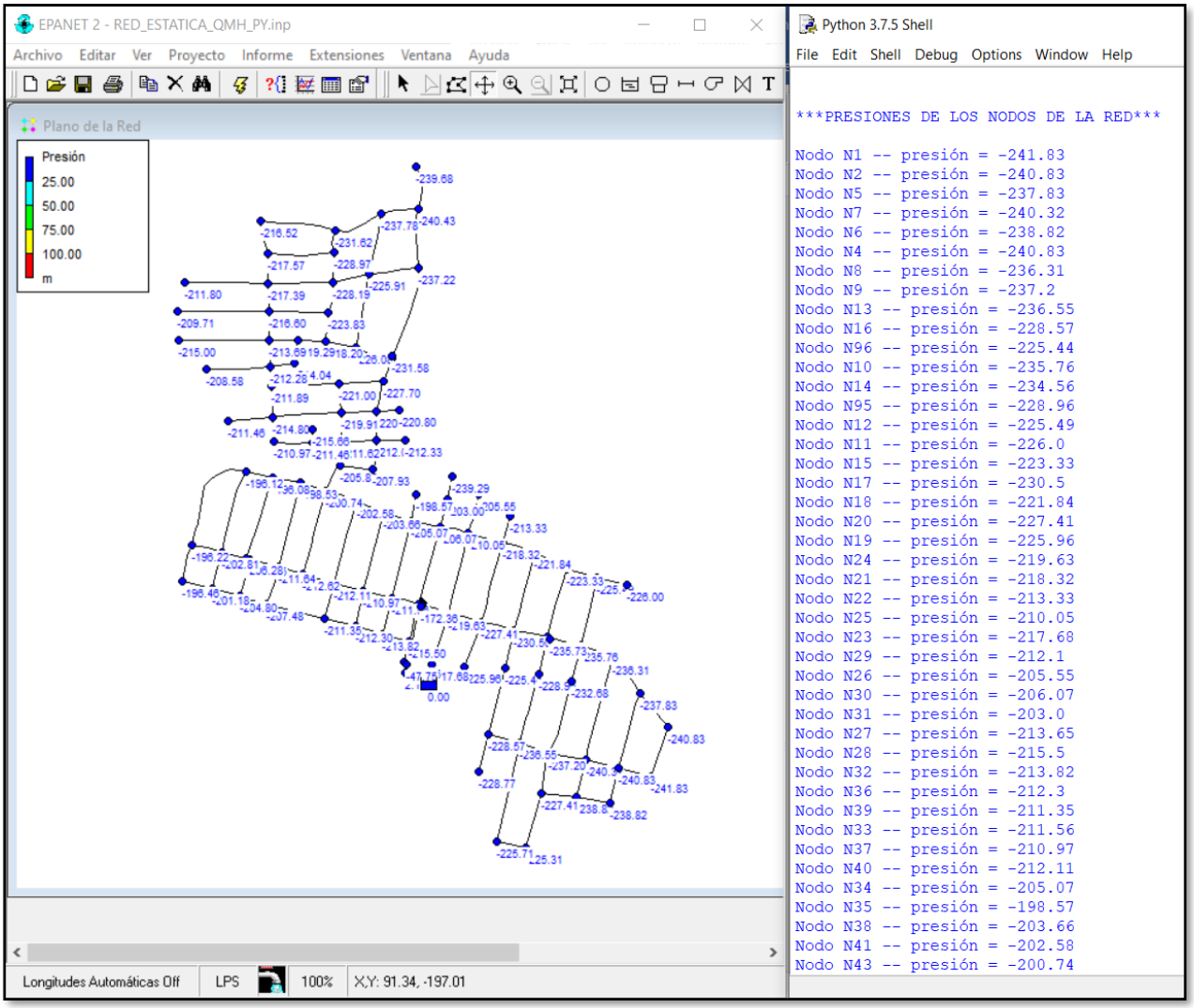


Ilustración 32. Contraste de visualización de presiones en los nodos de la red Epanet(izquierda), con el uso de la combinación Python-Epanet (derecha).

Las herramientas como imágenes y gráficos pueden incluir capacidades interactivas, lo que permite a los usuarios manipularlas y profundizar en la información allí mostrada. Las mismas han sido muy importantes para democratizar los datos y el análisis, poniendo a disposición de los programadores las ideas basadas en datos para toda la organización. (Gónzalez, 2018).

Basado en lo anterior se procede a mostrar cómo se visualizan ciertos comportamientos dentro el diseño por los dos métodos utilizados mediante gráficos.

En la ilustración 33, se visualiza el grafico en Epanet del patrón de comportamiento del consumo en la red el que como se mencionó anteriormente fue suministrado por la empresa Aguas Kpital Cúcuta.

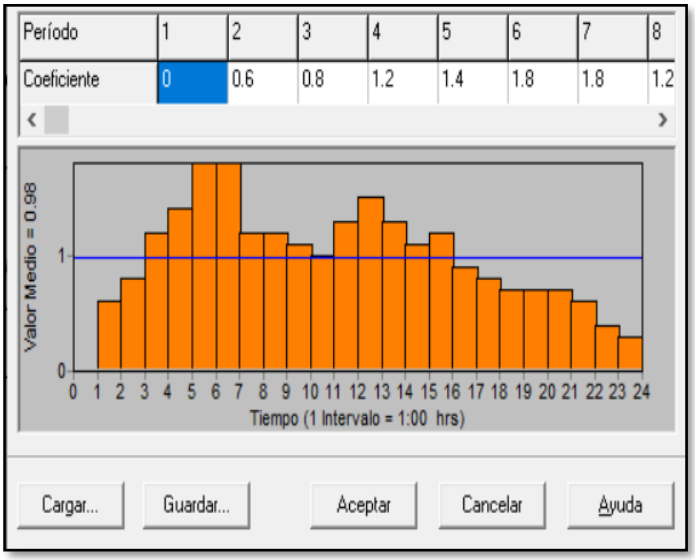


Ilustración 33. Patrón de consumo de la red

En la ilustración 34, se muestra el gráfico generado con la combinación de los softwares Python y Epanet en el que se representa el caudal en un periodo extendido de la tubería 25.

