

UNIVERSIDAD DE MATANZAS
FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA



PROPUESTAS PARA LA APLICACIÓN DEL SOFTWARE PROFESIONAL EPANET
2.0 EN EL ANÁLISIS DE LA RED HIDRÁULICA DEL MUNICIPIO UNIÓN DE
REYES.

Trabajo de diploma presentado en opción al título de Ingeniero Mecánico.

GABRIEL BONET ARENCIBIA

Matanzas, 2020

**UNIVERSIDAD DE MATANZAS
FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



PROPUESTAS PARA LA APLICACIÓN DEL SOFTWARE PROFESIONAL EPANET 2.0 EN EL ANÁLISIS DE LA RED HIDRÁULICA DEL MUNICIPIO UNIÓN DE REYES.

Trabajo de diploma presentado en opción al título de Ingeniero Mecánico.

Autor: GABRIEL BONET ARENCIBIA

Tutores: Dr.C. Yanán Camaraza Medina
M.Sc. Marta Valera de Armas

Matanzas, 2020

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas «Camilo Cienfuegos» a darle el uso que estime más conveniente.

Gabriel Bonet Arencibia

Nota de aceptación del tribunal

PRESIDENTE _____

MIEMBRO _____

MIEMBRO _____

MIEMBRO _____

MIEMBRO _____

MIEMBRO _____

Resumen

En esta tesis de ingeniería se aplica una reevaluación de los parámetros de operación de la red hidráulica del poblado Unión de Reyes pues presenta dificultades técnicas que reducen la eficiencia y calidad del servicio, para esto se realizó una simulación mediante el programa Epanet 2.0 donde se determina valores de presión, caudal y el factor de fricción en el interior de los tubos empleando la variante de Darcy –Weibash, con este objetivo fue necesario realizar un esquema del funcionamiento del sistema en conjunto (bombas, embalses tanques y red de tuberías), que permite en un futuro la evaluación de la instalación, para que de esta forma se pueda apreciar cualquier deficiencia, y se garantice así su correcto funcionamiento, la conservación de su estado técnico y prolongación de su vida útil. Se proporciona un análisis detallado del funcionamiento del software dando a conocer todas sus herramientas y componentes que permiten realizar una simulación de cualquier red hidráulica, incluso de otros sistemas que trabajen con flujos compresibles. Se hace una descripción del estado actual de la red y de sus parámetros físicos, dando a conocer los datos que necesita el software para la correcta simulación. Al dibujar el esquema y colocar sus parámetros para hacer la simulación se tiene como uno de los objetivos un mejor entendimiento de la red por parte de los operarios y sobre todo del nuevo personal, logrando así que se puedan hacer correcciones de dificultades y evaluaciones para futuros trabajos en la red. Además es establecida una comparación entre los resultados obtenidos con el uso del software y la aplicación del método de Hardy Cross realizado en investigaciones anteriores. Al comparar los resultados se demuestra la fiabilidad de la simulación creada ya que el error promedio no excede el 2.0 porciento y se hace referencia a la ecuación utilizada para este procedimiento comprobatorio de modo que cualquier persona puede corroborar los datos.

Summary

In this engineering thesis, a reevaluation of the operating parameters of the hydraulic network of the Unión de Reyes town is applied, as it presents technical difficulties that reduce the efficiency and quality of the service. For this, a simulation was carried out using the Software Epanet 2.0, where it is determined values of pressure, flow and the friction factor inside the pipes using the Darcy-Weibash variant. In order to accomplish this objective it was necessary to draw up a diagram of the system's operation as a whole (pumps, tank reservoirs and pipe network), which in the future it allows the evaluation of the installation, so that any deficiencies can be seen, thus guaranteeing its correct operation, the preservation of its technical state and prolonging its useful life. A detailed analysis of the operation of the software was made, revealing all its tools and components that allow simulating any hydraulic network, even other systems that work with incompressible flows. A description is made of the current state of the network and its physical parameters, disclosing the data that the software needs for the correct simulation. When drawing the diagram and placing its parameters to make the simulation, one of the objectives is to have a better understanding of the network by the operators and especially by the new personnel, thus making it possible to make corrections of difficulties and evaluations for future works on the net. This thesis also seeks to establish a comparison between the results obtained with the use of the software and the application of the Hardy Cross method carried out in previous research. Comparing the results demonstrates the reliability of the simulation created since the average error does not exceed 2.0 percent and the equation used for this testing procedure is referenced so that anyone can corroborate the data.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE EN EL ANÁLISIS DE TUBERÍAS	4
1.1 Generalidades	4
1.2 Regímenes de corriente de líquidos y gases en los tubos	4
1.3 Ecuaciones fundamentales para flujo incompresible	6
1.4 Análisis dimensional del problema de fricción para flujo incompresible	8
1.4.1 Determinación del factor de fricción para el cálculo de pérdidas de presión por el interior de tubos rectos	9
1.5 Problemas sobre líneas de tuberías. Tubos múltiples	13
1.5.1 Solución de problemas sobre tubos múltiples mediante el Método de Cross	16
1.6 Principales resultados de investigaciones y aportes más recientes a la solución de problemas de flujo en tuberías en redes hidráulicas en Cuba	20
1.7 Procedimientos computacionales para la solución de problemas de flujo en tuberías	21
CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS REQUERIDOS PARA EL USO DEL SOFTWARE EPANET 2.0	23
2.1 Generalidades	23
2.1.1 Breve descripción de la red de distribución hidráulica Unión de Reyes	23
2.2 Descripción del software empleado: Epanet 2.0	25
2.2.1 Prestaciones para la confección de modelos hidráulicos	25
2.2.2 Pasos para utilizar Epanet	26
2.3 Entorno de trabajo de Epanet	26
2.3.1 La barra de menús	26
2.3.2 Menú de archivos	27
2.3.3 Menú de edición	27
2.3.4 Menú ver	28
2.3.5 Menú de proyecto	28
2.3.6 Menú de informe	28
2.3.7 Menú de ventana	29
2.3.8 Menú de ayuda	29
2.4 La barra de herramientas estándar	30
2.4.1 La barra de herramientas estándar	30
2.4.2 La barra de herramientas del esquema	31
2.4.3 La barra de estado	31
2.5 Componentes físicos	32
2.5.1 Nodos de caudal	32

2.5.2	Embalses	33
2.5.3	Depósitos	33
2.5.4	Emisores	34
2.5.5	Tuberías	34
2.5.6	Pérdidas menores	36
2.5.7	Uso de la bomba en Epanet	37
2.5.8	Válvulas	38
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS		41
3.1	Antecedentes	41
3.2	Red de distribución	41
3.3	Análisis hidráulico de la conductora de suministro Piloto	42
3.4	Análisis hidráulico de la conductora de suministro Fumerito	45
3.5	Análisis de los resultados obtenidos por el software Epanet	45
3.6	Comparación entre los resultados obtenidos con Epanet y el método de Cross	46
3.7	Desarrollo de la composición numérica de la matriz de flujo de Epanet	48
CONCLUSIONES		60
RECOMENDACIONES		61

INTRODUCCIÓN

El agua es vital para los seres humanos, que la necesitan para cocinar, beber, lavarse y regar los cultivos. Además, en los procesos industriales se emplean cantidades inmensas. El agua es un recurso limitado que debe recogerse y distribuirse cada vez más cuidadosamente. La invención de la bomba en Inglaterra a mediados del siglo XVI impulsó las posibilidades de desarrollo de sistemas de suministro de agua. En Londres la primera obra construida con el objetivo de garantizar el bombeo de agua se finalizó en el año 1562. Se bombeaba agua de río a un embalse a unos 37 m por encima del nivel del Támesis, y desde el embalse se distribuía a los edificios vecinos a través de tuberías, aprovechando la fuerza de la gravedad, [1-3].

A partir del siglo XIX el aumento de la población en las zonas urbanas obligó a realizar grandes obras de conducción y tratamiento de las aguas. Se comenzaron a utilizar las instalaciones de conducción de sifón basadas en el empleo de distintas presiones. Los acueductos modernos han modificado su estructura y están integrados por grandes tuberías de hierro, acero o cemento. Su función es suministrar agua a grandes zonas secas (California) y distribuirla en amplias zonas de regadío (Francia).

En la actualidad el suministro de agua casi en su totalidad se efectúa mediante sistemas complejos de tuberías, conocidos como redes de distribución hidráulicas, los cuales consisten en diversas líneas de tuberías interconectadas entre si y el caudal consumido es suministrado mediante bombas, las cuales generalmente emplean como fuente energética la electricidad, [4-6].

En Cuba se realiza un gran esfuerzo para satisfacer las exigencias energéticas de la nación donde se invierte cada día más de un millón de pesos en divisas para garantizar de forma equitativa el consumo racional y humano de fuentes energéticas. Producir o prestar servicios con un menor consumo de energía es un objetivo de creciente importancia dentro de la actividad empresarial por su repercusión sobre la eficiencia en la gestión económica, su efecto positivo sobre la conservación del medio ambiente y el alargamiento de la duración de los recursos energéticos no renovables, lo cual está claramente delineado por el estado cubano desde el año 1984 y fue objeto de su atención desde la década del 60, [7-9].

La tendencia actual hacia la racionalización y el mejor aprovechamiento de los esquemas e instalaciones de fuentes no renovables impone la necesidad de la máxima utilización de la energía contenida en los agentes portadores y la optimización del consumo de los recursos agotables. Por tal motivo, las redes hidráulicas, su correcto dimensionamiento y funcionamiento, adquieren importancia creciente en el contexto técnico actual, apareciendo excelentes trabajos al respecto en la literatura moderna y clásica, [10-12].

La red de distribución hidráulica del municipio Unión de Reyes, en estos momentos le presta servicio a un total de 8 790 habitantes, con una demanda coincidente máxima igual a 48,5 l/s y una capacidad de entrega instalada igual a 81 l/s, teniendo en cuenta además que las normas internacionalmente aceptadas de consumo de agua potable plantean que este oscila en el caso de medianas poblaciones en la media de 90 litros diarios ($0,09 \text{ m}^3$)¹

La red de distribución hidráulica antes mencionada presenta dificultades a la hora de garantizar el abasto de agua a los clientes más alejados, pues la carga hidrostática que garantiza el suministro a la red de distribución es aportada por el bombeo directo, ya que el sistema no cuenta con tanques elevados, encontrándose además la problemática que la carga instalada es insuficiente para garantizar el abasto, a pesar que el caudal suministrado es superior a la demanda real, siendo necesarias operaciones de cierre y aperturas de válvulas, para que el servicio pueda beneficiar a los clientes más lejanos.

Esto trae como consecuencia que el sistema de bombas, el cual es un elevado consumidor de energía eléctrica (103,5 kWh) trabaje de forma ininterrumpida durante las 24 horas del día, con el consiguiente consumo de energía eléctrica.

Hace algunos años ese problema no existía, según lo planteado por habitantes entrevistados, los cuales refieren que existía un bombeo intermedio, y que desde la fecha de su rotura y salida de servicio es cuando se ha agudizado la situación. Con este propósito fueron realizadas investigaciones anteriores las cuales resolvieron parcialmente la situación.

A partir de lo planteado anteriormente, para la correcta realización de este trabajo se enfrenta el siguiente **problema científico**: *El acueducto del poblado Unión de Reyes, requiere de una reevaluación de sus parámetros de operación, pues presenta dificultades técnicas que reducen la eficiencia y calidad de su servicio.*

¹ Según recomendaciones de la ASCE

Para dar solución al problema antes planteado se formula la siguiente **Hipótesis:** *A partir de los métodos existentes de diseño y comprobación de redes hidráulicas (Epanet) se puede establecer un balance de la red hidráulica del poblado Unión de Reyes, determinando los elementos que atentan contra su eficiencia y correcto desempeño.*

Para dar cumplimiento a la hipótesis del trabajo se ha trazado el siguiente **objetivo:** *Realizar una simulación mediante Epanet 2.0 para determinar los elementos que generan las dificultades técnicas actuales que presenta la red hidráulica Unión de Reyes.*

Para dar cumplimiento al objetivo anterior se desarrollarán las siguientes **Tareas:**

- 1- Obtener los principales parámetros y coeficientes de la red de distribución hidráulica.
- 2- Establecer una comparación entre los resultados obtenidos con el uso de Epanet 2.0 y con la aplicación del método de Cross realizado en investigaciones anteriores.
- 3- Establecer rangos de validez en el uso del software Epanet y su similitud con el método de Hardy Cross, empleando la variante de Darcy –Weibash.
- 4- Realizar un esquema simplificado del funcionamiento del sistema en conjunto (bombas y red de tuberías), que permita en un futuro la evaluación de la instalación, para que de esta forma se pueda apreciar cualquier deficiencia, y se garantice así su correcto funcionamiento, la conservación de su estado técnico y prolongación de su vida útil.

CAPITULO 1 ESTADO DEL ARTE EN EL ANALISIS DE TUBERIAS

1.1 Generalidades

El análisis de las fuentes bibliográficas relacionadas con el tema incluye en primer orden los aspectos vinculados con las ecuaciones fundamentales para el análisis fluido dinámico de un flujo incompresible, el análisis dimensional del problema de fricción para flujo incompresible, regímenes de corriente de líquidos en los tubos, la correspondiente distribución de los caudales en las mallas integrantes de la red, así como los métodos fundamentales a emplear para poder efectuar el análisis de la red hidráulica a evaluar, [13-18].

Se ha incluido además en el análisis bibliográfico, los aportes más recientes en el tema a nivel internacional y se ha tenido en cuenta también la contribución y la experiencia de investigaciones efectuadas en el ámbito del tema por especialistas de nuestro país. Para la realización de este trabajo no solo se analizó la bibliografía disponible, sino que se consultó a un gran número de especialistas y operadores relacionados con la temática.

1.2 Regímenes de corriente de líquidos y gases en los tubos.

Los experimentos demuestran que son posibles dos regímenes o dos tipos de corriente de líquido y gases en los tubos:

- 1- Laminar
- 2- Turbulento.

La corriente laminar según [19-24], es la formada por capas de fluido en movimiento sin mezclarse las partículas del fluido, ni variar su velocidad a lo largo del tiempo. En este caso todas las líneas de corriente se determinan por la forma del cauce por el cual fluye el líquido. Cuando la corriente del líquido en un tubo recto de sección constante es laminar, todas las líneas de corriente son paralelas al eje del tubo, es decir, rectas, no surgen desplazamientos transversales de las partículas del líquido, por lo cual este no se mezcla durante su movimiento. Un piezómetro unido al tubo con corriente laminar estacionaria indica que la presión y la velocidad, son invariables en el tiempo y que no hay oscilaciones

(pulsaciones). De este modo la corriente laminar es bastante ordenada y siendo la altura de carga constante, estrictamente estacionaria (aunque en el caso general puede ser irregular). Sin embargo, la corriente laminar no se puede considerar carente de torbellinos, porque aun sin presentar torbellinos bien manifiestos, con el movimiento de traslación surge un movimiento de rotación ordenado de partículas aisladas del líquido alrededor de su centro instantáneo con velocidades angulares determinadas. La corriente turbulenta, según [25-29], es la que va acompañada por una mezcla intensa del líquido y oscilaciones de velocidades y presiones. Cuando la corriente es turbulenta, las líneas de corrientes se determinan sólo aproximadamente por la forma del cauce. El movimiento de las partículas resulta desordenado y las trayectorias tienen a veces la forma de una curva complicada. Esto se debe a que, en la corriente turbulenta, junto con el desplazamiento principal del líquido a lo largo del tubo, surgen desplazamientos transversales y movimiento de rotación de diferentes volúmenes del líquido.