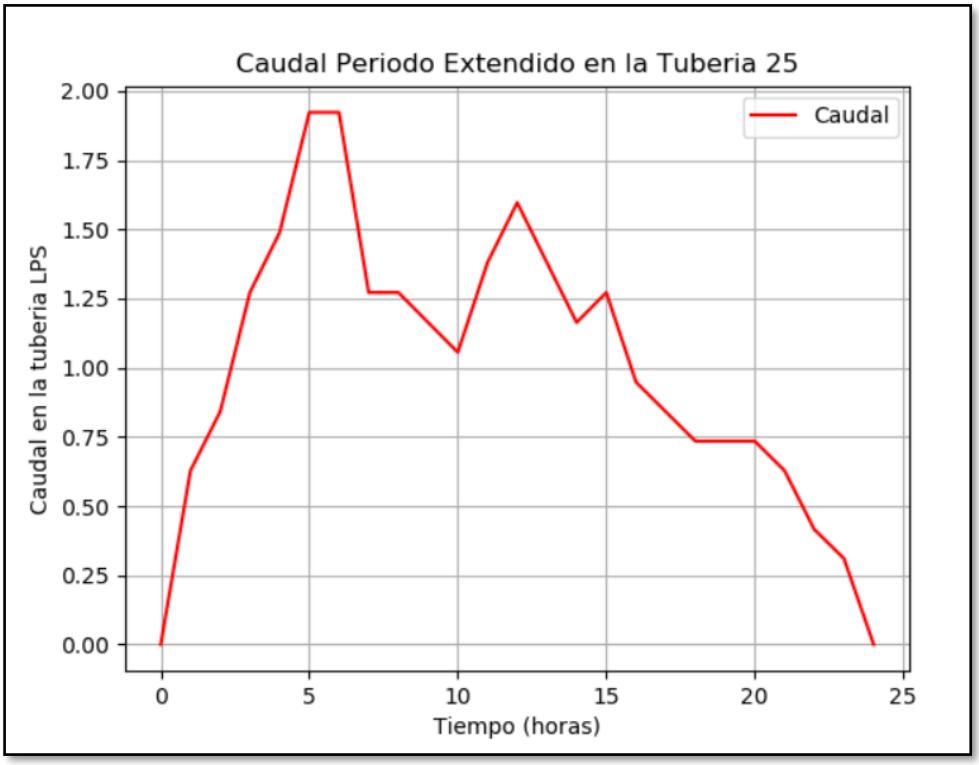


Ilustración 34. Caudal periodo extendido de la tubería 25

Podemos observar que las gráficas representan un comportamiento similar en las horas del día puesto que el patrón de consumo define claramente los lapsos en los que se presenta la mayor y la menor demanda, pero lo que es que realmente relevante es que con la unión de Epanet y Python podemos observar la velocidad, caudal, para cada una de las tuberías y de la misma forma la demanda y presión de los nodos que componen la red en periodos de tiempo. De tal manera que las librerías de visualización de datos juegan un papel importante en el diseño, pues medida que se acumulen grandes cantidades de datos, se necesita una forma rápida y fácil de obtener una visión general de sus datos y, por supuesto, las herramientas de visualización son una respuesta para esto.

6.3 Adecuación a la Normatividad Colombiana Actual

Las normas son documentos escritos, elaborados con la participación de los fabricantes de los productos, materiales y procesos, el gobierno, los usuarios y consumidores, las universidades y asociaciones de profesionales. Quienes, basados en resultados, experiencias y desarrollos tecnológicos, y en muchos casos con el apoyo de instituciones internacionales dedicadas, elaboran especificaciones técnicas y procesos en busca de diseños seguros y desarrollos industriales que permitan hacer las cosas bien, protegiendo el medio ambiente y la humanidad. (PSI, 2019) . De allí que se haga necesario realizar una adecuación de los programas de diseño haciendo que se cumpla con las exigencias de la normatividad colombiana vigente.

Para realizar una evidente comparación traemos a colación los resultados finales de las simulaciones en las que en el diseño en Epanet solo nos permite trabajar con las especificaciones inmersas en el programa que aunque es muy integral no satisface en su totalidad con las necesidades que se requieren para que el diseño sea realmente completo, mientras que en la simulación con la mezcla de Python y Epanet se puede llegar a establecer parámetros y condiciones que se acogen a la normatividad colombiana como se puede apreciar en la ilustración 35, donde se condicionan las presiones mínimas de diseño con relación a los porcentajes de área de incidencia de cada nodo, todo de acuerdo a la resolución 0330 del 8 de junio de 2017, para que de esta manera se pueda dar la aceptación del diseño, y todo esto por medio de algoritmos en Python ejecutado en el motor de cálculo de Epanet.

```
Python 3.7.5 Shell
File  Edit  Shell  Debug  Options  Window  Help
= RESTART: C:\Users\JEIMY\Desktop\RED_ACUEDUCTO\SIMULACION_COMB_PY_EPA\TERCERA_SIMULAC
ION_PY.py
***LA RED NO PRESENTA PRESIONES NEGATIVAS***

*** NODOS CON PRESIONES MENORES A 15 M.C.A***

Nodo N86 -- presión = 12.79
Nodo N90 -- presión = 13.53
Nodo Emb1 -- presión = 0.0

Porcentajes de area de nodos con presiones menores a 15 mca

N86-- % de area=1.08
N90-- % de area=0.54
Emb1-- % de area=-202.88


***DISEÑO ACEPTADO***

El sistema cumple con la normatividad Colombiana
Resolución 0330 del 8 de Junio de 2017
***el área a abastecer con presión dinámica menor a 10 m.c.a  es menor al 5%  del área
total****
                                                                          Ln: 129  Col: 4
```

Ilustración 35. Normatividad aplicada en la combinación de Python y Epanet para el diseño de redes de distribución

6.4 Cantidad de Iteraciones

En el diseño mediante simulaciones de proyectos constructivos siempre será importante el tiempo que se tarden los modelos en llegar a ser eficientes e integrales de tal manera que se propende por reducir al máximo el rango de iteraciones e incertidumbres que se pueden encontrar a lo largo del proyecto, todo esto sin afectar la calidad del mismo. Durante el proceso de la simulación para la red de ejemplo en Epanet fue necesaria correr el programa cerca de unas 20 veces, para poder llegar a obtener una red que cumpliere con los requisitos de servicio, mientras que con el uso de Python vinculado con Epanet por medio de la biblioteca epanettoolls solo se necesitó realizar 3 iteraciones. Esto se ve representado en el tiempo de diseño pues para

llevar a cabo cada iteración se tenía que realizar cambios en la red, donde como ya se hizo mención la diferencia entre los tiempos de ingreso de datos de los métodos es significativa, para poder evidenciar claramente se expone en la tabla 4 el número de iteraciones y el tiempo aproximado que se tarda en cada uno de los casos.

Tabla 6. *Comparación tiempo de iteraciones*

Software de diseño	**N. de iteraciones**	**Tiempo c/iteración (min)**	**Tiempo total(min)**
Epanet	20	5	100
Combinación Python y Epanet	3	3	9

En general, con la implementación del lenguaje de programación (Python) se logra reducir hasta en un 87% el número de iteraciones, (Ilustración 36). Asimismo, en la simulación con Epanet tardamos 100 minutos en iteraciones mientras que con la combinación de softwares pasamos a tan solo 9 minutos representado una disminución cerca de del 92% del tiempo.

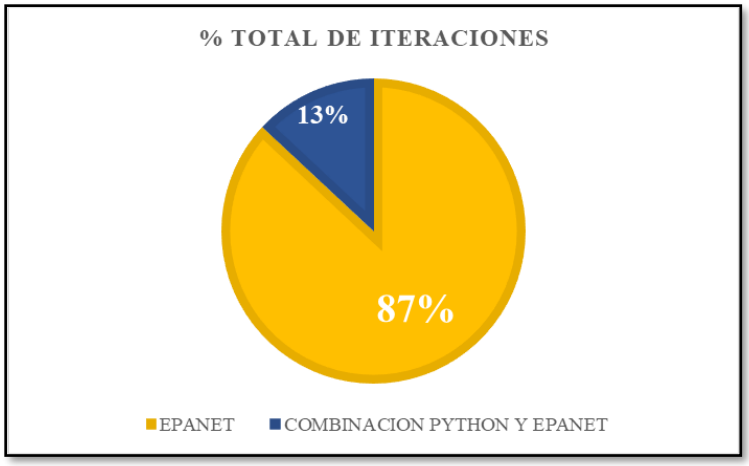
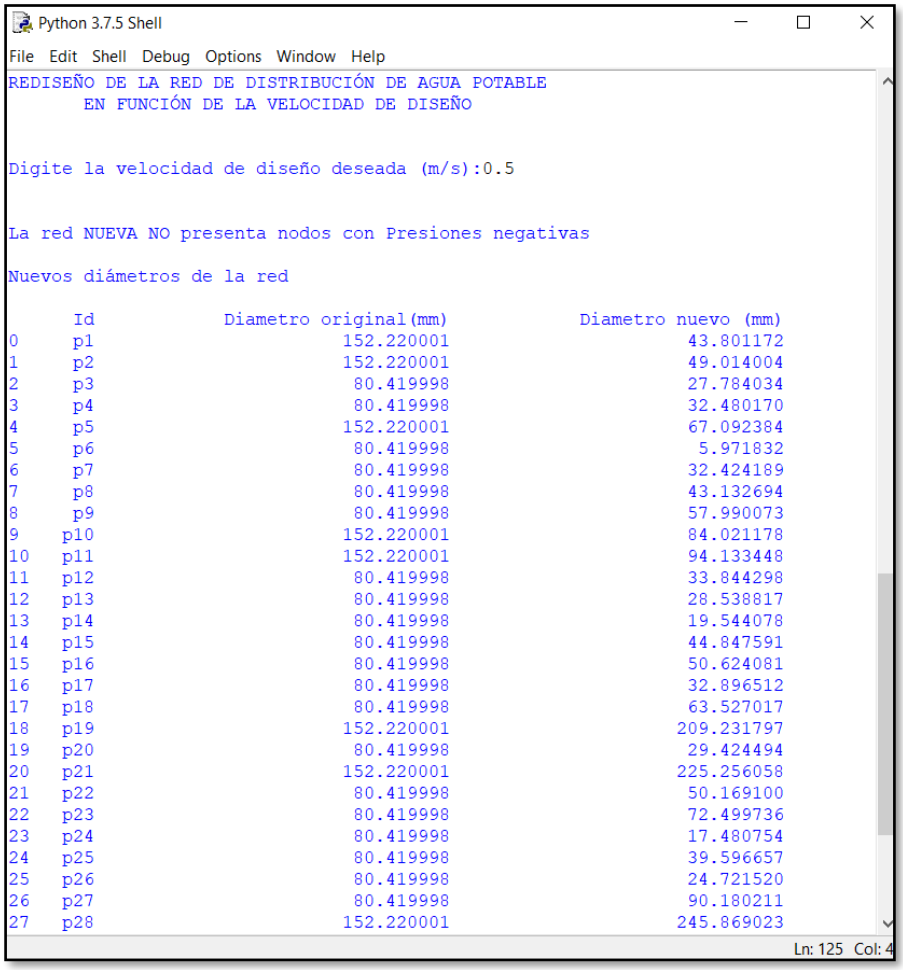