El cambio de régimen de corriente del líquido dado en el tubo se realiza a determinada velocidad de la corriente que se denomina crítica (V_{CR}). Experimentalmente se ha demostrado, que la magnitud de esta velocidad es directamente proporcional al coeficiente de viscosidad cinemática ν , e inversamente proporcional al diámetro del tubo (d), o sea:

$$V_{CR} = k \frac{\nu}{d} \quad (1.1)$$

El coeficiente adimensional de proporcionalidad k tiene significación universal, es decir, es el mismo para todos los líquidos y gases y para cualquier diámetro de tubo. Esto significa que el cambio de régimen de la corriente tiene lugar cuando la relación entre la velocidad, el diámetro y la viscosidad tiene un valor determinado e igual a:

$$K = \frac{V_{CR} \cdot d}{\nu} \quad (1.2)$$

Este número adimensional se denomina número crítico de Reynolds (en honor al sabio inglés que estableció este criterio) y se designa por:

$$Re_{CR} = \frac{V_{CR} d}{\nu} \quad (1.3)$$

Como muestran los experimentos, el número crítico de Reynolds es aproximadamente 2300. Sin embargo, se puede hablar no solamente del número crítico Re_{CR} , el cual

corresponde al cambio del régimen, sino también del número real de Reynolds para diferentes flujos y expresarlo por la velocidad real, es decir, que de este modo, se obtiene el criterio que permite juzgar el régimen de corriente de un líquido o un gas por el interior de un tubo. Puesto que la corriente laminar tiene lugar a velocidades reducidas, si $Re < Re_{CR}$ la corriente siempre debe ser laminar mientras que si $Re \geq Re_{CR}$, la corriente siempre debe ser turbulenta, [30-35].

1.3 Ecuaciones fundamentales para flujo incomprensible.

Los problemas de flujos de fluidos en tuberías, la predicción del régimen de flujo a través de tubos de determinadas características, el cálculo de la conversión de energía en este, etc., se encuentran con gran frecuencia en la práctica de la ingeniería y proporcionan la oportunidad de aplicar muchos de los principios anteriores a flujos de fluidos esencialmente unidimensionales.

La solución de los problemas prácticos del flujo en tuberías, resulta de la aplicación del principio de la energía, la ecuación de continuidad y los principios y ecuaciones de la resistencia de fluidos. La resistencia al flujo en los tubos es ofrecida no solo por los tramos largos del tubo, sino también por los accesorios de tubería tales como codos y válvulas que disipan energía al producir turbulencias a escala relativamente grande.

La ecuación de Bernoulli modificada o ecuación de balance de energía mecánica, para un fluido real durante su movimiento por un conducto de sección constante, según los autores [36-41], se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + f \frac{V^2 l}{2g d} + Z_2 + \sum_{i=1}^{i=n} \xi_i \frac{V^2}{2g} \quad (1.4)$$

Los términos de la ecuación (1.4) son términos de energía específica, ya sea por unidad de masa o de peso, siendo cada uno de ellos:

P_1 es la presión a la entrada del conducto, en Pa.

P_2 es la presión a la salida del conducto, en Pa.

V_1 es la velocidad a la entrada del conducto, en m/s .

V_2 es la velocidad a la salida del conducto, en m/s .

ρ_1 es la densidad a la entrada del conducto, en kg/m^3 .

ρ_2 es la densidad a la salida del conducto, en kg/m^3 .

α_1 y α_2 son los factores que tienen en cuenta la no uniformidad del perfil de velocidades a la entrada y salida del conducto respectivamente, adim

f es el factor de fricción de Darcy, adim.

g es el valor de la aceleración de la gravedad, siendo este una constante universal e igual a $9,81 \text{ m/s}^2$.

d es el diámetro del conducto, en m

$\sum \xi$ es la sumatoria de los coeficientes de pérdidas locales en los accesorios, adim.

Z_1 y Z_2 son los términos que contienen la diferencia de energía potencial, en m

Sin embargo en la mayor parte de los problemas de flujo en tuberías, según lo expresado en las referencias [42-48], se pueden omitir los términos de α_1 y α_2 por varias razones:

1. La mayor parte de los problemas de ingeniería acerca de flujo en tubos implica un flujo turbulento en el cual α es apenas ligeramente mayor que la unidad.
2. En el flujo laminar, en el que α tiene un valor elevado, las cargas de velocidad son de ordinario despreciables cuando se comparan con los otros términos de la ecuación de Bernoulli. Las cargas de velocidad en la mayor parte de los flujos en tubos son en general tan pequeñas en comparación con otros términos que la inclusión de α tiene poco efecto en el resultado final. El efecto de α tiende a cancelarse puesto que aparece en ambos lados de la ecuación

A pesar de lo expuesto anteriormente, si se desea determinar el valor de α , se puede recurrir a los valores recomendados en las referencias [49-56].

Una ecuación empírica para la obtención de este coeficiente para régimen turbulento fue descrita en las referencias [57-60], la cual queda de la siguiente forma:

$$\alpha = 1,284 \text{Re}^{-0,015} \quad (1.4.a)$$

La ecuación (1.4.a) es válida para $4000 \leq \text{Re} \leq 5 \times 10^7$, mientras que para valores de $\text{Re} > 5 \times 10^7$ el valor del coeficiente α va a ser igual a la unidad.

Los experimentos iniciales, cerca de 1850, según lo descrito en [61-66], sobre el flujo de agua en tuberías largas, rectas y cilíndricas indicaron que la pérdida de carga variaba aproximadamente en forma directamente proporcional con la carga de velocidad y la longitud del tubo y en forma inversamente proporcional con el diámetro del mismo.

Empleando un coeficiente de proporcionalidad f llamado factor de fricción, Darcy y Weisbach propusieron una ecuación que se expresa de la siguiente forma:

$$\Delta p = f \frac{l}{d} \frac{V^2}{2} \rho \quad (\text{Pa}) \quad (1.5)$$

En la ecuación (1.5) Δp es la caída de presión en el conducto analizado, en Pa

Las observaciones indicaron que el factor de fricción dependía en mayor parte de la rugosidad del tubo, pero también de la velocidad y del diámetro de este. Más recientemente, se observó que el factor de fricción dependía también de la viscosidad del fluido en circulación. Esta ecuación denominada ecuación de Darcy es aún la ecuación básica para el cálculo de la pérdida causada por la fricción establecida en tubos largos rectos y uniformes, no siendo así en conexiones de tuberías.

1.4 Análisis dimensional del problema de fricción para flujo incompresible.

Según [67-72], se puede obtener una introducción al problema de la fricción en los tubos por medio de la aplicación de los métodos de similitud y análisis dimensional. Esto permite que el problema se trate de una manera general e indica las variables de las cuales depende el factor de fricción. Aunque un análisis semejante no puede por sí solo producir relaciones matemáticas definidas, sí indica las combinaciones existentes de las variables y justifica los métodos generalmente aceptados en la actualidad de presentar los resultados experimentales de las pruebas acerca de la fricción en tubos.

Se puede demostrar fácilmente por medio de los métodos del análisis dimensional que el esfuerzo cortante τ_0 puede ser expresado como:

$$\tau_0 \approx F^1 \left(\frac{v d \rho}{\mu} \frac{e}{d} \right) \rho V^2 \quad (1.6)$$

Se ha demostrado así, sin conocimiento previo de resultados experimentales, que el factor de fricción depende solo del número adimensional de Reynolds del flujo y de la relación adimensional e/d , denominada rugosidad relativa del tubo, donde e es la rugosidad absoluta, por lo tanto, el análisis dimensional ha producido un resultado general único, que es válido para todos los fluidos en movimiento en tubos de sección circular.

Se puede afirmar con brevedad que el significado físico de los factores de fricción de los tubos serán los mismos si sus números de Reynolds, sus patrones de rugosidad y sus

rugosidades relativas, son iguales. Cuando se interpreta por el principio de similitud su significado básico se infiere que los factores de fricción de los tubos son los mismos si sus imágenes de flujo son geométrica y dinámicamente similares en todos los detalles.

Un medio conveniente de presentar la información experimental sobre el factor de fricción, fue formulado por Stanton 1914, y consiste en una gráfica logarítmica del factor de fricción en función del número adimensional Re con la rugosidad superficial relativa como parámetro. A partir de dicha gráfica se puede obtener información completa sobre el factor de fricción para flujo laminar y turbulento de cualquier fluido en tubos lisos y rugosos, siendo la única dificultad la definición de un índice confiable de rugosidad del tubo.

Los resultados de las pruebas sistemáticas hechas por Nikuradse [73-78], sobre el flujo turbulento en tubos lisos y rugosos, demostraron perfectamente la relación entre f , Re y la rugosidad relativa. En estas pruebas se obtuvo la similitud geométrica del patrón de rugosidad fijando un recubrimiento de granos uniformes de arena sobre la pared del tubo, proporcionando así un índice fácilmente medible de la rugosidad, siendo e , el diámetro de los granos de arena. Aunque la rugosidad de los granos de arena de Nikuradse es bastante diferente de la de los tubos comerciales, es una cantidad definida fácilmente medible que provee una base confiable para la medición cuantitativa de los efectos de la rugosidad.

1.4.1 Determinación del factor de fricción para el cálculo de pérdidas de presión por el interior de tubos rectos

Los resultados de Nikuradse se aceptan por lo general en la actualidad como la norma básica para esta medición, siendo estos graficados, y reportados en las referencias [79-84].

De estos se desprenden los siguientes conceptos básicos importantes:

- 1- La diferencia física entre los regímenes de flujo laminar y turbulento está indicada por el cambio en la relación entre f y Re , cerca del número crítico de Reynolds, el que según los autores [1, 6, 80, 81], es de aproximadamente 2 300.
- 2- El régimen laminar se caracteriza por una curva única dada por la ecuación $f = 64/Re$ para el caso de que el conducto sea circular para todas las rugosidades superficiales, y demuestra así que la pérdida de carga en el flujo laminar es independiente de la rugosidad superficial.

- 3- En el flujo turbulento existe una curva de $f - Re$ para cada rugosidad relativa e/d y del aspecto horizontal de las curvas se puede deducir que, para los tubos rugosos, la rugosidad es más importante que el número de Reynolds para determinar el valor del factor de fricción.
- 4- Para altos números de Re , los factores de fricción de los tubos rugosos llegan a ser constantes, dependientes por completo de la rugosidad del tubo y por lo tanto, independientes del número de Re .
- 5- En el caso de tubos hidráulicamente lisos, los resultados de las pruebas de Nikuradse confirman el criterio dado por Blasius [10], el cual supuso inicialmente que la rugosidad queda sumergida en la capa viscosa y no puede tener efecto sobre el factor de fricción ni sobre la pérdida de carga, los que dependen solamente de los efectos de la viscosidad. Blasius [15, 16, 19, 79, 81], ha demostrado que esta curva para $\langle 3 \times 10^3 < Re < 10^5 \rangle$ se puede representar por una línea cuya ecuación es:

$$f = 0,3165 Re^{-0.25} \quad (1.7)$$

Cuando esta se sustituye en la ecuación de Darcy puede notarse que la pérdida de carga es directamente proporcional a la velocidad del fluido elevado a la potencia de 7/4 para flujo turbulento en tubos lisos con $Re < 10^5$.

- 6- La serie de curvas para los tubos rugosos diverge de la curva para tubos lisos al aumentar el número de Re . En otras palabras, los tubos que son lisos a valores bajos de Re , se tornan rugosos a valores altos de Re . Esto se puede explicar por el espesor de la subcapa viscosa que disminuye al aumentar el número adimensional de Reynolds, exponiendo así protuberancias de rugosidad más pequeñas a la región turbulenta, y haciendo que el tubo exhiba así las propiedades de un tubo rugoso.

Infortunadamente, los excelentes resultados de Nikuradse no se pueden aplicar en forma directa a los problemas de ingeniería, porque los patrones de rugosidad de los tubos comerciales son por completo diferentes, mucho más variables, y mucho menos definibles que el de la rugosidad usada por Nikuradse.

Colebrook [1, 12, 58, 60, 61, 63, 72, 74], encontró que cuando se probaba cualquier tubo de rugosidad comercial a un número de Re suficientemente alto, se obtenía un valor del factor de fricción que ya no variaba con el número de Re . Esto permitía la comparación con la

ecuación reportada por Nikuradse y por medición del factor de fricción, permitía que se calculara un tamaño de grano de arena equivalente e . Graficando los resultados de las pruebas en muchos tubos, Colebrook encontró que los resultados de todas estas pruebas se conglomeraban cercanamente alrededor de una línea única que es expresada por la ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \text{Log} \left(\frac{e/d}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{f}} \right) \quad (1.8)$$

Esta ecuación es válida para el siguiente rango de valores:

$$4000 \leq \text{Re} \leq 10^8 \quad , \quad 5 \times 10^{-2} \leq e/d \leq 10^{-7}$$

En esta ecuación f es el factor de fricción de Darcy, e es el tamaño del grano de arena equivalente, en m, d es el diámetro interno del tubo, en m; Re es el número adimensional de Reynolds, adim.

Los valores de e recomendados en la literatura moderna y clásica, varían entre sí, debido a diversas causas como pueden ser: errores de medición, características diferentes de los conductos, diferencias de los procesos de fabricación de las tuberías, etc. En este trabajo se utilizarán los valores recomendados por [63, 80] y aceptados por [1, 28, 30, 31, 41], que al criterio de este autor son los de mayor confiabilidad, y son resumidos en la Tabla 1.1.

La ecuación de Colebrook, aunque resume en forma conveniente la información sobre tubos de rugosidad comercial, es difícil de ser usada en ingeniería debido a que esta es implícita y requiere del uso de aproximaciones sucesivas. Esta ecuación fue graficada por Moody en forma de un diagrama de Stanton, conocido actualmente como diagrama de Moody, el cual ampliamente aceptado y difundido.

Recientemente varios autores han desarrollado fórmulas de cálculo para la determinación del factor de fricción de Darcy, que aunque son menos precisas, ya que su error promedio es cercano a un $\pm 30\%$, requieren de un aparato matemático de menor complejidad para su resolución e implementación. En la Tabla 1.2 se muestra un resumen de las más conocidas y la divergencia máxima que presentan respecto a la ecuación de Colebrook, de acuerdo a una validación realizada por el autor [12], el cual empleó una muestra de 12 550 valores distintos de rugosidades y números de Reynolds, lo que permite inferir que la ecuación de

Haaland es la que ofrece resultados más cercanos a los que se obtienen por la ecuación de Colebrook.

Tabla 1.1 Valores de e para distintos tipos de tubos

Tipo de tubo	e (mm)
Tubos de acero sin costura	0,2
Tubos de acero galvanizado	0,125
Tubos de aceros viejos y herrumbroso	0,67- 2,0
Tubos de hierro fundido nuevos	0,26
Tubos de hierro fundido usados	1,2 - 1,8
Tubos de aluminio lisos	0,015 – 0,06
Tubo de latón, cobre, plomo, (sin costura)	0,0015 – 0,01
Tubos de hormigón sin pulir	3 – 9
Tubos de hormigón pulido	0,3 -0,8

Fuente: Streeter [74]

Tabla 1.2 Ecuaciones empíricas para la determinación del factor f de Darcy

Ecuación	Autor y Referencias	Rango de validez	Divergencia máxima (%)
$f = 1.325 \left[\ln \left(\frac{e/d}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2}$	Streeter [74] (1.9)	$5000 \leq Re \leq 10^8$ $0,01 \leq e/d \leq 10^{-6}$	3,21
$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left[-2 \text{Log} \left(\frac{e/d}{3,7} + \left(\frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} \right) \right]^{-2}$	Pavlov et al [62] (1.9.a)	$5000 \leq Re \leq 10^8$ $0,01 \leq e/d \leq 10^{-6}$	2,95
$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left[-2 \text{Log} \left(\frac{e/d}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2}$	Swaame-Jain [63] (1.9.b)	$5000 \leq Re \leq 10^8$ $0,01 \leq e/d \leq 10^{-6}$	3,24
$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left[-1,8 \text{Log} \left(\left(\frac{e/d}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right) \right]^{-2}$	Halad [40] (1.9.c)	$5000 \leq Re \leq 10^8$ $0,01 \leq e/d \leq 10^{-6}$	1,44

Fuente: Streeter [74]

Recientemente en la Universidad de Matanzas [11, 12, 13, 14], se obtuvo una expresión para la determinación del factor de fricción de Darcy, la cual es válida en el mismo

intervalo que el modelo de Colebrook. Esta expresión será la que se implementará en la obtención de los valores de los coeficientes del factor de fricción en la evaluación de la red analizada.

Vale aclarar que la precisión de los cálculos sobre fricción en los tubos, puede variar con el cambio algo impredecible en la rugosidad y el factor de fricción, [43, 49, 51], debido a la acumulación de sedimentos y corrosión sobre las paredes del tubo con el tiempo de uso del conducto. Esta acumulación no solamente aumenta la rugosidad superficial, sino que también reduce el diámetro efectivo del tubo y puede conducir a un aumento potencialmente elevado del factor de fricción después de que el tubo ha estado en servicio por un periodo largo, aunque en el presente trabajo esta problemática queda fuera de su análisis, limitándose el autor solamente a citar las referencias en las cuales se brinda un análisis exhaustivo para esta temática como son [1, 19, 45, 47, 49, 54, 60].