Ilustración 36. Porcentajes de Iteraciones

Finalmente es importante que mencionar que mediante algoritmos en Python efectuados en Epanet se logró desarrollar un código con él se pueda rediseñar la red en función de la velocidad que se desee en el sistema, de tal forma que nos imprima los nuevos diámetros para que se cumpla la dicha velocidad de diseño. (Ilustración 38). Cabe señalar que esto no es posible con solo el uso del software de diseño Epanet, por lo tanto, es indiscutible que mediante la combinación de los softwares se pueden alcanzar resultados que ayuden a optimizar en la eficiencia, calidad y economía de los proyectos acortando el tiempo de diseño.



```
Python 3.7.5 Shell
File  Edit  Shell  Debug  Options  Window  Help
REDISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE
       EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE DISEÑO


Digite la velocidad de diseño deseada (m/s):0.5


La red NUEVA NO presenta nodos con Presiones negativas

Nuevos diámetros de la red

      Id            Diametro original(mm)            Diametro nuevo (mm)
0     p1                      152.220001                       43.801172
1     p2                      152.220001                       49.014004
2     p3                       80.419998                       27.784034
3     p4                       80.419998                       32.480170
4     p5                      152.220001                       67.092384
5     p6                       80.419998                        5.971832
6     p7                       80.419998                       32.424189
7     p8                       80.419998                       43.132694
8     p9                       80.419998                       57.990073
9    p10                      152.220001                       84.021178
10   p11                      152.220001                       94.133448
11   p12                       80.419998                       33.844298
12   p13                       80.419998                       28.538817
13   p14                       80.419998                       19.544078
14   p15                       80.419998                       44.847591
15   p16                       80.419998                       50.624081
16   p17                       80.419998                       32.896512
17   p18                       80.419998                       63.527017
18   p19                      152.220001                      209.231797
19   p20                       80.419998                       29.424494
20   p21                      152.220001                      225.256058
21   p22                       80.419998                       50.169100
22   p23                       80.419998                       72.499736
23   p24                       80.419998                       17.480754
24   p25                       80.419998                       39.596657
25   p26                       80.419998                       24.721520
26   p27                       80.419998                       90.180211
27   p28                      152.220001                      245.869023
                                                                Ln: 125  Col: 4
```

*Ilustración 37.*Rediseño de la red

7. Conclusiones

En los diseños realizados se cumplen con todas las medidas expuestas en la resolución 0330 del 8 de junio de 2017, debido a que las presiones en el sistema se encuentran dentro del rango admitido y los diámetros en la tubería son mayores al diámetro mínimo requerido, asimismo cabe mencionar que el diseño es eficiente, ya que las zonas donde se presentan problemas de baja presión son mínimas comparadas con el área total del asentamiento, las cuales se encuentran por encima de los 10 m.c.a, garantizando así el abastecimiento de agua potable a la población, esto tanto para la simulación en el software Epanet como para la ejecutada con la combinación de Python y Epanet.

Mediante el aprendizaje del lenguaje de programación Python se diseñaron códigos algorítmicos que junto con el software de diseño (Epanet), se lograron visualizar resultados de una forma más rápida, confiable y fácil de interpretar , , de esta forma se realizarán los cambios respectivos en las características de los elementos de la red que hicieran que se cumplieran con las especificaciones hidráulicas requeridas; comprobando que Python nos ofrece un lenguaje que resulta ideal para el tratamiento de los datos gracias a sus funciones y a sus bibliotecas tanto gráficas como matemáticas que nos han permitido un gran número de posibilidades a la hora de las simulaciones, además los algoritmos pueden ser usados para cualquier red a diseñar solo se debe cambiar la ruta de búsqueda en el IDLE de Python del archivo formato Epanet

En el proyecto se realizó la simulación de la red de distribución de agua potable con el vínculo realizado entre Python y Epanet mediante la biblioteca epanettools en el que se

evidenciaron diferentes cualidades en cuanto a la visualización de datos y obtención de resultados demostrando que la combinación de los softwares es útil a la hora de reducir tiempos en los diseños y analizar resultados permitiendo ejecutar el modelado de forma rápida y eficiente.

Podemos fiarnos de los resultados obtenidos en nuestros códigos en Python ya que en la comparación con los resultados que nos ofrece Epanet, salen soluciones casi exactamente iguales, no obstante, con la combinación de Python-Epanet se consiguieron resultados en un menor tiempo reduciendo hasta en un 87% el número de iteraciones, asimismo se disminuyó en un 92% el tiempo de la simulación y ciertamente los datos resultantes son integrales en cuanto a la adecuación del diseño por medio de algoritmos conforme a la normatividad colombiana vigente.

Referencias bibliográficas

A. Ayad, H. A. (2013). Desarrollo de un modelo de simulación hidráulica para el agua y redes de gasoductos. *Alexandria Engineering Journal*.

Alcaraz, M. D. (2006). *Modelación y Simulación De Redes Hidráulicas a Presión Mediante Herramientas Informáticas.* Cartagena.

Bermejo, F. A. (2016). *Reducción del Tiempo de redes de distribución de agua, mediante el método de mallas, y la computación de altas prestaciones.*

Corrales, G. V. (2018). *Simulación y optimización dinámica de redes de agua en Python.* Sevilla.

Cualla, R. A. (2003). *Elementos de Diseño para Acueductos y Alcantarillados.* Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

D. Steffelbauer, D. F.-H. (2015). OOPNET: Un EPANET orientada a objetos en Python. *Procedia Ingeniería*.

Ernesto Arandia, B. J. (2018). Un paquete R para simulaciones EPANET. *Environmental Modelling & Software*.

Gónzalez, L. (6 de Julio de 2018). *ligdigonzalez.com*. Obtenido de Importancia de la visualización de datos: http://ligdigonzalez.com/importancia-de-la-visualizacion-de-datos/

Katherine A. Klise, M. B. (2017). "Un marco de software para evaluar la resiliencia del agua potable sistemas para desastres con un ejemplo de estudio de caso de terremoto. *Environmental Modelling & Software*.

Marco, B. S. (26 de Noviembre de 2019). *Introducción a la programación con Python*. Obtenido de IDLE, entorno de desarrollo de Python: http://www.mclibre.org/consultar/python/otros/python-idle.html

Ortiz, Y. G. (2017). *Modelación Matemática e Hidráulica del flujo en Pilares.*

P. Skworcowa, D. P. (2013). Optimización de los programas de bombas y válvulas en grandes instalaciones complejas sistemas de distribución de agua que utilizan el lenguaje de modelización GAMS. *Elsevier L*.

PBOT. (2015). *Plan básico de Ordenamiento territorial Pamplona*. Obtenido de Diagnostico PBOT Municipio de Pamplona: http://www.pamplona-nortedesantander.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestionyControl/DIAGN%C3%93STICO%20PBOT%20PAMPLONA.pdf

PSI. (Noviembre de 2019). Obtenido de La importancia de las normas en el diseño y la construcción: http://www.psi-sas.com/la-importancia-de-las-normas-en-el-diseno-y-la-construccion/

RAS. (2016). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. Colombia.

Sanchéz, D. I. (2017). *Diseño implementado con herramientas tecnologica de las redes de acueducto y alcantarillado sanitario del asentamiento Jose Bernal municipio de Cucuta Norte de Santander.* Paplona, Noste de Santander.

Shoujun Zhoua, H. L. (2017). Una Novedosa Plataforma de Simulación Hidráulica de Fuentes Múltiples y Red de Calefacción Experimental Multianillo. *Procedia Engineering*.

Solórzano, J. S. (2017). *Ejercicios básicos de mecánica de fluidos e hidráulica aplicados a través del software de distribución gratuita EPANET 2.0.* Bogotá, Colombia: Departamento de Publicaciones y Comunicación Gráfica de la Universidad Piloto de Colombia.

Steffelbauer, D. (2015). OOPNET: Un EPANET orientada a objetos en Python. *Procedia Ingeniería*, 3.

Tiago Luna, J. R. (2018). Mejora de la eficiencia energética en sistemas de abastecimiento de agua con bomba en la optimización de horarios. *Journal of Cleaner Production*.

Todini, E. y. (1987). "A gradient method for the analysis of pipe networks". I. *nternational Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester Polytechnic, UK,* .

Apéndices

Apéndice 1. Áreas y demanda de cada nodo

NODO	AREA (m2)	AREA (ha)	POBLACION habitantes	DEMANDA (l/s)
1	1404.12	0.14	42	0.16
2	1638.67	0.16	49	0.19
3	1541.08	0.15	46	0.18
4	4681.22	0.47	140	0.55
5	3513.59	0.35	105	0.41
6	1938.69	0.19	58	0.23
7	3200.49	0.32	96	0.37
8	5000.82	0.50	150	0.58
9	3848.31	0.38	115	0.45
10	2860.68	0.29	86	0.33
11	1268.43	0.13	38	0.15
12	2744.97	0.27	82	0.32
13	3176.90	0.32	95	0.37
14	3063.42	0.31	92	0.36
15	3209.97	0.32	96	0.37
16	3281.99	0.33	98	0.38
17	3352.46	0.34	101	0.39
18	3482.76	0.35	104	0.41
19	2907.21	0.29	87	0.34
20	2800.46	0.28	84	0.33
21	2900.64	0.29	87	0.34
22	1052.80	0.11	32	0.12
23	2074.47	0.21	62	0.24
24	3238.59	0.32	97	0.38
25	3145.67	0.31	94	0.37
26	1325.61	0.13	40	0.15
27	562.61	0.06	17	0.07
28	1492.80	0.15	45	0.17
29	2837.93	0.28	85	0.33
30	2662.50	0.27	80	0.31
31	1097.57	0.11	33	0.13
32	1857.57	0.19	56	0.22
33	2788.52	0.28	84	0.33
34	2532.34	0.25	76	0.30
35	2379.77	0.24	71	0.28
36	2012.41	0.20	60	0.23
37	2815.11	0.28	84	0.33
38	3005.92	0.30	90	0.35
39	2275.06	0.23	68	0.27
40	3282.85	0.33	98	0.38
41	2800.17	0.28	84	0.33
42	2735.64	0.27	82	0.32
43	2813.55	0.28	84	0.33
44	2533.53	0.25	76	0.30
45	2396.35	0.24	72	0.28

NODO	AREA (m2)	AREA (ha)	POBLACION habitantes	DEMANDA (l/s)
46	1400.53	0.14	42	0.16
46A	1400.53	0.14	42	0.16
47	2852.81	0.29	86	0.33
48	2513.71	0.25	75	0.29
49	4480.81	0.45	134	0.52
50	2472.72	0.25	74	0.29
51	1627.58	0.16	49	0.19
52	2872.63	0.29	86	0.34
53	1052.39	0.11	32	0.12
54	1426.38	0.14	43	0.17
55	1542.63	0.15	46	0.18
56	1739.04	0.17	52	0.20
57	873.22	0.09	26	0.10
58	2239.95	0.22	67	0.26
59	534.18	0.05	16	0.06
60	1462.19	0.15	44	0.17
61	2181.10	0.22	65	0.25
62	2737.93	0.27	82	0.32
63	3605.94	0.36	108	0.42
64	1789.60	0.18	54	0.21
65	2979.65	0.30	89	0.35
66	2473.22	0.25	74	0.29
67	4165.54	0.42	125	0.49
68	3325.41	0.33	100	0.39
69	1637.36	0.16	49	0.19
70	1311.73	0.13	39	0.15
71	1097.23	0.11	33	0.13
72	1918.56	0.19	58	0.22
73	1682.36	0.17	50	0.20
74	2282.83	0.23	68	0.27
75	3246.85	0.32	97	0.38
76	2348.22	0.23	70	0.27
77	3410.88	0.34	102	0.40
78	2500.98	0.25	75	0.29
79	4352.92	0.44	131	0.51
80	4900.98	0.49	147	0.57
81	2495.84	0.25	75	0.29
82	3291.34	0.33	99	0.38
83	2498.42	0.25	75	0.29
84	2171.69	0.22	65	0.25
85	5023.73	0.50	151	0.59
86	2797.64	0.28	84	0.33
87	4900.19	0.49	147	0.57
88	3239.25	0.32	97	0.38
89	3474.04	0.35	104	0.41
90	1389.09	0.14	42	0.16