1.5 Problemas sobre líneas de tuberías. Tubos múltiples.

Algunos de los problemas más complejos del diseño de tuberías, implican el flujo de fluidos por tubos que se intersecan. Los principios aplicables a problemas de este tipo se pueden dividir en dos grupos fundamentales:

- 1- Tuberías cuyas líneas de corriente se separan y posteriormente se vuelven a unir
- 2- Tuberías cuyas líneas de flujo conducen desde regiones de presión y elevación conocidas y se encuentran en un punto común.

Por lo general en estos tipos de problemas se desprecian las cargas de velocidad, las pérdidas menores y las variaciones del factor de fricción con los valores de Re , mientras que los cálculos se efectúan sobre la coincidencia que existe entre las líneas de energía y el gradiente hidráulico como bien se reporta en [46, 56, 57, 61].

En la ingeniería práctica un método normalizado es derivar una tubería B paralelamente a una tubería existente A, y posteriormente volver a conectarla con esta, tal como se muestra en la figura 1.1.

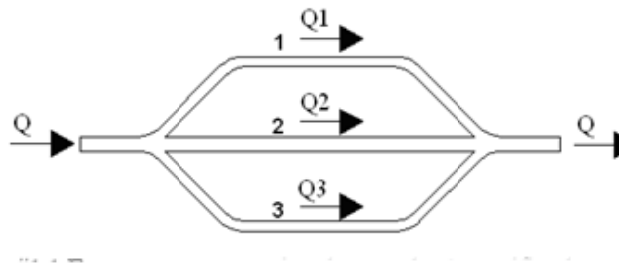


Figura 1.1: Esquema representativo de una tubería ramificada en paralelo

Fuente: Camaraza [12]

De esta forma se logra aumentar la capacidad de la línea. Se nota aquí una analogía entre el flujo de fluidos y el flujo de corriente eléctrica en un circuito en paralelo, si se comparan la pérdida de carga con la caída del potencial eléctrico, y el movimiento del fluido con la corriente eléctrica.

Es evidente, a partir de lo explicado en el párrafo anterior, que la distribución de flujos en los ramales debe ser tal, que ocurra la misma pérdida de carga en cada uno de los ramales, pues si esto no fuera así habría entonces más de una línea de energía para el tubo corriente arriba y corriente abajo, siendo esto una imposibilidad obvia.

Con la aplicación del principio de continuidad se muestra que el caudal de flujo en la línea principal va a ser igual a la sumatoria de los caudales de flujo en los ramales, por tanto coincidiendo la opinión de este autor a lo planteado en las referencias [1, 4, 5, 8, 10, 15, 16, 19, 36, 37, 41, 42, 43, 48], se puede expresar lo antes planteado en el análisis efectuado a la Figura 1.1, mediante las siguientes ecuaciones simultaneas:

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p_3 \quad (1.10)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (1.10-a)$$

Las pérdidas de presión en el conducto se expresan en términos del flujo a partir de la ecuación (1.5) y la expresión volumétrica de la ecuación de continuidad, la cual se escribe como:

$$Q = VA$$

Donde A es el área de la sección transversal de la tubería, en m^2 determinada en conductos de sección circular como $A = 0,25\pi d^2$. Sustituyendo en la ecuación (1.5) y arreglando convenientemente se obtiene:

$$\Delta p = \left(\frac{f8l}{d^5 \pi^2 g} + \sum \xi \frac{8}{d^4 \pi^2 g} \right) Q^2 \quad (1.11)$$

Esta relación se puede generalizar escribiéndola de la siguiente forma

$$\Delta p = KQ^2 \quad (1.11-a)$$

Donde

$$K = \left(\frac{f8l}{d^5 \pi^2 g} + \sum \xi \frac{8}{d^4 \pi^2 g} \right) \quad (1.11-b)$$

En la expresión (1.11-b) las pérdidas menores ocasionadas por accesorios generalmente son tratadas como longitudes equivalentes de tuberías, por tanto la expresión (1.11-b) se transformará entonces, siguiendo este criterio, en:

$$K = \left(\frac{8f(L_{Tub} + L_{EQUIV})}{d^5 \pi^2 g} \right) \quad (1.11-c)$$

En la ecuación (1.11-c) L_{Tub} es la longitud de las tuberías integrantes del tramo dado, en m;

L_{EQUIV} es la longitud equivalente de los accesorios, en m.

La longitud equivalente de los accesorios se define como la longitud de una tubería recta y de sección transversal constante en la cual ocurre la misma caída de presión que en el accesorio, siendo expresada en m.

De acuerdo a la ecuación (1.11-a) la relación (1.10) se puede expresar como:

$$K_1 Q_1^2 = K_2 Q_2^2 = K_3 Q_3^2 \quad (1.12)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (1.12-a)$$

La solución de las ecuaciones simultáneas (1.12) y (1.12-a), permite la predicción de la división de un régimen de flujo Q , en los regímenes de flujo Q_N de cada una de las tuberías, cuando se conocen sus características. La aplicación de estos principios también permite la predicción del régimen de flujo obtenible por la derivación de una línea de tubería Q y su incremento. Los sistemas de tuberías múltiples alcanzan su mayor nivel de complejidad en los problemas de distribución de flujo en las redes de tuberías, tales como las del sistema de distribución de agua en una ciudad, los cuales para su solución requieren pruebas de tanteos y errores, aunque en la tesis doctoral [41], se obtuvo un método válido

para la solución acelerada y precisa de redes de elevada complejidad, cuya solución por los métodos tradicionales de evaluación y diseño de redes sea prácticamente imposible.

1.5.1 Solución de problemas sobre tubos múltiples mediante el Método de Cross.

Una red de tuberías en un sistema de distribución de agua consiste en la agregación de tubos conectados, los cuales se emplean con el fin de entregar agua a los usuarios en un área especificada, como pudiera ser una ciudad, o una parte de esta. La red consiste en un conjunto de tubos de varios tamaños, orientaciones geométricas y características hidráulicas, interconectados entre sí con el fin de distribuir uniformemente el volumen de caudales, y las caídas de presiones. Estos están constituidos además por bombas, válvulas, accesorios y similares.

La solución de cualquier problema de redes, debe satisfacer los principios de continuidad y el principio de Bernoulli a través de toda la red. El principio de continuidad establece que el régimen neto de flujo en cualquier unión de tubos, debe ser igual a cero. En la literatura técnica [21, 22, 61, 67, 69, 72, 81], se acostumbra a llamar a las uniones de tubos como nodos.

El principio de Bernoulli requiere que en cualquier rama solo exista una posición de la línea de energía, esto es, que la pérdida neta de carga alrededor de cada malla de la red debe tener valor cero, aplicando estos principios a cada nodo, rama y malla de la red, se obtiene un juego de ecuaciones simultáneas. En una red de distribución hidráulica se conoce como nodo al punto de convergencia o unión del caudal de dos o más ramas

Para una mejor comprensión de los nuevos términos, se muestra en la Figura 1.2 una descripción más detallada de una red sencilla de distribución.

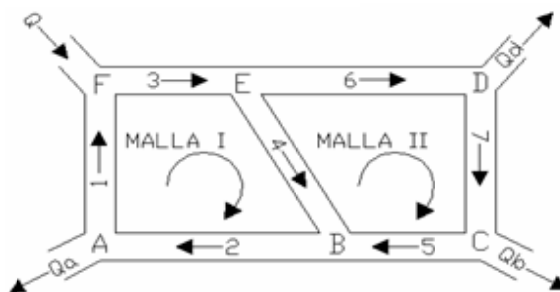


Figura 1.2 Representación esquemática de una red de distribución hidráulicas

Fuente: Streeter [74]

En la figura 1.2, los nodos se indican con letras mayúsculas, desde la A hasta la F, los tubos individuales o ramas se representan por números desde el uno hasta el siete, y las gazas o mallas son mostradas enumeradas con números romanos I y II.

El método de Cross se caracteriza por las siguientes notaciones a la hora de efectuar el balanceo de la red:

- 1- Los flujos en las ramas son positivos cuando su rotación se efectúa en sentido dextrógiro alrededor de cada circuito, o sea que estos coinciden con la saeta indicadora, según como se indica en las mallas I y II de la Figura 1.2, en el caso contrario serán negativos.
- 2- Los flujos se consideran positivos si estos entran a los nodos, y negativos en el caso de que salgan.

Como se muestra en la Figura 1.2, la malla I está integrada por los tubos 1, 2, 3 y 4, mientras que la malla II está constituida por los tubos 4, 5, 6 y 7.

Aplicando lo expuesto en los párrafos anteriores en las ecuaciones (1.12) y (1.12-a), se obtienen el siguiente sistema de ecuaciones para la malla I.

$$\sum_A Q = -Q_a - Q_1 + Q_2 = 0 \quad (1.13)$$

$$\sum_F Q = Q + Q_1 - Q_3 = 0 \quad (1.13-a)$$

$$\sum_E Q = Q_3 - Q_4 - Q_6 = 0 \quad (1.13-b)$$

$$\sum_B Q = Q_5 + Q_4 - Q_2 = 0 \quad (1.13-c)$$

$$\sum_I \Delta p = K_1 Q_1^2 + K_2 Q_2^2 + K_3 Q_3^2 + K_4 Q_4^2 = 0 \quad (1.13-d)$$

Para el caso de la malla II, se obtiene un sistema de ecuaciones similar al anterior.

Para determinar las ecuaciones desde la (1.13) hasta la (1.13-d), se han asumido las direcciones de las líneas de corriente del flujo en las ramas, aunque puede darse el caso que estas no sean las correctas y a la vez se suponen conocidas las características fundamentales de los sistemas integrantes de la red, dentro de las cuales se pueden mencionar:

- 1- Longitudes
- 2- Diámetros
- 3- Características hidráulicas de cada tubo
- 4- El caudal suministrado a la red

5- Características de las bombas instaladas

6- Distribución de la red y sus elevaciones (necesarias si se van a determinar las presiones)

Para aplicar el método de Cross, según los autores [1, 4, 5, 8, 10, 14, 16, 19, 36, 37, 41, 84], se comienza por suponer un juego de valores de gasto para cada rama Q_1, Q_2 , etc., que satisfagan a su vez a la ecuación de continuidad, ajustado posteriormente en forma sistemática (mediante aproximaciones sucesivas), de forma que se mantenga satisfecha la continuidad, hasta que se obtengan resultados de pérdida de carga con la precisión deseada. La ventaja principal de este método consiste en que se satisfacen automáticamente y continuamente todas las ecuaciones de continuidad del sistema. Vale destacar que en este método solo se deben resolver las ecuaciones de pérdidas de carga, y que el número de estas expresiones simultáneas a resolver va a ser igual al número de mallas existentes en la red. Si en el proceso de iteraciones, el primer valor tomado es razonable, los Q_N regímenes de flujos verdaderos en cada rama, deberán diferir en solo una pequeña cantidad Δ_L , diferente de las suposiciones iniciales.

Lo explicado en el párrafo anterior se puede representar matemáticamente de acuerdo a lo reflejado por los autores [1, 4, 5, 8, 10, 14, 16, 19, 36, 37, 41], mediante la siguiente expresión:

$$Q_{N+1} = Q_N \pm \Delta_L \quad (1.14)$$

En la expresión (1.14):

Q_{N+1} es el caudal después de la corrección, en m^3/s

Q_N es el caudal inicial asumido, en m^3/s

Δ_L es el valor de la corrección, en m^3/s

El signo \pm en la ecuación (1.14) va a depender de las direcciones asumidas inicialmente para Q_N y de Δ_L . Para mantener la continuidad se aplica a cada tubo de la malla la corrección Δ_L , la cual será positiva o negativa en función del sentido de desplazamiento del fluido por el interior de las ramas. Para plasmar una idea más clara acerca del signo del coeficiente Δ_L , según lo planteado en las referencias [1, 4, 5, 8, 10, 14, 16, 19, 36, 69, 81, 82], se deben tener en cuenta dos aspectos fundamentales:

- 1- Cuando el momento producido por el sentido asumido para el desplazamiento del fluido es dextrógiro (hacia la derecha) entonces Δ_L es (+).
- 2- Cuando el momento producido por el sentido asumido para el desplazamiento del fluido es levógiro (hacia la izquierda) entonces Δ_L es (-).

Teniendo en cuenta estos dos señalamientos, y aplicando la ecuación (1.13-d), se llega a la conclusión que, en general, una ecuación de pérdidas de carga para una malla N, toma la siguiente forma:

$$\sum_N \Delta p = \sum_N (\pm) K_N Q_N^2 = 0 \quad (1.15)$$

Si se introduce la expresión (1.14) en la (1.15), entonces quedará:

$$\sum_N \Delta p = \sum_N (\pm) K_N (Q_N \pm \Delta_L)^2 = 0 \quad (1.16)$$

Expandiendo la expresión (1.16) por el teorema del binomio y despreciando los términos que contienen productos de la corrección Δ_L , ya que inicialmente se supuso que este coeficiente es pequeño en comparación con el resto de los términos, se llega a la expresión obtenida originalmente por Cross, la cual según los autores [1, 4, 5, 8, 10, 14, 25, 26, 27, 81, 82, 84], se formula de la siguiente manera:

$$\Delta_L = - \left[\frac{\sum_N (\pm) K_N Q_N^2}{\sum_N |2K_N Q_N|} \right] \quad (1.17)$$

La ecuación anterior es la empleada en este método para obtener una corrección para los valores de flujo supuestos inicialmente para cada rama en la red analizada. Debido a que en cualquier red siempre existirán tubos que son compartidos en más de una malla, y a que se despreciaron los términos más pequeños en (1.16) para obtener la ecuación (1.17), cuando se aplica esta no se obtienen inicialmente valores de corrección que sean capaces de corregir todos los valores de flujo a su magnitud real, sino que lo que proporciona es una mejor aproximación a los valores reales.

Por tanto como se acaba de demostrar, el proceso iterativo debe continuarse, utilizando para esto los nuevos valores de flujo obtenidos a base de la última corrección aplicada, hasta que todas las magnitudes Δ_L en cada malla sean lo suficientemente pequeñas, como para ser

despreciadas. Dándole continuidad a las ideas de Cross, el proceso iterativo se efectúa a través de la expresión (1.14).

1.6 Principales resultados de investigaciones y aportes más recientes a la solución de problemas de flujo en tuberías en redes hidráulicas en Cuba.

En la época colonial (siglo XIX), en el país no existió un gran desarrollo de métodos investigativos acerca del flujo de fluidos y su aplicación a sistemas de distribución hidráulicas, solamente vale resaltar la labor del destacado investigador e ingeniero Francisco Albear y Fernández de Lara, la cual culminó con su proyecto, ejecución y puesta en explotación del célebre acueducto de la Habana¹, llamado en aquella época Acueducto de Fernando VII, en honor al entonces monarca español.

En la época neocolonial tampoco existió un desarrollo considerable al respecto, pues la Universidad de entonces no contaba con el apoyo necesario y fue en escasas excepciones, que se hicieron aportes de significación, pudiendo citarse dentro de ellos al Dr. e ingeniero Manuel F. Gran, el cual desarrolló por espacio de diez años un trabajo considerable en la investigación y enseñanza de la hidrodinámica en la Universidad de la Habana.

Tras el triunfo revolucionario el interés del estado revolucionario se centró en el desarrollo de la educación y la fomentación de la investigación científica. Como resultado de esto a lo largo del período revolucionario han aparecido cerca de un centenar de investigaciones de relevancia en el tema. En la opinión de este autor es el magnífico trabajo efectuado por el profesor Dr. Diosdado Pérez Franco y sus colaboradores [19], a lo largo de tres décadas, el de mayor relevancia, pues fueron capaces de crear un método de análisis de redes de distribución hidráulicas, el cual fue publicado, aceptado y reconocido como un método válido, por los académicos correspondientes de la ASCE.

Este método consiste a rasgos generales en la clasificación de las redes de distribución en cerradas, semi-cerradas o abiertas, implementándose en cada caso una metodología de solución que no utiliza para la convergencia de valores de la red, los valores de caudales asumidos inicialmente, sino que en su lugar para efectuar el análisis se emplean las pérdidas de carga. Tiene como inconveniente principal que los valores de pérdidas de carga mostrarán un comportamiento divergente en el caso de que existan bombas incluidas en el

¹ Sánchez, López J. , Historia de las ciencias en Cuba, Ed: Científico Técnica, La Habana, 1998

cuerpo de la red. Un análisis más detallado de este método se expone en todo detalle en la referencia [42], y es citado además por [43].