NODO	AREA (m2)	AREA (ha)	POBLACION habitantes	DEMANDA (l/s)
91	2345.43	0.23	70	0.27
92	1917.09	0.19	58	0.22
93	4005.30	0.40	120	0.47
94	2776.61	0.28	83	0.32
95	2648.02	0.26	79	0.31
96	2582.54	0.26	77	0.30
97	3981.54	0.40	119	0.46
98	2476.13	0.25	74	0.29
99	2589.95	0.26	78	0.30
100	1597.58	0.16	48	0.19
101	1759.94	0.18	53	0.21
102	115000.00	11.50	3450	13.42

Apéndice 2. Reporte de los nodos a las 6hrs hora más crítica periodo extendido

Tabla de Red - Nudos en 6:00 Hrs			
	Demanda	Altura	Presión
ID Nudo	LPS	m	m
Conexión N1	0.16	317.37	13.37
Conexión N2	0.2	317.37	14.37
Conexión N5	0.41	317.38	17.38
Conexión N7	0.38	317.35	14.85
Conexión N6	0.23	317.35	16.35
Conexión N4	0.54	317.36	14.36
Conexión N8	0.58	317.39	18.89
Conexión N9	0.45	317.35	17.95
Conexión N13	0.38	317.36	18.56
Conexión N16	0.38	317.36	26.36
Conexión N96	0.31	317.43	29.03
Conexión N10	0.34	317.4	19.4
Conexión N14	0.36	317.43	20.63
Conexión N95	0.31	317.39	26.19
Conexión N12	0.32	317.4	29.4
Conexión N11	0.14	317.4	28.9
Conexión N15	0.38	317.41	31.41
Conexión N17	0.4	317.5	23.7
Conexión N18	0.41	317.41	32.11
Conexión N20	0.32	317.68	25.23

Tabla de Red - Nudos en 6:00 Hrs			
	Demanda	Altura	Presión
ID Nudo	LPS	m	m
Conexión N19	0.34	317.67	26.67
Conexión N24	0.38	317.88	30.23
Conexión N21	0.34	317.4	34.4
Conexión N22	0.13	317.4	39.4
Conexión N25	0.36	317.27	41.77
Conexión N23	0.23	317.88	32.18
Conexión N29	0.32	317.48	33.98
Conexión N26	0.16	317.27	46.27
Conexión N30	0.31	316.71	45.21
Conexión N31	0.13	316.45	49.85
Conexión N27	0.07	317.15	34.5
Conexión N28	0.18	317.15	32.65
Conexión N32	0.22	316.93	35.83
Conexión N36	0.23	316.67	38.82
Conexión N39	0.27	316.4	40.85
Conexión N33	0.32	316.94	38.09
Conexión N37	0.32	316.67	40.27
Conexión N40	0.38	316.38	40.18
Conexión N34	0.29	316.62	46.12
Conexión N35	0.27	316.61	52.61
Conexión N38	0.34	316.48	47.98
Conexión N41	0.32	316.31	50.06
Conexión N43	0.32	316.11	53.81
Conexión N42	0.32	316.19	40.74
Conexión N44	0.29	316.14	41.84
Conexión N46	0.16	316.11	46.61
Conexión N45	0.29	316.11	55.46
Conexión N47	0.32	316.1	57.7
Conexión N46A	0.16	316.1	47.3
Conexión N49	0.52	316.09	57.59
Conexión N48	0.29	316.09	50.79
Conexión N50	0.29	316.09	57.39
Conexión N51	0.2	315.91	54.71
Conexión N52	0.34	315.8	53.7
Conexión N54	0.16	315.69	50.49
Conexión N53	0.13	315.69	50.19
Conexión N55	0.18	315.67	50.87
Conexión N56	0.2	315.55	51.35
Conexión N58	0.27	315.45	52.25
Conexión N62	0.32	315.4	48.65
Conexión N57	0.11	315.55	47.15
Conexión N60	0.16	315.62	42.77
Conexión N59	0.05	315.62	42.62
Conexión N61	0.25	315.56	43.46
Conexión N63	0.41	315.39	51.99
Conexión N65	0.34	315.51	42.91