1.7 Procedimientos computacionales para la solución de problemas de flujo en redes de tuberías.

En la actualidad es común el empleo de paquetes o software especializados con el fin de obtener soluciones en el proceso de evaluación de redes complejas cuya solución resultaba en extremo voluminosa. Con el surgimiento de los métodos modernos CFD, ya son muchos los autores que prefieren el empleo de las herramientas que proporcionan estas técnicas modernas de análisis, ya que en la inmensa mayoría de las situaciones se obtienen de una forma sencilla, rápida y numéricamente confiable, los resultados de los principales parámetros de interés en cualquier red por compleja que sea esta.

En la literatura moderna se describen diversos procedimientos computacionales para la solución de problemas de flujo en tuberías, a través del empleo de modelos de programación comerciales, los cuales son sustentados en una nueva concepción matemática, que es conocida en la ingeniería moderna como método de elementos finitos. La rama de la ingeniería que se dedica al estudio del flujo de fluidos mediante la implementación del método de los elementos finitos es conocida como mecánica de fluidos computacional o simplemente CFD por sus siglas en inglés.

El método de elementos finitos aplicado a la mecánica de fluidos, parte de la consideración inicial que la corriente fluida posee un comportamiento estático, dividiendo la misma en elementos más pequeños o infinitesimales, a los cuales se les aplican las ecuaciones diferenciales básicas, para de esta forma obtener una solución punto a punto del problema analizado. Este tipo de evaluación es conocida como análisis lineal. Sin embargo, en la mayoría de los casos de flujo de fluidos conocidos en la práctica de ingeniería es imposible aplicar un análisis lineal, ya que la totalidad de sus parámetros varían con el tiempo, y además se hace necesario tener en cuenta el efecto de corte que surge en la corriente líquida, y la presencia de la transferencia de cantidades de movimiento y de calor que surge como resultado de la mezcla continua.

Para solucionar este inconveniente se emplean métodos numéricos, que permiten disponer de una solución aproximada de las ecuaciones diferenciales que rigen el proceso en

cuestión, siendo los más conocidos y empleados en el campo de acción, el método de mallas o método de Ritz, o el de residuos ponderados o método de Galerkin. En el apéndice A de los anexos el autor muestra de forma simplificada, la solución mediante el empleo del método de elementos finitos, al caso particular de un flujo de fluidos en régimen turbulento con carácter bidimensional en tuberías rectas lisas.

1.7.1 Herramientas computacionales empleadas en la actualidad para la solución de problemas de flujo en tuberías en redes hidráulicas.

En recientes investigaciones [5, 8, 10, 24, 36, 37, 42, 46, 51, 52, 53], se demostró la potencialidad del empleo de ordenadores y de paquetes profesionales en la solución de casos de flujo de fluidos viscosos, reales y de carácter no permanente en redes hidráulicas.

El autor del presente trabajo coincide plenamente con el con el criterio establecido por La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, y varias de las agrupaciones profesionales de ingeniería dedicadas al diseño, construcción y evaluación de redes de distribución hidráulicas de ese país, los cuales recomiendan el uso de Software como el ANSYS 10.0 , NASTRAN 4.5 , EPANET 3.0, para el análisis de las mismas debido a la rapidez, sencillez y confiabilidad de los resultados obtenidos con la aplicación de estas herramientas computacionales.

Siguiendo lo recomendado por autores y normas de prestigio en la materia a nivel internacional, será implementado en el presente trabajo el uso de la herramienta computacional para la solución de problemas de flujo en tuberías EPANET 3.0 [25, 26,27], la cual fue desarrollada por el *National Institute of Hydraulics Investigation*², perteneciente a la ASCE, para el análisis de redes de distribución hidráulicas,

Este software profesional en la actualidad, ha alcanzando gran difusión y aceptación a nivel internacional, siendo ampliamente utilizado en los EUA, y en casi toda Europa, debido a la sencillez de su empleo y a la fiabilidad de los resultados obtenidos, Teniendo en cuenta esto, el autor lo empleará en la comprobación numérica de los resultados obtenidos en la evaluación efectuada a la red mediante el empleo del método de Hardy Cross, lo cual fue realizado en investigaciones anteriores [85].

² Instituto Nacional de Investigaciones Hidráulicas, radicado en *New York*, EUA

CAPITULO II MATERIALES Y MÉTODOS REQUERIDOS PARA EL USO DEL SOFTWARE EPANET 2.0

2.1 Generalidades.

Cualquier red hidráulica está integrada por un número determinado de ramas o tubos, pero para interconectar los componentes integrantes de las mismas se hace imprescindible la presencia de elementos como codos, uniones, ramificaciones, etc. De igual forma para poder efectuar controles o regulaciones sobre el funcionamiento de la misma, es necesaria la instalación de accesorios, dentro de las que juegan un papel fundamental las válvulas. Con el avance de las tecnologías y la era digital, se han creado software como Epanet cuyo objetivo es simular estas redes para un mejor análisis del comportamiento de las mismas haciendo posible un estudio más profundo y certero.

2.1.1 Breve descripción de la red de distribución hidráulica Unión de Reyes.

En la actualidad la red de distribución hidráulica del poblado de Unión de Reyes consta de dos fuentes de abasto fundamentales:

- 1- La fuente de Piloto, con un total de dos pozos.
- 2- La fuente de Fumerito, con un total de un pozo.

El suministro de agua al mismo se efectúa mediante el bombeo directo, puesto que no existen tanques elevados para garantizar la columna líquida que sea capaz de aportar la carga necesaria para el correcto funcionamiento de la red de distribución. El suministro de agua se efectúa mediante dos conductoras, la primera de ellas parte de las estaciones de bombeo Piloto 1 y 2 y la otra desde la estación de bombeo de Fumerito.

La línea de tuberías de descarga del pozo Piloto 1 es de hierro fundido, con un diámetro interno igual a 100 mm y con una longitud igual a 38,9 m, esta se conecta perpendicularmente a la conductora principal.

La conductora principal parte desde el frente de la estación de bombeo Piloto 2, siendo esta también de hierro fundido y con un diámetro interno igual a 250 mm. Esta conductora viene paralela a la carretera que une a los poblados Unión de Reyes y Alacranes, con una longitud igual a 2 400 m.

El sistema de bombeo Fumerito está constituido por una línea de tuberías de hierro fundido, con un diámetro interno de 200 mm, presentando una longitud igual a 960 m. Esta parte de la estación de bombeo y campo travesía llega a la calle General Lacroix, donde hace una inflexión a la izquierda, para después, en la calle Independencia, efectuar otra inflexión, pero en este caso a la derecha, para posteriormente unirse a la conductora Piloto en el patio del local del acueducto municipal, lugar este en el que surge la red de distribución que se pretende analizar en el presente trabajo.

En la tabla 2.1 se presentarán, en forma de resumen, las características principales de las fuentes de abasto y medios de suministro empleados para garantizar el funcionamiento de la red analizada.

Tabla 2.1 Características principales red de distribución Hidráulica Unión.

Aspectos fundamentales ¹	Piloto 1	Piloto 2	Fumerito	Bombeo intermedio
Cota geográficas ²	327355 (N) ³ 444275 (E) ⁴	327220 (N) 444240 (E)	327355 (N) 444245 (E)	326125 (N) 444125 (E)
Aforo medido (l/s)	22	21	24	
Nivel dinámico (m)	34,2	32,7	40,2	
Profundidad (m)	54,1	46,8	45,5	
Nivel estático (m)	28,6	28,2	37,2	
Tipo de bomba	Vertical	Vertical	Vertical	Centrífuga
Procedencia	URSS	Bulgaria	URSS	URSS
Modelo	ATH 10	Evara	ATH 10	CTX 10
Caudal (l/s)	30	21	30	45
Carga hidráulica (m)	47	60	50	50
Presión de descarga manométrica (atm)	3,6	3,2	2,6	3,8
Columna instalada (m)	42	38	42	
Número de etapas	8	4	5	4
Potencia motor eléctrico (kW)	40	26	37,5	37,5
Frecuencia de rotación (rpm)	1 750	3 500	1 750	1 750
Voltaje nominal (V)	220-440	220	220	220-440

Fuente: Empresa Proyectos Ingeniería y Arquitectura Matanzas, 2018.

¹ Achong Mendía, Isabel, Proyecto de Explotación de los pozos de abasto al acueducto Unión de Reyes, Informe Técnico Empresa Proyectos Ingeniería y Arquitectura Matanzas, 2018.

² Oficina Provincial de Geodesia y Cartografía, 2018.

³ Coordenadas nacionales en dirección Norte.

⁴ Coordenadas nacionales en dirección Este.

2.2 Descripción del software empleado: Epanet 2.0

Epanet es un programa de ordenador que realiza simulaciones en período prolongados del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de suministro a presión. Cualquier red en Epanet puede estar constituida por tuberías, nudos o uniones de tuberías, bombas, válvulas y depósitos de almacenamiento o embalses. Epanet efectúa un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías, las presiones en los nudos, los niveles en los depósitos, y la concentración de las especies químicas presentes en el agua, a lo largo del periodo de simulación discretizado en múltiples intervalos de tiempo. Además de la concentración de las distintas especies, puede también simular el envejecimiento del agua en la red y su procedencia desde las diversas fuentes de suministro. Entre las diferentes aplicaciones orientadas al análisis de las redes de distribución, puede citarse el diseño de programas de muestreo, la calibración de un modelo hidráulico, el análisis del cloro residual, o la evaluación de las dosis ingeridas por un abonado, puede resultar también de ayuda para evaluar diferentes estrategias de gestión dirigidas a mejorar la calidad del agua a lo largo del sistema.

Epanet proporciona un entorno integrado bajo *Windows*, para la edición de los datos de entrada a la red, la realización de simulaciones hidráulicas y de la calidad del agua, y la visualización de resultados en una amplia variedad de formatos. Entre éstos se incluyen mapas de la red codificados por colores, tablas numéricas, gráficas de evolución y mapas de isolíneas.

2.2.1 Prestaciones para la confección de modelos hidráulicos

Dos de los requisitos fundamentales para poder construir con garantías un modelo de la calidad del agua son la amplitud de prestaciones y la precisión del modelo hidráulico utilizado. Este software contiene un simulador hidráulico muy avanzado que ofrece las siguientes prestaciones:

1. No existe límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesarse
2. Las pérdidas de carga pueden calcularse mediante las fórmulas de Hazen-Williams, de Darcy-Weisbach o de Chezy-Manning.
3. Contempla pérdidas menores en codos, accesorios, etc.
4. Admite bombas de velocidad fija o variable.
5. Determina el consumo energético y sus costes.
6. Permite modelizar varios tipos de válvulas, tales como válvulas de corte, de

- retención, y reguladoras de presión o caudal.
7. Admite depósitos de geometría variable.
 8. Permite considerar diferentes tipos de demanda en los nudos, cada uno con su propia curva de modulación en el tiempo.
 9. Puede modelizar salidas de agua cuyo caudal dependa de la presión.
 10. Admite leyes de control simples, basadas en el valor del nivel en los depósitos o en la hora prefijada por un temporizador, y leyes de control más complejas basadas en reglas lógicas.

2.2.2 Pasos para utilizar Epanet.

Los pasos a seguir normalmente para modelizar un sistema de distribución de agua con Epanet son los siguientes:

1. Dibujar un esquema de la red de distribución o importar una descripción básica del mismo desde un fichero de texto.
2. Editar las propiedades de los objetos que configuran el sistema.
3. Describir el modo de operación del sistema.
4. Seleccionar las opciones de cálculo
5. Realizar el análisis hidráulico o de calidad del agua.
6. Ver los resultados del análisis.

2.3 Entorno de trabajo de Epanet.

En la figura 1.1 anexo 1 se muestra el entorno de trabajo básico de Epanet. En ella pueden observarse los siguientes elementos de la interface: una barra de menú, dos barras de herramientas, una barra de estado, la ventana del esquema de la red, la ventana del visor y la ventana del editor de propiedades.

2.3.1 La barra de menús

La barra de menús ocupa la parte superior de la ventana principal de Epanet, y contiene un conjunto de menús utilizados para controlar el funcionamiento del programa. Estos son:

1. Menú de archivo
2. Menú de edición
3. Menú ver
4. Menú de proyecto

5. Menú de informes
6. Menú de ventanas
7. Menú de ayuda

2.3.2 Menú de archivo

El menú de archivo contiene los comandos utilizados para abrir y guardar los archivos de datos, así como para imprimir. Estos se muestran a continuación en la tabla 2.2

Tabla 2.2 Detalles de los comandos del menú de archivos comando y descripción.

Comando	Descripción
Nuevo	Crea un nuevo proyecto de Epanet
Abrir	Abre un proyecto existente
Guardar	Guarda el proyecto actual
Guardar como	Guarda el proyecto actual con otro nombre
Importar	Importa los datos de la red o de su esquema desde otro archivo
Exportar	Exporta los datos de la red o de su esquema a otro archivo
Preparar pagina	Fija los márgenes, encabezados y pies de página para imprimir
Vista previa	Muestra una vista previa de la ventana actual
Imprimir	Imprime la ventana actual
Preferencias	Establece las preferencias para el modo de trabajo del programa
Salir	El usuario abandona el programa Epanet

2.3.3 Menú de edición

El menú de edición contiene los comandos utilizados para editar y copiar. Estos se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Detalles de los comandos del menú edición.

Comando	Descripción
Copiar a	Copia el contenido de la ventana activa actual (esquema, informe, gráfico o tabla) al portapapeles o a un archivo
Seleccionar objeto	Permite seleccionar un objeto del esquema de la red
Seleccionar vertice	Permite seleccionar los vértices del trazado de las tuberías sobre el esquema de la red
Seleccionar región	Permite seleccionar una región sobre el esquema de la red
Seleccionar todo	Selecciona toda el área ocupada por el esquema de la red
Editar grupo	Edita una propiedad elegida para el grupo de objetos que caen dentro de la región delimitada sobre el esquema

2.3.4 Menú ver.

Las opciones del menú ver controlan cómo se visualiza el esquema de la red. Estas se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Detalles de los comandos del menú ver.

Comando	Descripción
Dimensiones	Permite modificar las dimensiones del esquema y sus unidades
Mapa de fondo	Permite visualizar un mapa de fondo
Desplazar	Permite desplazar el esquema de la red
Acerca	Permite acercar el esquema de la red
Alejar	Permite alejar el esquema de la red
Encuadre	Redibuja el esquema completo de la red
Buscar	Localiza un elemento dado de la red y lo centra
Consultar	Localiza los elementos de la red que cumplen un criterio dado
Vista general	Activa/desactiva la visualización de un mapa global de la red
Leyendas	Activa/desactiva la visualización de las leyendas y permite su edición
Barra herramientas	Activa/desactiva la visualización de las barras de herramientas
Opciones	Fija las opciones para la visualización del esquema

2.3.5 Menú de proyecto.

El menú de proyecto incorpora los comandos relacionados con el análisis del proyecto en curso. Estos se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Detalles de los comandos del menú proyecto

Comando	Descripción
Resumen	Proporciona un resumen de las características del proyecto
Valores por defecto	Permite editar las propiedades por defecto del proyecto
Datos calibración	Maneja los ficheros de datos para la calibración de la red
Opciones de calculo	Permite editar las diversas opciones de cálculo
Calcular	Realiza la simulación

2.3.6 Menú de informes.

El menú de informes contiene los comandos utilizados para visualizar los resultados de la simulación en diversos formatos. Estos comandos se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Detalles de los comandos del menú de informes

Comando	Descripción
Estado	Muestra los cambios habidos en el estado de los elementos de la red a la

	largo de la simulación
Energías	Proporciona la energía consumida por cada bomba
Calibración	Compara las diferencias entre los valores medidos y los calculados mediante la simulación
Reacciones	Informa sobre las velocidades medias de reacción en los distintos componentes de la red
Completo	Crea un informe completo de los resultados para todos los nudos y líneas, en cada uno de los instantes de la simulación, y los guarda en un fichero de texto
Graficos	Crea curvas de evolución, perfiles longitudinales, curvas de distribución y mapas de isolíneas para la magnitud seleccionada
Tablas	Crea una tabla con los valores numéricos de las magnitudes elegidas, para los nudos y líneas seleccionados
Opciones	Controla el estilo de presentación de informes, gráficas o tablas

2.3.7 Menú de ventanas

Los comandos del menú de ventanas son mostrados en la tabla 2.7.