Tabla de Red - Nudos en 6:00 Hrs			
	Demanda	Altura	Presión
ID Nudo	LPS	m	m
Conexión N66	0.29	315.25	52.05
Conexión N64	0.22	315.36	36.36
Conexión N67	0.49	314.92	33.42
Conexión N68	0.4	314.76	38.66
Conexión N69	0.2	314.75	46.45
Conexión N70	0.16	314.79	45.19
Conexión N71	0.13	314.84	50.34
Conexión N74	0.27	314.78	50.78
Conexión N72	0.22	314.9	52
Conexión N73	0.2	314.9	55.7
Conexión N75	0.38	314.77	49.47
Conexión N77	0.4	314.7	48
Conexión N79	0.5	314.69	27.49
Conexión N80	0.58	314.67	38.77
Conexión N81	0.29	314.67	36.47
Conexión N76	0.27	314.7	40.8
Conexión N82	0.38	314.66	47.26
Conexión N83	0.29	314.65	52.85
Conexión N78	0.29	314.69	54.89
Conexión N86	0.32	314.65	24.25
Conexión N87	0.58	314.65	26.9
Conexión N88	0.38	314.64	33.04
Conexión N84	0.25	314.65	35.7
Conexión N89	0.41	314.64	48.14
Conexión N85	0.59	314.64	47.09
Conexión N90	0.16	314.65	25
Conexión N3	0.18	317.35	16.35
Conexión N91	0.27	317.35	27.75
Conexión N92	0.22	317.34	29.84
Conexión N93	0.47	317.34	29.44
Conexión N101	0.2	317.36	26.16
Conexión N94	0.32	317.37	22.47
Conexión N97	0.47	316.16	45.86
Conexión N98	0.29	316.11	48.71
Conexión N99	0.31	316.09	52.39
Conexión N100	0.18	316.09	57.14
Conexión nc1	0	360.35	76.35
Conexión nt12	0	360.23	77.55
Conexión NEXT1	13.5	315.99	17.99
Conexión Nval	0	318.2	33.8
Conexión val2	0	359.99	75.59
Conexión NH2	0	317.43	20.33
Conexión h1	0	315.57	36.57
Conexión h2	0	317.56	23.76
Conexión 1	0	316.68	40.28
Conexión NT12.1	0	360.03	75.63
Conexión H3	0	316.68	40.28
Conexión 1H2	0	317.56	23.76
Conexión 1H1	0	315.57	36.57

Apéndice 3 Conductos de la red a las 6hrs hora más crítica en un periodo extendido

Tabla de Red - Líneas en 6:00 Hrs				
	Diámetro	Caudal	Velocidad	Pérd. Unit.
ID Línea	mm	LPS	m/s	m/km
Tubería p1	152.22	-0.78	0.04	0.03
Tubería p2	152.22	-0.98	0.05	0.04
Tubería p3	80.42	0.29	0.06	0.1
Tubería p4	80.42	-0.47	0.09	0.21
Tubería p5	152.22	-1.86	0.1	0.14
Tubería p6	80.42	0.05	0.01	0.01
Tubería p7	80.42	-0.28	0.06	0.1
Tubería p8	80.42	-0.38	0.08	0.16
Tubería p9	80.42	-0.96	0.19	0.73
Tubería p10	152.22	-2.95	0.16	0.36
Tubería p11	152.22	-4.17	0.23	0.7
Tubería p12	80.42	-0.66	0.13	0.38
Tubería p13	80.42	0.08	0.02	0.01
Tubería p14	80.42	-0.14	0.03	0.02
Tubería p15	80.42	-0.39	0.08	0.17
Tubería p16	80.42	1.04	0.2	0.82
Tubería p17	80.42	0.56	0.11	0.28
Tubería p18	80.42	-0.2	0.04	0.05
Tubería p19	152.22	-8.75	0.48	2.91
Tubería p20	80.42	-0.34	0.07	0.13
Tubería p21	152.22	-11.39	0.63	4.62
Tubería p22	80.42	0.42	0.08	0.19
Tubería p23	80.42	1.97	0.39	2.59
Tubería p24	80.42	0.13	0.02	0.02
Tubería p25	80.42	1.92	0.38	2.92
Tubería p26	80.42	-0.23	0.05	0.06
Tubería p27	80.42	3.07	0.6	5.74
Tubería p28	152.22	-15.07	0.83	8.81
Tubería p29	80.42	0.16	0.03	0.02
Tubería p30	80.42	4.47	0.88	14.8
Tubería p31	152.22	13.63	0.75	7.19
Tubería p32	152.22	-17.38	0.95	7.32
Tubería p33	80.42	-0.07	0.01	0.01
Tubería p34	80.42	-3.03	0.6	6.61
Tubería p35	80.42	2.78	0.55	6.16

Tabla de Red - Líneas en 6:00 Hrs				
	Diámetro	Caudal	Velocidad	Pérd. Unit.
ID Línea	mm	LPS	m/s	m/km
Tubería p36	80.42	3	0.59	7.21
Tubería p37	80.42	2.94	0.58	6.55
Tubería p38	80.42	-0.44	0.09	0.2
Tubería p39	103.42	8.24	0.98	15.57
Tubería p41	80.42	-0.18	0.04	0.03
Tubería p42	80.42	3.17	0.62	7.82
Tubería p43	80.42	0.54	0.11	0.3
Tubería p44	80.42	2.17	0.43	3.1
Tubería p45	152.22	7.92	0.44	2.52
Tubería p46	80.42	0.27	0.05	0.09
Tubería p47	152.22	9.53	0.52	3.56
Tubería p48	80.42	-1.63	0.32	1.85
Tubería p49	80.42	0.89	0.18	0.63
Tubería p50	152.22	-10.82	0.59	4.67
Tubería p51	152.22	11.39	0.63	4.71
Tubería p52	80.42	2.44	0.48	4.64
Tubería p53	80.42	0.92	0.18	0.66
Tubería p54	80.42	1.2	0.24	1.36
Tubería p55	80.42	0.88	0.17	0.73
Tubería p56	80.42	0.57	0.11	0.29
Tubería p57	80.42	0.23	0.05	0.07
Tubería p58	80.42	0.52	0.1	0.29
Tubería p59	80.42	0.2	0.04	0.04
Tubería p60	80.42	0.39	0.08	0.18
Tubería p61	80.42	-0.14	0.03	0.02
Tubería p62	80.42	-0.02	0	0
Tubería p63	152.22	11.75	0.65	5.37
Tubería p64	152.22	8.5	0.47	2.73
Tubería p65	152.22	8.16	0.45	2.65
Tubería p66	80.42	0.13	0.02	0.02
Tubería p67	80.42	0.85	0.17	0.67
Tubería p68	80.42	3.06	0.6	7.74
Tubería p69	80.42	1.88	0.37	2.96
Tubería p70	80.42	1.58	0.31	2
Tubería p71	80.42	1.31	0.26	1.63
Tubería p72	80.42	0.11	0.02	0.02
Tubería p73	152.22	7.03	0.39	2.04
Tubería p74	80.42	-0.05	0.01	0.01
Tubería p75	80.42	1.24	0.24	1.32
Tubería p76	80.42	1.84	0.36	2.86
Tubería p77	80.42	0.41	0.08	0.18
Tubería p78	80.42	1.25	0.25	1.41
Tubería p79	80.42	2.08	0.41	2.94
Tubería p80	152.22	5.57	0.31	1.26