Tabla 2.7 Detalles de los comandos del menú ventanas

Comando	Descripción
Organizar	Reorganiza todas las ventanas hijas y las apila dentro de la ventana principal
Cerrar todo	Cierra todas las ventanas abiertas (excepto la del Esquema y la del Visor)
Lista de ventanas	Lista todas las ventanas abiertas, y marca la ventana activa actual

2.3.8 Menú de ayuda

El menú de ayuda contiene los comandos dirigidos a obtener la ayuda requerida durante el uso de Epanet. Estos son:

Tabla 2.8 Detalles de los comandos del menú ayuda.

Comando	Descripción
Temas de ayuda	Abre un cuadro de diálogo con los temas de ayuda
Unidades	Lista las unidades de medida de todos los parámetros utilizados por Epanet
Novedades	Informa de las novedades introducidas en la versión 2.0
Guía rápida	Ofrece una breve introducción para el uso de Epanet
Acerca de	Muestra información sobre la versión de Epanet en uso

La ayuda es accesible también desde los diferentes contextos, presionando la tecla F1.

2.4 Las barras de herramientas.













Las barras de herramientas proporcionan un acceso rápido a los comandos utilizados con mayor frecuencia. Se dispone de dos barras de herramientas:

1. La barra de herramientas estándar
2. La barra de herramientas del esquema

Las barras de herramientas pueden ajustarse debajo de la barra del menú principal o bien ser arrastradas a cualquier lugar del espacio de trabajo de Epanet. Cuando se separan de la barra de menús pueden también redimensionarse. Además, pueden hacerse visibles u ocultarse seleccionando el comando ver >> barra herramientas















2.4.1 La barra de herramientas estándar.

La barra de herramientas estándar contiene los botones para el acceso rápido a los comandos más usados.

-  Crea un proyecto nuevo (archivo >> nuevo)
-  Abre un proyecto existente (archivo >> abrir)
-  Guarda el proyecto actual (archivo >> guardar)
-  Imprime la ventana activa actual (archivo >> imprimir)
-  Copia los elementos seleccionados de la ventana actual al portapapeles o a un fichero (edición >> copiar a)
-  Borrar el elemento actualmente seleccionado.
-  Busca un determinado elemento sobre el esquema de la red (ver >> buscar)
-  Ejecuta una simulación (proyecto >> calcular)
-  Realiza una consulta visual sobre los elementos de la red (ver >> consultar)
-  Crea una nueva ventana gráfica de resultados (informes >> gráficos)
-  Crea una nueva ventana de resultados numéricos (informes >> tablas)
-  Modifica las opciones de la ventana activa actual (ver >> opciones ó informes >> opciones)

2.4.2 La barra de herramientas del esquema.

La barra de herramientas del esquema contiene una serie de botones para facilitar la edición y manipulación del esquema de la red.

-  Selecciona un objeto del esquema de la red (edición >> seleccionar objeto)
-  Selecciona los vértices de las líneas (edición >> seleccionar vértice)
-  Delimita una región sobre el esquema de la red (edición >> seleccionar región)
-  Permite desplazar el esquema de la red (ver >> desplazar)
-  Acerca el esquema de la red (ver >> acercar)
-  Aleja el esquema de la red (ver >> alejar)
-  Redibuja el esquema completo de la red (ver >> encuadre)
-  Añade un nudo de caudal sobre el esquema de la red
-  Añade un embalse sobre el esquema de la red
-  Añade un depósito sobre el esquema de la red
-  Añade una tubería sobre el esquema de la red
-  Añade una bomba sobre el esquema de la red
-  Añade un rótulo sobre el esquema de la red
-  Añade una válvula sobre el esquema de la red

2.4.3 La barra de estado.

La barra de estado está situada al pie del entorno de trabajo de Epanet y se divide en cinco secciones, las cuales ofrecen la siguiente información:

1. *Long-auto*: Indica si el cálculo automático de la longitud de las tuberías está activado o desactivado
2. Unidades de caudal: Muestra las unidades de caudal actuales
3. Nivel de zoom: Muestra el nivel de zoom actual del esquema (100 % corresponde a

la vista completa)

4. Estado de la simulación: Se representa mediante el icono de un grifo, con el siguiente significado:
 - 1) Si no sale agua, los resultados no están disponibles
 - 2) Si sale agua, los resultados son válidos y están disponibles
 - 3) Si el grifo aparece roto, los resultados están disponibles pero pueden no ser válidos porque algún dato ha sido modificado.
5. Posición xy : Muestra la posición del puntero del ratón, en las coordenadas del esquema.

2.5 Componentes físicos.

Epanet modeliza un sistema de distribución de agua como un conjunto de líneas conectadas a los nudos. Las líneas representan tuberías, bombas, o válvulas de control. Los nudos representan puntos de conexión entre tuberías o extremos de las mismas, con o sin demandas, y también depósitos o embalses. La figura 2.1 muestra cómo se interconectan estos objetos entre sí para formar el modelo de una red.

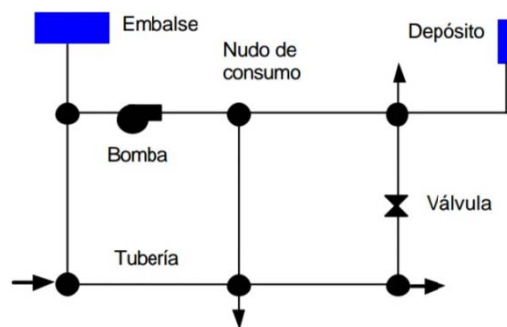


Figura 2.1 Componentes físicos de un sistema de distribución de agua.

2.5.1 Nudos de caudal.

Los nudos de caudal son los puntos de la red donde confluyen las tuberías, y a través de los cuales el agua entra o sale de la misma (también pueden ser sólo puntos de paso).

Los datos básicos imputados a los nudos son:

1. La cota respecto a un nivel de referencia (usualmente el nivel del mar)
2. La demanda de agua (flujo que abandona la red)
3. La calidad inicial del agua

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

1. La altura piezométrica (energía interna por unidad de peso del fluido, o bien suma

de la cota más la altura de presión)

2. La presión
3. La calidad del agua

Los nudos de caudal pueden también:

1. Presentar una demanda variable en el tiempo.
2. Tener asignados distintos tipos de demanda (doméstica, industrial, etc)
3. Presentar una demanda negativa, indicando que el caudal entra a la red a través del nudo.
4. Ser punto de entrada de un contaminante a la red.
5. Tener asociado un emisor (o hidrante), cuyo caudal de salida depende de la presión.

2.5.2 Embalses

Los embalses son nudos que representan una fuente externa de alimentación, de capacidad ilimitada. Se utilizan para modelizar elementos como lagos, captaciones desde ríos, acuíferos subterráneos, o también puntos de entrada a otros subsistemas.

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

2.5.3 Depósitos

Los depósitos son nudos con cierta capacidad de almacenamiento, en los cuales el volumen de agua almacenada puede variar con el tiempo durante la simulación. Los datos básicos de un depósito son:

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

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

1. La altura piezométrica (cota de la superficie libre)
2. La calidad del agua.

El nivel del agua en los depósitos debe oscilar entre el nivel mínimo y el nivel máximo. Epanet impide la salida del agua del depósito cuando está a su nivel mínimo y cierra la

entrada de agua cuando está a su nivel máximo. Los depósitos también pueden utilizarse como puntos de entrada de contaminantes a la red.

2.5.4 Emisores

Los emisores se emplean para simular el caudal que sale a través de un rociador en una red de extinción de incendios, o a través de un hidrante en un sistema de riego a presión. También pueden emplearse para simular una fuga en una tubería conectada al nudo (en este caso el coeficiente de descarga y el exponente de la presión en la fuga deben estimarse) o para calcular el caudal de incendios en un nudo (esto es, el caudal extra que puede suministrarse para una presión residual mínima). Para esto último basta imponer un valor elevado al coeficiente de descarga (por ejemplo 100 veces el caudal máximo esperado) y modificar la cota del nudo agregándole el valor de la presión mínima requerida, en pies (m). Epanet interpreta los emisores como una propiedad del nudo, y no como un componente independiente.

2.5.5 Tuberías

Las tuberías son líneas que transportan el agua de un nudo a otro. Epanet asume que las tuberías están completamente llenas en todo momento, y por consiguiente que el flujo es a presión. La dirección del flujo es siempre del nudo de mayor altura piezométrica⁵ al de menor altura piezométrica.

Los principales parámetros de una tubería son:

1. Los nudos inicial y final
2. El diámetro
3. La longitud
4. El coeficiente de rugosidad (para calcular las pérdidas de carga)
5. Su estado (abierta, cerrada, o con válvula de retención)

El parámetro de estado permite simular el hecho de que una tubería posea válvulas de corte o válvulas de retención (válvulas que permiten el paso del flujo en un solo sentido) sin tener que modelizar estos elementos explícitamente.

Los resultados en una tubería contemplan:

1. El caudal de circulación
2. La velocidad del flujo

⁵Suma de la cota más la presión, o bien energía interna por unidad de peso.

3. La pérdida de carga unitaria
4. El factor de fricción para la fórmula de Darcy-Weisbach
5. La velocidad media de reacción (a lo largo de la tubería)
6. La calidad media del agua (a lo largo de la tubería)

La pérdida de carga (o de altura piezométrica) en una tubería debida a la fricción por el paso del agua, puede calcularse utilizando tres fórmulas de pérdidas diferentes, la fórmula de Hazen-Williams, de Darcy-Weisbach o Chezy-Manning

La fórmula de Hazen-Williams es la más utilizada en EEUU. Sin embargo, no puede utilizarse para líquidos distintos del agua, y fue desarrollada originalmente sólo para flujo turbulento. Desde el punto de vista académico, la fórmula de Darcy-Weisbach es la más correcta, y es aplicable a todo tipo de líquidos y regímenes. Finalmente, la fórmula de Chezy-Manning es utilizada usualmente para canales y tuberías de gran diámetro, donde la turbulencia está muy desarrollada (véase las tablas 2.9 y 2.10 para más detalles).

Al aplicar la fórmula de Darcy-Weisbach, Epanet emplea distintos métodos para calcular el factor de fricción f , dependiendo del tipo de régimen:

1. Para flujo laminar ($Re < 2\ 300$) emplea la fórmula de Hagen–Poiseuille
2. Para flujo turbulento ($Re > 4\ 000$) emplea la aproximación explícita de Swamee y Jain a la fórmula de Colebrook-White
3. Para el flujo de transición ($2\ 00 < Re < 4\ 000$) aplica una interpolación cúbica al diagrama de Moody

Tabla 2.9 Fórmulas de pérdidas de carga para tuberías llenas.

Fórmula	Coefficiente de resistenci(A)	Caudal(B)
Hazen-Williams		1,852
Darcy-Weisbach		2
Chezy-Manning		2
Donde: C es el coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams ϵ es el coeficiente de rugosidad de Darcy-Weisbach f es el factor de fricción. n es el coeficiente de rugosidad de Manning d es el diámetro de la tubería (m) L es la longitud de la tubería (m) q es el caudal m^3/s		

Fuente: Streeter [74]

Tabla 2.10 Coeficiente de rugosidad para tuberías nuevas.

Material	C Hazen-Williams (universal)	ϵ Darcy-Weisbach (mm)	n Manning (universal)
Fundición	130 – 140	0,26	0,012 – 0,015
Hormigón u hormigón. revestido	120 – 140	0,3 – 3,0	0,012 – 0,017
Hierro 120 galvanizado	125-135	0,15	0,015 – 0,017
Plástico	140 – 150	0,0015	0,011 – 0,015
Acero	140 – 150	0,045	0,015 – 0,017
Cerámica	110		0,013 – 0,015

Fuente: Streeter [74]

2.5.6 Pérdidas menores

Las pérdidas menores (también denominadas pérdidas localizadas) son debidas al incremento de la turbulencia cuando el flujo pasa por un codo o un accesorio. La importancia de incluir o no tales pérdidas dependen del tipo de red modelizada y de la precisión de los resultados deseada. Para tenerlas en cuenta hay que incluir entre los datos de la tubería el coeficiente de pérdidas menores. El valor de la pérdida será el producto de dicho coeficiente por la altura dinámica en la tubería. las perdidas menores para diferentes accesorios son resumidos en la tabla 2.11.

Tabla 2.11 Coeficiente de perdidas menores para algunos accesorios.

Accesorios	Coeficiente pérdidas
Válvula de globo, todo abierta	10,0
Válvula de ángulo, todo abierta	5,0
Válvula retención abierta	2,5
Válvula compuerta, todo abierta	0,2
Codo de radio pequeño	0,9
Codo de radio mediano	0,8
Codo de radio grande	0,6
Codo a 45°	0,4
Codo de retorno (180°)	2,2
Té estándar – flujo recto	0,6
Té estándar – flujo desviado	1,8
Entrada brusca	0,5
Salida brusca	1,0

Fuente: Streeter [74]

2.5.7 Uso de bomba en Epanet.

Las bombas son líneas que comunican energía al fluido elevando su altura piezométrica. Los datos principales de una bomba son sus nudos de aspiración e impulsión y su curva característica (o relación entre caudal trasegado y la altura comunicada). En lugar de dar la curva característica, el comportamiento de una bomba puede también modelizarse suponiendo que aporta una cantidad de energía constante al fluido por unidad de tiempo (potencia constante), lo que permite determinar la altura comunicada al fluido en función del caudal de paso. El resultado principal asociado a una bomba es el incremento de altura comunicada al fluido. El flujo a través de una bomba es de sentido único, y Epanet no permite a la bomba operar fuera del rango delimitado por su curva característica.

Se pueden considerar también bombas de velocidad variable, sin más que especificar el valor de su velocidad relativa de giro, con las mismas restricciones anteriormente mencionadas. Por definición, a la curva original de la bomba suministrada como dato, se le supone una velocidad relativa de uno. De este modo, si la velocidad de giro se duplica, entonces la velocidad relativa sería dos; y si gira a mitad velocidad, entonces sería 0,5. Al cambiar la velocidad de giro de la bomba, su curva característica se desplaza y cambia de forma.

Al igual que las tuberías, las bombas puede pararse o arrancarse durante la simulación en instantes prefijados, o cuando se cumplan determinadas condiciones en la red. El modo de operación de una bomba puede también imponerse asignando una curva de modulación a su velocidad relativa. Epanet permite además calcular el consumo energético de una bomba y su coste. Para ello cada bomba puede tener asociada una curva de rendimientos y una curva de modulación de los costes energéticos. Si éstos no se especifican, se adoptarán los valores globales asignados para todo el proyecto.

Como antes se ha dicho, el caudal a través de una bomba es de sentido único. Si las condiciones de funcionamiento del sistema exigen una altura mayor que la que puede proporcionar la bomba, Epanet parará la bomba.

Si lo que se requiere es un caudal superior al máximo de su curva, el software extrapolará la curva de la bomba hasta obtener el caudal requerido, incluso si ello diera lugar a una altura negativa. En ambos casos se emitirá un mensaje de advertencia.

2.5.8 Válvulas

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

1. Los nudos aguas arriba y aguas abajo.
2. El diámetro
3. La consigna
4. Su estado

Los resultados asociados con una válvula son básicamente el caudal de paso y la pérdida de carga.

Los tipos de válvulas contemplados en Epanet son:

1. Válvulas reductoras de presión (VRP) (en inglés *PRV*)
2. Válvulas sostenedoras de presión (VSP) (en inglés *PSV*)
3. Válvulas de rotura de carga (VRC) (en inglés *PBV*)
4. Válvulas de control del caudal (VCQ) (en inglés *FCV*)
5. Válvulas de regulación (VRG) (en inglés *TCV*)
6. Válvulas de propósito general (VPG) (en inglés *GPV*).

Las VRPs tratan de limitar la presión en el nudo aguas abajo de la válvula. Epanet determina en cada momento en cuál de los tres estados posibles se encuentra la válvula:

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

Las válvulas VSPs tratan de mantener la presión en el nudo aguas arriba de la válvula. Epanet determina asimismo en cada momento en cuál de los tres estados posibles se encuentra la válvula:

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

Las válvulas VRCs fuerzan el valor de la caída de presión a través de la válvula. El flujo a través de la válvula puede ser en cualquier dirección. Estas válvulas no representan a ningún componente físico, pero son muy útiles para modelizar situaciones en las que la caída de presión a través de la válvula es conocida.

Las válvulas VCQs limitan el caudal de paso a través de la válvula a un valor prefijado. El programa emite un mensaje de advertencia si no puede conseguirse dicho caudal, de no ser que hubiera un aporte de energía (esto es, si el caudal a válvula abierta fuera inferior al de consigna).

Las válvulas VRGs son bidireccionales y simulan una válvula parcialmente cerrada, cuyo comportamiento queda determinado por el valor del coeficiente de pérdidas en la válvula. Usualmente los fabricantes proporcionan la relación entre dicho coeficiente y el grado de apertura de la válvula.

Las VPGs se utilizan para representar una línea cuya relación pérdida-caudal es proporcionada por el usuario, en lugar de seguir el comportamiento típico de las válvulas establecido por la ecuación de pérdidas. Pueden utilizarse para modelizar una turbina, el descenso dinámico de un pozo o una válvula reductora de presión controlada por caudal.

Las válvulas de corte (tipo compuerta) y las válvulas de retención (o antirretorno), cuya acción es abrir o cerrar totalmente el paso del flujo, no se consideran como líneas independientes, sino que deben incorporarse como propiedades de la tubería en la cual se alojan.

Cada tipo de válvula tiene una consigna diferente, relacionada con su comportamiento (la presión en el caso de las VRPs y VSPs, la caída de presión para las VRCs, el caudal para las VCQs, el coeficiente de pérdidas para las VRGs y la curva de pérdidas para las VPGs).

La consigna de control de una válvula puede inhibirse especificando en un momento determinado que ésta se encuentra totalmente abierta o totalmente cerrada. Tanto el estado de una válvula como su consigna pueden modificarse a lo largo de una simulación utilizando las leyes de control.

Debido al modo en que internamente se ha modelizado el comportamiento de las diferentes válvulas, hay que cumplir ciertas normas a la hora de añadir las válvulas al esquema de la red:

1. Una VRP, VSP ó VCQ no puede conectarse directamente a un embalse o depósito

(utilizar una tubería de pequeña longitud para enlazarlos en tal caso)

2. Dos VRPs no pueden compartir el nudo aguas abajo, ni conectarse en serie.
3. Dos VSPs no pueden compartir el nudo aguas arriba, ni conectarse en serie.
4. Una VSP no puede conectarse al nudo aguas abajo de una VRP.

CAPITULO 3 ANALISIS DE RESULTADOS

3.1 Antecedentes

En sus inicios el acueducto de Unión de Reyes prestaba servicios solamente a una minoritaria porción de la población y las fuentes de abasto empleadas se localizaban en el mismo sitio donde actualmente radican las oficinas de la Dirección Municipal de Acueducto y Alcantarillado. Con el paso del tiempo el poblado también fue creciendo y con esto la necesidad de brindar un servicio de calidad a las zonas más alejadas.

3.2 Red de distribución.

La red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes se origina en el patio de la UEB del acueducto Municipal, llegando hasta el politécnico Elpidio Verobides, el cual es el punto más distante del poblado. En su recorrido la red se divide en un total de ocho circuitos, los cuales son resumidos en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Descripción de los circuitos principales de la red hidráulica Unión de Reyes.

Circuito 1		
Diámetro Interno (mm)	Longitud (m)	Material constituyente
250	55	Hiero fundido
200	153	Hiero fundido
150	445	Hiero fundido
100	1015	Hiero fundido
Circuito 2		
Diámetro Interno (mm)	Longitud (m)	Material constituyente
250	157	Hiero fundido
200	225	Hiero fundido
150	153	Hiero fundido
100	296	Hiero fundido
Circuito 3		
Diámetro Interno (mm)	Longitud (m)	Material constituyente
250	150	Hiero fundido
200	147	Hiero fundido
150	779	Hiero fundido
100	434	Hiero fundido
Circuito 4		
Diámetro Interno (mm)	Longitud (m)	Material constituyente

150	414	Hiero fundido
100	669	Hiero fundido
Circuito 5		
Diámetro Interno (mm)	Longitud (m)	Material constituyente
200	200	Hiero fundido
100	522	Hiero fundido
Circuito 6		
Diámetro Interno (mm)	Longitud (m)	Material constituyente
200	215	Hiero fundido
150	86	Hiero fundido
100	437	Hiero fundido
50	90	Hiero fundido
Circuito 7		
Diámetro Interno (mm)	Longitud (m)	Material constituyente
200	585	Hiero fundido
100	1354	Hiero fundido
75	150	Hiero fundido
50	435	Hiero fundido
Circuito 8		
Diámetro Interno (mm)	Longitud (m)	Material constituyente
150	320	Hiero fundido
100	653	Hiero fundido

Epanet representa los sistemas en una vista en planta (2D)¹ de la red analizada, en la cual se muestran los circuitos fundamentales, nombres de calles y ubicación de válvulas, véase la figura 3.1).

Los diámetros y longitudes correspondientes a cada rama, se reflejan en la tabla 3.2.

3.3 Análisis hidráulico de la conductora de suministro Piloto.

Para el análisis hidráulico de la conductora “Piloto”, se necesita primeramente identificar la cantidad y los tipos de accesorios que se encuentran instalados en la misma, las características fundamentales de la conductora, así como conocer el caudal que circula por su interior, además de disponer también de las condiciones de funcionamiento de las bombas instaladas y los valores reales de sus parámetros de trabajo.

¹ Se refiere a coordenadas en el plano, o sea el plano X-Y (largo y ancho)

Tabla 3.2 Características fundamentales de las líneas de tuberías de la red estudiada.

Rama	L (m)	d (m)	Rama	L (m)	d (m)	Rama	L (m)	d (m)	Rama	L (m)	d (m)	Rama	L (m)	d (m)
1	120	0,25	40	26	0,15	79	50	0,1	117	120	0,2	156	120	0,15
2	76	0,25	41	100	0,1	80	60	0,1	118	84	0,15	157	72	0,15
3	82	0,25	42	96	0,1	81	216	0,1	119	115	0,2	158	120	0,15
4	102	0,2	43	100	0,15	82	30	0,1	120	70	0,1	159	40	0,15
5	68	0,1	44	96	0,15	83	150	0,1	121	230	0,1	179	170	0,1
6	54	0,2	45	70	0,1	84	56	0,1	122	70	0,1	180	146	0,1
8	68	0,1	46	78	0,1	85	50	0,1	123	100	0,2	181	50	0,1
9	60	0,1	47	100	0,1	86	30	0,1	124	65	0,15	182	50	0,1
10	72	0,1	48	95	0,1	87	48	0,1	125	100	0,25	185	26	0,1
11	70	0,1	49	98	0,1	88	120	0,15	126	180	0,1	186	30	0,1
12	83	0,15	50	95	0,1	89	20	0,2	127	120	0,1			
13	100	0,1	51	26	0,1	90	102	0,1	128	170	0,1			
14	68	0,1	52	98	0,15	91	60	0,2	129	50	0,1			
15	66	0,1	53	95	0,1	92	140	0,15	130	170	0,1			
16	78	0,1	54	104	0,1	93	120	0,15	131	50	0,1			
17	78	0,1	55	114	0,1	94	140	0,1	132	170	0,1			
18	76	0,15	56	140	0,2	95	120	0,1	133	50	0,1			
19	60	0,2	57	120	0,2	96	68	0,1	134	50	0,1			
20	40	0,2	58	2410	0,25	97	230	0,2	135	50	0,1			
21	96	0,1	59	170	0,25	98	40	0,15	136	80	0,1			
22	66	0,1	60	290	0,25	99	140	0,1	137	80	0,25			
23	162	0,15	61	70	0,25	100	100	0,1	138	100	0,025			
24	400	0,1	62	240	0,2	101	72	0,1	139	186	0,1			
25	100	0,1	63	250	0,2	102	54	0,1	140	110	0,1			
26	80	0,1	64	1265	0,2	103	72	0,1	141	54	0,1			
27	84	0,15	67	102	0,15	104	100	0,1	142	186	0,1			
28	36	0,1	68	150	0,1	105	140	0,1	144	52	0,1			
29	104	0,1	69	60	0,1	106	72	0,1	145	146	0,1			
30	74	0,1	70	70	0,1	107	72	0,1	146	74	0,1			
31	190	0,15	71	100	0,075	108	100	0,1	148	120	0,15			
32	100	0,1	72	80	0,1	109	68	0,15	149	76	0,1			
33	98	0,1	73	100	0,2	110	110	0,15	150	120	0,15			
34	100	0,2	74	52	0,1	112	30	0,15	151	76	0,1			
35	100	0,2	75	85	0,1	113	40	0,15	152	172	0,1			
36	100	0,1	76	80	0,1	114	74	0,1	153	160	0,1			
37	38,9	0,25	77	40	0,1	115	80	0,2	154	40	0,15			
39	122	0,1	78	70	0,1	116	205	0,15	155	72	0,15			



Figura 3.1 Representación gráfica de la pantalla dinámica de la red analizada.

Una vez obtenidos los valores numéricos de los parámetros antes mencionados, la caída de presión experimentada por la masa fluida en este tramo de conductoras, se determina a partir de la aplicación de la expresión (1.4). Con la ayuda de la tabla 3.2, se determinan las longitudes de tuberías de esta conductora, encontrándose que la misma posee una longitud igual a 3 160 m, siendo todos los tubos que la integran de hierro fundido usados, por tanto, a partir de lo planteado en la tabla 1.1, se toma un valor intermedio de rugosidad equivalente igual a 1,4 mm. El caudal de fluido entregado es igual a la sumatoria de los caudales aportados por los bombes uno y dos, siendo el valor numérico de esta sumatoria igual a 51 l/s, o lo que es lo mismo 0,051 m³/s.

Según lo definido en las normas ASCE [4], se considera como conductora a la línea de tuberías que se emplea para el trasiego de fluidos desde el punto de bombeo hasta el punto de distribución o almacenamiento del mismo. La conductora analizada está integrada por un número importante de accesorios los cuales son mostrados con sus respectivos coeficientes de pérdidas en la tabla 3.3

Tabla 3.3 Resumen de pérdidas por accesorios en la conductora Piloto

Accesorios	Cantidad	Valor de ξ	$\sum \xi$
Codos 90 (r/d)= 0,25	3	1,5	4,5
Uniones roscadas	10	0,9	9
Total			13,5

3.4 Análisis hidráulico de la conductora de suministro Fumerito.

Para el análisis hidráulico de la conductora “Fumerito”, se aplicara la misma metodología seguida para el análisis efectuado a la conductora Piloto.

Con la ayuda de la figura 3.2, se determinan las longitudes de tuberías de esta conductora, encontrándose que la misma posee una longitud igual a 1 755 m, siendo todos los tubos que la integran de hierro fundido usados, por tanto, se toma un valor intermedio de rugosidad equivalente igual a 1,4 mm. El caudal de fluido que circula por esta conductora es igual al proporcionado por la estación de bombeo Fumerito, que es igual a 30 l/s, o lo que es lo mismo $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$.

El tramo analizado está constituido por un grupo de accesorios, los cuales son resumidos, con sus respectivos coeficientes de pérdidas en la Tabla 3.4

Tabla 3.4 Resumen de pérdidas por accesorios en la conductora Fumerito

Accesorios	Cantidad	Valor de ξ	$\sum \xi$
Codos 90 (r/d)= 0,25	3	1,5	4,5
Uniones roscadas	10	0,9	9
Derivación en 90°	1	0,6	0,6
Total			14,1

3.5 Análisis de los resultados obtenidos por el software Epanet.

Como se explicó anteriormente en el análisis bibliográfico [19], se considera que una red de distribución hidráulica cumple los requerimientos de excelencia en la calidad de distribución cuando cada rama es capaz de entregar un caudal equivalentemente igual a 90 litros como promedio diario por consumidor, y además en cada nodo la carga hidrostática sea mayor que 125 kPa, esto es aproximadamente igual a los 12,8 m de columna líquida.

Cuando Epanet calcula el sistema se llega a la conclusión de que existen más de 25 nodos del sistema cuya presión no rebasa la impuesta por las condiciones de excelencia para un

funcionamiento correcto y eficiente de la red, estando la mayoría ubicados en la porción norte del poblado y otros en la porción más al sur, a pesar de que las 3 estaciones de bombeo se encuentran activas y entregando un caudal superior al requerido por el consumo tanto residencial como estatal.

Tras la puesta en marcha del bombeo intermedio, se realizó una comprobación de los nuevos parámetros de funcionamiento de la red, y se comprobó que los mismos reúnen los requisitos de excelencia en todos los nodos de la misma ya que la simulación brindó los datos de presión en cada uno de los nodos los cuales son sumamente satisfactorios en el sector residencial. De esta forma se puede constatar que los sectores más afectados de la población que son la parte norte y el extremo sur este del poblado presentan niveles satisfactorios de presión.

3.6 Comparación entre los resultados obtenidos con Epanet y el método de Cross.

En el presente trabajo se implementó el uso de la herramienta computacional Epanet 2.0 con el objetivo de establecer una comparación entre los resultados obtenidos con la aplicación del método iterativo de Cross y los arrojados por este software profesional, esta comparación se muestra a continuación en la tabla 3.5.

El error calculado y posteriormente tabulado en la Tabla 3.5 se determinó a partir de la siguiente expresión:

$$\% Error = 100 \cdot \left| \frac{Cross - EPANET}{Cross} \right| \quad (3.1)$$

Como se puede apreciar en los valores obtenidos mediante el uso de este simulador profesional, se encuentra que el error máximo con respecto a los valores obtenidos mediante el proceso iterativo proporcionado por el método de Cross, va a ser igual a 3,37 por ciento, y el error promedio es del orden de un 1,94 por ciento. Las magnitudes de los errores están dentro del margen de valores permisibles, demostrándose de esta forma la validez del sistema de ecuaciones propuesto por el autor del presente trabajo.

Tabla 3.5 Comparación de los los caudales obtenidos con el uso de Epanet y Cross.