Tabla de Red - Líneas en 6:00 Hrs

	Diámetro	Caudal	Velocidad	Pérd. Unit.
ID Línea	mm	LPS	m/s	m/km
Tubería p81	80.42	1.17	0.23	1.14
Tubería p82	80.42	4.18	0.82	13.86
Tubería p83	80.42	2.02	0.4	3.11
Tubería p84	80.42	0.51	0.1	0.28
Tubería p85	80.42	-0.96	0.19	0.88
Tubería p86	80.42	1.36	0.27	1.76
Tubería p87	80.42	0.24	0.05	0.07
Tubería p88	80.42	-1.49	0.29	2.05
Tubería p89	80.42	2.04	0.4	3.59
Tubería p90	80.42	0.2	0.04	0.04
Tubería p91	80.42	0.38	0.07	0.14
Tubería p92	80.42	1.63	0.32	2.29
Tubería p93	80.42	1.68	0.33	1.9
Tubería p94	80.42	0.45	0.09	0.2
Tubería p95	80.42	1.1	0.22	0.93
Tubería p96	80.42	0.38	0.07	0.16
Tubería p97	80.42	1.28	0.25	1.46
Tubería p98	80.42	0.91	0.18	0.77
Tubería p100	80.42	0.1	0.02	0.01
Tubería p101	80.42	1.05	0.21	1.03
Tubería p102	80.42	0.29	0.06	0.09
Tubería p103	80.42	0.29	0.06	0.09
Tubería p104	80.42	0.73	0.14	0.46
Tubería p105	80.42	0.24	0.05	0.07
Tubería p106	80.42	0.6	0.12	0.32
Tubería p107	80.42	0.26	0.05	0.08
Tubería p108	80.42	0.73	0.14	0.53
Tubería p109	80.42	0.29	0.06	0.11
Tubería p110	80.42	0.18	0.03	0.03
Tubería p111	80.42	0.19	0.04	0.03
Tubería p112	80.42	0.16	0.03	0.02
Tubería p113	80.42	0.24	0.05	0.07
Tubería p114	80.42	-0.64	0.13	0.42
Tubería p115	80.42	3.94	0.78	13.63
Tubería p116	80.42	-2.15	0.42	3.7
Tubería p117	80.42	1.58	0.31	1.78
Tubería p118	152.22	-6.06	0.33	1.41
Tubería p119	80.42	0.21	0.04	0.05
Tubería p120	80.42	0.34	0.07	0.13
Tubería p121	80.42	-0.62	0.12	0.38
Tubería p122	80.42	-0.16	0.03	0.02
Tubería p123	80.42	0.22	0.04	0.05
Tubería p124	80.42	-0.35	0.07	0.14
Tubería p125	80.42	0.3	0.06	0.1

Tabla de Red - Líneas en 6:00 Hrs

	Diámetro	Caudal	Velocidad	Pérd. Unit.
ID Línea	mm	LPS	m/s	m/km
Tubería p126	80.42	0.08	0.02	0.01
Tubería p127	80.42	-0.38	0.08	0.14
Tubería p128	80.42	0.2	0.04	0.04
Tubería p129	80.42	0.51	0.1	0.23
Tubería p130	80.42	-0.47	0.09	0.21
Tubería p131	80.42	0.21	0.04	0.05
Tubería p132	80.42	-0.49	0.1	0.27
Tubería p133	80.42	2.13	0.42	3.14
Tubería p134	80.42	0.54	0.11	0.29
Tubería p135	80.42	1.13	0.22	1.18
Tubería p136	80.42	0.14	0.03	0.02
Tubería p137	80.42	0.85	0.17	1.89
Tubería p138	80.42	0.7	0.14	0.5
Tubería p139	80.42	0.16	0.03	0.02
Tubería p140	80.42	0.24	0.05	0.07
Tubería p141	80.42	0.06	0.01	0.01
Tubería p142	80.42	-1.26	0.25	1.33
Tubería p143	80.42	-0.97	0.19	0.83
Tubería p144	80.42	0.79	0.16	0.59
Tubería P149	293.07	44.05	0.65	10.02
Tubería P150	293.07	44.05	0.65	4.48
Tubería P146	80.42	-0.26	0.05	0.08
Tubería P147	103.42	5.31	0.63	6.45
Tubería P148	152.22	-13.5	0.74	4.64
Tubería P145	152.22	28.97	1.59	120.43
Tubería P151	293.07	44.05	0.65	2.6
Tubería P152	152.22	4.17	0.23	0.4
Tubería P153	152.22	0	0	0
Tubería P154	152.22	0	0	0
Tubería P155	103.42	0	0	0
Tubería P156	198.21	44.05	1.43	7.69
Tubería P157	103.42	5.31	0.63	3.88
Tubería P158	152.22	8.75	0.48	38.54
Tubería P159	80.42	-4.4	0.87	122.74
Válvula 5	103.42	44.05	5.24	41.79