	Cross	Epanet	% Error		Cross	Epanet	% Error
Q Inicial	81	81	0,0	Tubería 40	0,2	0,2	0,0
Tubería 1	54,16	55,16	1,81	Tubería 41	3,68	3,77	2,44
Tubería 2	47,58	48,65	2,22	Tubería 42	3,33	3,41	2,40
Tubería 3	42,82	43,78	2,19	Tubería 43	5,41	5,53	2,21

Tubería 4	21,33	21,81	2,23
Tubería 5	9,91	10,13	2,17
Tubería 6	19,68	20,13	2,24
Tubería 8	7,58	7,75	2,19
Tubería 9	5,06	5,17	2,12
Tubería 10	6,16	6,3	2,22
Tubería 11	4,93	5,04	2,18
Tubería 12	0,32	0,31	3,22
Tubería 13	5,92	6,06	2,31
Tubería 14	6,54	6,69	2,24
Tubería 15	4,9	5,01	2,19
Tubería 16	3,55	3,64	2,47
Tubería 17	3,64	3,72	2,15
Tubería 18	2,49	2,54	1,96
Tubería 19	26,83	27,31	1,75
Tubería 20	19,52	19,84	1,61
Tubería 21	7,13	7,29	2,19
Tubería 22	4,02	4,11	2,18
Tubería 23	14,37	14,69	2,17
Tubería 24	2,06	2,1	1,90
Tubería 26	2,01	2,06	2,42
Tubería 27	12,21	12,49	2,24
Tubería 28	4,22	4,32	2,31
Tubería 31	3,11	3,17	1,89
Tubería 32	1,99	2,04	2,45
Tubería 33	4,07	4,16	2,16
Tubería 25	4,07	4,16	2,16
Tubería 29	3,94	4,03	2,23
Tubería 30	2,07	2,12	2,35
Tubería 34	26,54	27,14	2,21
Tubería 35	29,04	29,68	2,15
Tubería 36	5,54	5,66	2,12
Tubería 39	2,72	2,79	2,50
Tubería 157	1,3	1,33	2,30
Tubería 158	0,61	0,63	3,27
Tubería 159	0,69	0,7	1,44
Tubería 145	2,51	2,57	2,39
Tubería 179	4,38	4,49	2,51

Tubería 44	4,26	4,35	2,11
Tubería 45	5,44	5,56	2,20
Tubería 46	5,09	5,2	2,16
Tubería 47	1,94	1,99	2,57
Tubería 48	1,61	1,64	1,86
Tubería 49	2,29	2,34	2,18
Tubería 50	2,92	2,99	2,39
Tubería 51	4,23	4,32	2,12
Tubería 52	7,89	8,07	2,28
Tubería 53	3,67	3,75	2,17
Tubería 54	3,93	4,02	2,29
Tubería 55	3,6	3,68	2,22
Tubería 58	48,08	49,08	2,07
Tubería 59	48,08	49,08	2,07
Tubería 60	48,08	49,08	2,07
Tubería 61	47,66	47,92	0,54
Tubería 62	33,33	33,3	0,09
Tubería 63	33,33	33,3	0,09
Tubería 64	33,33	33,3	0,09
Tubería 68	2,68	2,74	2,23
Tubería 69	3,25	3,33	2,46
Tubería 70	3,26	3,34	2,45
Tubería 71	1,6	1,64	2,50
Tubería 72	4,87	4,98	2,25
Tubería 73	4,87	4,98	2,25
Tubería 74	3,86	3,95	2,33
Tubería 75	3,86	3,95	2,33
Tubería 76	4,87	4,98	2,25
Tubería 77	0,58	0,59	1,72
Tubería 78	1,6	1,64	2,50
Tubería 79	5,37	5,5	2,42
Tubería 80	5,38	5,51	2,41
Tubería 81	0,01	0,01	0,00
Tubería 180	2,51	2,57	2,39
Tubería 181	4,76	4,87	2,31
Tubería 182	4,76	4,87	2,31
Tubería 185	4,81	4,92	2,28
Tubería 186	4,81	4,92	2,28

3.7 Desarrollo de la composición numérica de la matriz de flujo de Epanet.

A pesar de la aparente sencillez en el proceso de ajuste y validación matricial a través de Epanet, detrás de ese procedimiento computacional se oculta en la interface numérica un complejo procedimiento matemático que ajusta los caudales y pérdidas de presiones mediante balances nodales y de ramas. La interface de Epanet puede ser exportada a otros programas computacionales, como Aspen o Open Foam, para este propósito Epanet transcribe la matriz de corrección mediante balances de mallas. En el presente trabajo son representadas numéricamente cada una de las mallas, para evitar confusiones de interpretación del block de notas que utiliza como medio de exportación el Epanet. Estas ecuaciones de balance son dadas a continuación (los subíndices empleados se refieren a número de tubería de la tabla 3.5).

Corrección para la malla I.

$$\Delta L_I = - \left[\frac{K_{19}Q_{19}^2 + K_{21}Q_{21}^2 + K_{31}Q_{31}^2 - K_1Q_1^2 - K_{13}Q_{13}^2}{2[K_{19}Q_{19} + K_{21}Q_{21} + K_{31}Q_{31} + K_1Q_1 + K_{13}Q_{13}]} \right] \quad (3.2)$$

Corrección para la malla II.

$$\Delta L_{II} = - \left[\frac{-K_2Q_2^2 + K_{13}Q_{13}^2 + K_{18}Q_{18}^2 - K_{181}Q_{181}^2}{2[K_2Q_2 + K_{13}Q_{13} + K_{18}Q_{18} + K_{181}Q_{181}]} \right] \quad (3.3)$$

Corrección para la malla III.

$$\Delta L_{III} = - \left[\frac{-K_3Q_3^2 - K_4Q_4^2 - K_{12}Q_{12}^2 + K_{181}Q_{181}^2}{2[K_3Q_3 + K_4Q_4 + K_{163}Q_{163} + K_{181}Q_{181}]} \right] \quad (3.4)$$

Corrección para la malla IV.

$$\Delta L_{IV} = - \left[\frac{K_{92}Q_{92}^2 + K_4Q_4^2 - K_{90}Q_{90}^2 - K_{56}Q_{56}^2}{2[K_{92}Q_{92} + K_4Q_4 + K_{90}Q_{90} + K_{56}Q_{56}]} \right] \quad (3.5)$$

Corrección para la malla V.

$$\Delta L_V = - \left[\frac{K_{93}Q_{93}^2 - K_{57}Q_{57}^2 + K_{90}Q_{90}^2 + K_{67}Q_{67}^2}{2[K_{93}Q_{93} + K_{57}Q_{57} + K_{90}Q_{90} + K_{67}Q_{67}]} \right] \quad (3.6)$$

Corrección para la malla VI.

$$\Delta L_{VI} = - \left[\frac{-K_{93}Q_{93}^2 - K_{109}Q_{109}^2 - K_{95}Q_{95}^2 + K_{96}Q_{96}^2}{2[K_{93}Q_{93} + K_{109}Q_{109} + K_{95}Q_{95} + K_{96}Q_{96}]} \right] \quad (3.7)$$

Corrección para la malla VII.

$$\Delta L_{VII} = - \left[\frac{K_5Q_5^2 - K_{94}Q_{94}^2 - K_{92}Q_{92}^2 - K_{96}Q_{96}^2}{2[K_5Q_5 + K_{94}Q_{94} + K_{92}Q_{92} + K_{96}Q_{96}]} \right] \quad (3.8)$$

Corrección para la malla VIII.

$$\Delta L_{VIII} = - \left[\frac{-K_5Q_5^2 + K_8Q_8^2 + K_{10}Q_{10}^2 + K_{12}Q_{12}^2}{2[K_5Q_5 + K_8Q_8 + K_{10}Q_{10} + K_{12}Q_{12}]} \right] \quad (3.9)$$

Corrección para la malla IX.

$$\Delta L_{IX} = - \left[\frac{-K_{18}Q_{18}^2 - K_8Q_8^2 + K_{17}Q_{17}^2 + K_{14}Q_{14}^2}{2[K_{18}Q_{18} + K_8Q_8 + K_{17}Q_{17} + K_{14}Q_{14}]} \right] \quad (3.10)$$

Corrección para la malla X.

$$\Delta L_X = - \left[\frac{K_{32}Q_{32}^2 + K_{33}Q_{33}^2 + K_{22}Q_{22}^2 - K_{14}Q_{14}^2 - K_{31}Q_{31}^2}{2[K_{32}Q_{32} + K_{33}Q_{33} + K_{22}Q_{22} + K_{14}Q_{14} + K_{31}Q_{31}]} \right] \quad (3.11)$$

Corrección para la malla XI.

$$\Delta L_{XI} = - \left[\frac{K_{20}Q_{20}^2 + K_{23}Q_{23}^2 - K_{22}Q_{22}^2 + K_{24}Q_{24}^2 - K_{21}Q_{21}^2}{2[K_{20}Q_{20} + K_{23}Q_{23} + K_{22}Q_{22} + K_{24}Q_{24} + K_{21}Q_{21}]} \right] \quad (3.12)$$

Corrección para la malla XII.

$$\Delta L_{XII} = - \left[\frac{K_{27}Q_{27}^2 + K_{28}Q_{28}^2 - K_{26}Q_{26}^2 - K_{24}Q_{24}^2}{2[K_{27}Q_{27} + K_{28}Q_{28} + K_{26}Q_{26} + K_{24}Q_{24}]} \right] \quad (3.13)$$

Corrección para la malla XIII.

$$\Delta L_{XIII} = - \left[\frac{K_{29}Q_{29}^2 - K_{30}Q_{30}^2 + K_{26}Q_{26}^2 - K_{33}Q_{33}^2}{2[K_{29}Q_{29} + K_{30}Q_{30} + K_{26}Q_{26} + K_{33}Q_{33}]} \right] \quad (3.14)$$

Corrección para la malla XIV.

$$\Delta L_{XIV} = - \left[\frac{K_{25}Q_{25}^2 - K_{32}Q_{32}^2 + K_{30}Q_{30}^2 - K_{15}Q_{15}^2}{2[K_{25}Q_{25} + K_{32}Q_{32} + K_{30}Q_{30} + K_{15}Q_{15}]} \right] \quad (3.15)$$

Corrección para la malla XV.

$$\Delta L_{XV} = - \left[\frac{-K_9 Q_9^2 - K_{17} Q_{17}^2 + K_{16} Q_{16}^2 + K_{15} Q_{15}^2}{2[K_9 Q_9 + K_{17} Q_{17} + K_{16} Q_{16} + K_{15} Q_{15}]} \right] \quad (3.16)$$

Corrección para la malla XVI.

$$\Delta L_{XVI} = - \left[\frac{K_9 Q_9^2 - K_{10} Q_{10}^2 + K_{11} Q_{11}^2 - K_6 Q_6^2}{2[K_9 Q_9 + K_{10} Q_{10} + K_{11} Q_{11} + K_6 Q_6]} \right] \quad (3.17)$$

Corrección para la malla XVII.

$$\Delta L_{XVII} = - \left[\frac{K_6 Q_6^2 - K_{102} Q_{102}^2 + K_{94} Q_{94}^2 - K_{99} Q_{99}^2}{2[K_6 Q_6 + K_{102} Q_{102} + K_{94} Q_{94} + K_{99} Q_{99}]} \right] \quad (3.18)$$

Corrección para la malla XVIII.

$$\Delta L_{XVIII} = - \left[\frac{K_{95} Q_{95}^2 + K_{102} Q_{102}^2 - K_{98} Q_{98}^2 - K_{101} Q_{101}^2 - K_{103} Q_{103}^2}{2[K_{95} Q_{95} + K_{102} Q_{102} + K_{98} Q_{98} + K_{101} Q_{101} + K_{103} Q_{103}]} \right] \quad (3.19)$$

Corrección para la malla XIX.

$$\Delta L_{XIX} = - \left[\frac{K_{100} Q_{100}^2 - K_{104} Q_{104}^2 + K_{101} Q_{101}^2 - K_{107} Q_{107}^2}{2[K_{100} Q_{100} + K_{104} Q_{104} + K_{101} Q_{101} + K_{107} Q_{107}]} \right] \quad (3.20)$$

Corrección para la malla XX.

$$\Delta L_{XX} = - \left[\frac{-K_{100} Q_{100}^2 - K_{106} Q_{106}^2 + K_{103} Q_{103}^2 + K_{108} Q_{108}^2}{2[K_{100} Q_{100} + K_{106} Q_{106} + K_{103} Q_{103} + K_{108} Q_{108}]} \right] \quad (3.21)$$

Corrección para la malla XXI.

$$\Delta L_{XXI} = - \left[\frac{K_{34} Q_{34}^2 + K_{99} Q_{99}^2 + K_{105} Q_{105}^2 - K_{108} Q_{108}^2}{2[K_{34} Q_{34} + K_{99} Q_{99} + K_{105} Q_{105} + K_{108} Q_{108}]} \right] \quad (3.22)$$

Corrección para la malla XXII.

$$\Delta L_{XXII} = - \left[\frac{-K_{34} Q_{34}^2 - K_{11} Q_{11}^2 + K_{45} Q_{45}^2 + K_{41} Q_{41}^2}{2[K_{34} Q_{34} + K_{11} Q_{11} + K_{45} Q_{45} + K_{41} Q_{41}]} \right] \quad (3.23)$$

Corrección para la malla XXIII.

$$\Delta L_{XXIII} = - \left[\frac{-K_{16} Q_{16}^2 + K_{43} Q_{43}^2 + K_{46} Q_{46}^2 - K_{41} Q_{41}^2}{2[K_{16} Q_{16} + K_{43} Q_{43} + K_{46} Q_{46} + K_{41} Q_{41}]} \right] \quad (3.24)$$

Corrección para la malla XXIV.

$$\Delta L_{XXIV} = - \left[\frac{K_{54}Q_{54}^2 - K_{43}Q_{43}^2 + K_{47}Q_{47}^2 - K_{25}Q_{25}^2}{2[K_{54}Q_{54} + K_{43}Q_{43} + K_{47}Q_{47} + K_{25}Q_{25}]} \right] \quad (3.25)$$

Corrección para la malla XXV.

$$\Delta L_{XXV} = - \left[\frac{K_{49}Q_{49}^2 + K_{55}Q_{55}^2 - K_{47}Q_{47}^2 - K_{29}Q_{29}^2}{2[K_{49}Q_{49} + K_{55}Q_{55} + K_{47}Q_{47} + K_{29}Q_{29}]} \right] \quad (3.26)$$

Corrección para la malla XXVI.

$$\Delta L_{XXVI} = - \left[\frac{-K_{49}Q_{49}^2 - K_{28}Q_{28}^2 + K_{51}Q_{51}^2 + K_{52}Q_{52}^2}{2[K_{49}Q_{49} + K_{28}Q_{28} + K_{51}Q_{51} + K_{52}Q_{52}]} \right] \quad (3.27)$$

Corrección para la malla XXVII.

$$\Delta L_{XXVII} = - \left[\frac{K_{53}Q_{53}^2 - K_{40}Q_{40}^2 - K_{51}Q_{51}^2 - K_{50}Q_{50}^2}{2[K_{53}Q_{53} + K_{40}Q_{40} + K_{51}Q_{51} + K_{50}Q_{50}]} \right] \quad (3.28)$$

Corrección para la malla XXVIII.

$$\Delta L_{XXVIII} = - \left[\frac{-K_{55}Q_{55}^2 - K_{48}Q_{48}^2 + K_{39}Q_{39}^2 + K_{50}Q_{50}^2}{2[K_{55}Q_{55} + K_{48}Q_{48} + K_{39}Q_{39} + K_{50}Q_{50}]} \right] \quad (3.29)$$

Corrección para la malla XXIX.

$$\Delta L_{XXIX} = - \left[\frac{K_{84}Q_{84}^2 + K_{85}Q_{85}^2 + K_{48}Q_{48}^2 - K_{44}Q_{44}^2 - K_{54}Q_{54}^2}{2[K_{84}Q_{84} + K_{85}Q_{85} + K_{48}Q_{48} + K_{44}Q_{44} + K_{54}Q_{54}]} \right] \quad (3.30)$$

Corrección para la malla XXX.

$$\Delta L_{XXX} = - \left[\frac{-K_{46}Q_{46}^2 - K_{42}Q_{42}^2 + K_{86}Q_{86}^2 + K_{44}Q_{44}^2 + K_{87}Q_{87}^2}{2[K_{46}Q_{46} + K_{42}Q_{42} + K_{86}Q_{86} + K_{44}Q_{44} + K_{87}Q_{87}]} \right] \quad (3.31)$$

Corrección para la malla XXXI.

$$\Delta L_{XXXI} = - \left[\frac{K_{36}Q_{36}^2 - K_{35}Q_{35}^2 - K_{45}Q_{45}^2 + K_{42}Q_{42}^2}{2[K_{36}Q_{36} + K_{35}Q_{35} + K_{45}Q_{45} + K_{42}Q_{42}]} \right] \quad (3.32)$$

Corrección para la malla XXXII.

$$\Delta L_{XXXII} = - \left[\frac{-K_{117}Q_{117}^2 - K_{105}Q_{105}^2 - K_{115}Q_{115}^2 + K_{89}Q_{89}^2 + K_{35}Q_{35}^2}{2[K_{117}Q_{117} + K_{105}Q_{105} + K_{115}Q_{115} + K_{89}Q_{89} + K_{35}Q_{35}]} \right] \quad (3.33)$$

Corrección para la malla XXXIII.

$$\Delta L_{XXXIII} = - \left[\frac{-K_{114}Q_{114}^2 - K_{118}Q_{118}^2 - K_{116}Q_{116}^2 + K_{117}Q_{117}^2 + K_{106}Q_{106}^2 + K_{104}Q_{104}^2 + K_{107}Q_{107}^2}{2[K_{114}Q_{114} + K_{118}Q_{118} + K_{116}Q_{116} + K_{117}Q_{117} + K_{106}Q_{106} + K_{104}Q_{104} + K_{107}Q_{107}]} \right] \quad (3.34)$$

Corrección para la malla XXXIV.

$$\Delta L_{XXXIV} = - \left[\frac{-K_{123}Q_{123}^2 - K_{122}Q_{122}^2 + K_{91}Q_{91}^2 + K_{115}Q_{115}^2}{2[K_{123}Q_{123} + K_{122}Q_{122} + K_{91}Q_{91} + K_{115}Q_{115}]} \right] \quad (3.35)$$

Corrección para la malla XXXV.

$$\Delta L_{XXXV} = - \left[\frac{-K_{121}Q_{121}^2 + K_{122}Q_{122}^2 - K_{120}Q_{120}^2 + K_{97}Q_{97}^2}{2[K_{121}Q_{121} + K_{122}Q_{122} + K_{120}Q_{120} + K_{97}Q_{97}]} \right] \quad (3.36)$$

Corrección para la malla XXXVI.

$$\Delta L_{XXXVI} = - \left[\frac{-K_{88}Q_{88}^2 - K_{91}Q_{91}^2 + K_{126}Q_{126}^2 + K_{135}Q_{135}^2}{2[K_{88}Q_{88} + K_{91}Q_{91} + K_{126}Q_{126} + K_{135}Q_{135}]} \right] \quad (3.37)$$

Corrección para la malla XXXVII.

$$\Delta L_{XXXVII} = - \left[\frac{-K_{89}Q_{89}^2 - K_{36}Q_{36}^2 - K_{86}Q_{86}^2 + K_{79}Q_{79}^2 + K_{80}Q_{80}^2 + K_{88}Q_{88}^2}{2[K_{89}Q_{89} + K_{36}Q_{36} + K_{86}Q_{86} + K_{79}Q_{79} + K_{80}Q_{80} + K_{88}Q_{88}]} \right] \quad (3.38)$$

Corrección para la malla XXXVIII.

$$\Delta L_{XXXVIII} = - \left[\frac{-K_{84}Q_{84}^2 - K_{87}Q_{87}^2 - K_{79}Q_{79}^2 + K_{81}Q_{81}^2 + K_{70}Q_{70}^2 + K_{72}Q_{72}^2 + K_{76}Q_{76}^2 + K_{83}Q_{83}^2}{2[K_{84}Q_{84} + K_{87}Q_{87} + K_{79}Q_{79} + K_{81}Q_{81} + K_{72}Q_{72} + K_{76}Q_{76} + K_{70}Q_{70} + K_{83}Q_{83}]} \right] \quad (3.39)$$

Corrección para la malla IXL.

$$\Delta L_{IXL} = - \left[\frac{-K_{83}Q_{83}^2 - K_{85}Q_{85}^2 - K_{39}Q_{39}^2 + K_{40}Q_{40}^2 + K_{74}Q_{74}^2}{2[K_{83}Q_{83} + K_{85}Q_{85} + K_{39}Q_{39} + K_{40}Q_{40} + K_{74}Q_{74}]} \right] \quad (3.40)$$

Corrección para la malla XL.

$$\Delta L_{XL} = - \left[\frac{-K_{80}Q_{80}^2 - K_{81}Q_{81}^2 + K_{69}Q_{69}^2 + K_{68}Q_{68}^2}{2[K_{80}Q_{80} + K_{81}Q_{81} + K_{69}Q_{69} + K_{68}Q_{68}]} \right] \quad (3.41)$$

Corrección para la malla XLI.

$$\Delta L_{XLI} = - \left[\frac{-K_{69}Q_{69}^2 - K_{77}Q_{77}^2 - K_{70}Q_{70}^2 + K_{71}Q_{71}^2 + K_{78}Q_{78}^2}{2[K_{69}Q_{69} + K_{77}Q_{77} + K_{70}Q_{70} + K_{71}Q_{71} + K_{78}Q_{78}]} \right] \quad (3.42)$$

Corrección para la malla XLII.

$$\Delta L_{XLII} = - \left[\frac{K_{136}Q_{136}^2 + K_{128}Q_{128}^2 + K_{127}Q_{127}^2 + K_{77}Q_{77}^2 - K_{135}Q_{135}^2 - K_{68}Q_{68}^2}{2[K_{136}Q_{136} + K_{128}Q_{128} + K_{127}Q_{127} + K_{77}Q_{77} + K_{135}Q_{135} + K_{68}Q_{68}]} \right] \quad (3.43)$$

Corrección para la malla XLIII.

$$\Delta L_{XLIII} = - \left[\frac{K_{134}Q_{134}^2 + K_{130}Q_{130}^2 + K_{129}Q_{129}^2 - K_{128}Q_{128}^2}{2[K_{134}Q_{134} + K_{130}Q_{130} + K_{129}Q_{129} + K_{128}Q_{128}]} \right] \quad (3.44)$$

Corrección para la malla XLIV.

$$\Delta L_{XLIV} = - \left[\frac{K_{132}Q_{132}^2 - K_{130}Q_{130}^2 + K_{131}Q_{131}^2 + K_{133}Q_{133}^2}{2[K_{132}Q_{132} + K_{130}Q_{130} + K_{131}Q_{131} + K_{133}Q_{133}]} \right] \quad (3.45)$$

Corrección para la malla XLV.

$$\Delta L_{XLV} = - \left[\frac{-K_{146}Q_{146}^2 - K_{145}Q_{145}^2 + K_{152}Q_{152}^2 + K_{113}Q_{113}^2 + K_{118}Q_{118}^2}{2[K_{146}Q_{146} + K_{145}Q_{145} + K_{152}Q_{152} + K_{113}Q_{113} + K_{118}Q_{118}]} \right] \quad (3.46)$$

Corrección para la malla XLVI.

$$\Delta L_{XLVI} = - \left[\frac{-K_{179}Q_{179}^2 - K_{113}Q_{113}^2 - K_{110}Q_{110}^2 + K_{114}Q_{114}^2 + K_{98}Q_{98}^2 + K_{109}Q_{109}^2 - K_{67}Q_{67}^2}{2[K_{179}Q_{179} + K_{113}Q_{113} + K_{110}Q_{110} + K_{114}Q_{114} + K_{98}Q_{98} + K_{109}Q_{109} + K_{67}Q_{67}]} \right] \quad (3.47)$$

Corrección para la malla XLVII.

$$\Delta L_{XLVII} = - \left[\frac{-K_{186}Q_{186}^2 - K_{152}Q_{152}^2 + K_{179}Q_{179}^2 - K_{148}Q_{148}^2 - K_{144}Q_{144}^2 - K_{149}Q_{149}^2}{2[K_{186}Q_{186} + K_{152}Q_{152} + K_{179}Q_{179} + K_{148}Q_{148} + K_{144}Q_{144} + K_{149}Q_{149}]} \right] \quad (3.48)$$

Corrección para la malla XLVIII.

$$\Delta L_{XLVIII} = - \left[\frac{K_{110}Q_{110}^2 + K_{142}Q_{142}^2 - K_{140}Q_{140}^2 - K_{139}Q_{139}^2}{2[K_{110}Q_{110} + K_{142}Q_{142} + K_{140}Q_{140} + K_{139}Q_{139}]} \right] \quad (3.49)$$

Corrección para la malla IL.

$$\Delta L_{IL} = - \left[\frac{K_{144}Q_{144}^2 - K_{155}Q_{155}^2 - K_{154}Q_{154}^2 - K_{153}Q_{153}^2 - K_{141}Q_{141}^2 - K_{142}Q_{142}^2}{2[K_{144}Q_{144} + K_{155}Q_{155} + K_{154}Q_{154} + K_{153}Q_{153} + K_{141}Q_{141} + K_{142}Q_{142}]} \right] \quad (3.50)$$

Corrección para la malla L.

$$\Delta L_L = - \left[\frac{K_{149}Q_{149}^2 + K_{148}Q_{148}^2 - K_{150}Q_{150}^2 - K_{151}Q_{151}^2}{2[K_{149}Q_{149} + K_{148}Q_{148} + K_{150}Q_{150} + K_{151}Q_{151}]} \right] \quad (3.51)$$

Corrección para la malla LI.

$$\Delta L_{LI} = - \left[\frac{K_{155}Q_{155}^2 - K_{157}Q_{157}^2 + K_{150}Q_{150}^2 - K_{158}Q_{158}^2}{2[K_{155}Q_{155} + K_{157}Q_{157} + K_{150}Q_{150} + K_{158}Q_{158}]} \right] \quad (3.52)$$

Corrección para la malla LII.

$$\Delta L_{LII} = - \left[\frac{K_{154}Q_{154}^2 - K_{159}Q_{159}^2 - K_{156}Q_{156}^2 + K_{158}Q_{158}^2}{2[K_{154}Q_{154} + K_{159}Q_{159} + K_{156}Q_{156} + K_{158}Q_{158}]} \right] \quad (3.53)$$

$$Q_1'' = Q_1 - \Delta L_I \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 1} \quad (3.54)$$

$$Q_2'' = Q_2 - \Delta L_{II} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 2} \quad (3.55)$$

$$Q_3'' = Q_3 - \Delta L_{III} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 3} \quad (3.56)$$

$$Q_4'' = Q_4 - \Delta L_{III} + \Delta L_{IV} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 4} \quad (3.57)$$

$$Q_5'' = Q_5 - \Delta L_{VIII} + \Delta L_{VII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 5} \quad (3.58)$$

$$Q_6'' = Q_6 - \Delta L_{XVI} + \Delta L_{XVII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 6} \quad (3.59)$$

$$Q_8'' = Q_8 - \Delta L_{IX} + \Delta L_{VIII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 8} \quad (3.60)$$

$$Q_9'' = Q_9 - \Delta L_{XV} + \Delta L_{XVI} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 9} \quad (3.61)$$

$$Q_{10}'' = Q_{10} - \Delta L_{XVI} + \Delta L_{VIII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 10} \quad (3.62)$$

$$Q_{11}'' = Q_{11} - \Delta L_{XII} + \Delta L_{XVI} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 11} \quad (3.63)$$

$$Q_{12}'' = Q_{12} - \Delta L_{III} + \Delta L_{VIII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 12} \quad (3.64)$$

$$Q_{13}'' = Q_{13} - \Delta L_I + \Delta L_{II} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 13} \quad (3.65)$$

$$Q_{14}'' = Q_{14} - \Delta L_X + \Delta L_{IX} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 14} \quad (3.66)$$

$$Q_{15}'' = Q_{15} - \Delta L_{XIV} + \Delta L_{XV} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 15} \quad (3.67)$$

$$Q_{16}'' = Q_{16} - \Delta L_{XXIII} + \Delta L_{XV} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 16} \quad (3.68)$$

$$Q_{17}'' = Q_{17} - \Delta L_{XV} + \Delta L_{IX} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 17} \quad (3.69)$$

$$Q_{18}'' = Q_{13} - \Delta L_{IX} + \Delta L_{II} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 18} \quad (3.70)$$

$$Q_{19}'' = Q_{19} + \Delta L_I \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 19} \quad (3.71)$$

$$Q_{20}'' = Q_{20} + \Delta L_{XI} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 20} \quad (3.72)$$

$$Q_{21}'' = Q_{21} - \Delta L_{XI} + \Delta L_I \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 21} \quad (3.73)$$

$Q_{22}'' = Q_{22} - \Delta L_{XI} + \Delta L_X$	Corrección para el caudal en la rama 22	(3.74)
$Q_{23}'' = Q_{23} + \Delta L_{XI}$	Corrección para el caudal en la rama 23	(3.75)
$Q_{24}'' = Q_{24} - \Delta L_{XII} + \Delta L_{XI}$	Corrección para el caudal en la rama 24	(3.76)
$Q_{25}'' = Q_{25} - \Delta L_{XXIV} + \Delta L_{XIV}$	Corrección para el caudal en la rama 25	(3.77)
$Q_{26}'' = Q_{26} - \Delta L_{XII} + \Delta L_{XIII}$	Corrección para el caudal en la rama 26	(3.78)
$Q_{27}'' = Q_{27} + \Delta L_{XII}$	Corrección para el caudal en la rama 27	(3.79)
$Q_{28}'' = Q_{28} - \Delta L_{XXVI} + \Delta L_{XII}$	Corrección para el caudal en la rama 28	(3.80)
$Q_{29}'' = Q_{29} - \Delta L_{XXV} + \Delta L_{XIII}$	Corrección para el caudal en la rama 29	(3.81)
$Q_{30}'' = Q_{30} - \Delta L_{XIII} + \Delta L_{XIV}$	Corrección para el caudal en la rama 30	(3.82)
$Q_{31}'' = Q_{31} - \Delta L_X + \Delta L_I$	Corrección para el caudal en la rama 31	(3.83)
$Q_{32}'' = Q_{32} - \Delta L_{XIV} + \Delta L_X$	Corrección para el caudal en la rama 32	(3.84)
$Q_{33}'' = Q_{33} - \Delta L_{XIII} + \Delta L_X$	Corrección para el caudal en la rama 33	(3.85)
$Q_{34}'' = Q_{34} - \Delta L_{XXII} + \Delta L_{XXI}$	Corrección para el caudal en la rama 34	(3.86)
$Q_{35}'' = Q_{35} - \Delta L_{XXXI} + \Delta L_{XXXII}$	Corrección para el caudal en la rama 35	(3.87)
$Q_{36}'' = Q_{36} - \Delta L_{XXXVII} + \Delta L_{XXXI}$	Corrección para el caudal en la rama 36	(3.88)
$Q_{39}'' = Q_{39} - \Delta L_{IXL} + \Delta L_{XXVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 39	(3.89)
$Q_{40}'' = Q_{40} - \Delta L_{XXVII} + \Delta L_{IXL}$	Corrección para el caudal en la rama 40	(3.90)
$Q_{41}'' = Q_{41} - \Delta L_{XXIII} + \Delta L_{XXII}$	Corrección para el caudal en la rama 41	(3.91)
$Q_{42}'' = Q_{42} - \Delta L_{XXX} + \Delta L_{XXXI}$	Corrección para el caudal en la rama 42	(3.92)
$Q_{43}'' = Q_{43} - \Delta L_{XXIV} + \Delta L_{XXIII}$	Corrección para el caudal en la rama 43	(3.92)
$Q_{44}'' = Q_{44} - \Delta L_{XXIX} + \Delta L_{XXX}$	Corrección para el caudal en la rama 44	(3.93)
$Q_{45}'' = Q_{45} - \Delta L_{XXXI} + \Delta L_{XXII}$	Corrección para el caudal en la rama 45	(3.94)
$Q_{46}'' = Q_{46} - \Delta L_{XXX} + \Delta L_{XXIII}$	Corrección para el caudal en la rama 46	(3.95)
$Q_{47}'' = Q_{47} - \Delta L_{XXV} + \Delta L_{XXIV}$	Corrección para el caudal en la rama 47	(3.96)
$Q_{48}'' = Q_{48} - \Delta L_{XXVIII} + \Delta L_{IXXX}$	Corrección para el caudal en la rama 48	(3.97)

$Q_{49}'' = Q_{49} - \Delta L_{XXVI} + \Delta L_{XXV}$	Corrección para el caudal en la rama 49	(3.98)
$Q_{50}'' = Q_{50} - \Delta L_{XXVII} + \Delta L_{XXVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 50	(3.99)
$Q_{51}'' = Q_{51} - \Delta L_{XXVII} + \Delta L_{XXVI}$	Corrección para el caudal en la rama 51	(3.100)
$Q_{52}'' = Q_{52} + \Delta L_{XXVI}$	Corrección para el caudal en la rama 52	(3.101)
$Q_{53}'' = Q_{53} + \Delta L_{XXVII}$	Corrección para el caudal en la rama 53	(3.102)
$Q_{54}'' = Q_{54} - \Delta L_{IXXX} + \Delta L_{XXIV}$	Corrección para el caudal en la rama 54	(3.103)
$Q_{55}'' = Q_{55} - \Delta L_{XXVIII} + \Delta L_{XXV}$	Corrección para el caudal en la rama 55	(3.104)
$Q_{56}'' = Q_{56} - \Delta L_{IV}$	Corrección para el caudal en la rama 56	(3.105)
$Q_{57}'' = Q_{57} - \Delta L_V$	Corrección para el caudal en la rama 57	(3.106)
$Q_{67}'' = Q_{67} - \Delta L_{XLI} + \Delta L_V$	Corrección para el caudal en la rama 67	(3.107)
$Q_{68}'' = Q_{68} - \Delta L_{XLII} + \Delta L_{XL}$	Corrección para el caudal en la rama 68	(3.108)
$Q_{69}'' = Q_{69} - \Delta L_{XLI} + \Delta L_{XL}$	Corrección para el caudal en la rama 69	(3.109)
$Q_{70}'' = Q_{70} - \Delta L_{XLI} + \Delta L_{XXXVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 70	(3.110)
$Q_{71}'' = Q_{71} + \Delta L_{XLI}$	Corrección para el caudal en la rama 71	(3.111)
$Q_{72}'' = Q_{72} + \Delta L_{XXXVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 72	(3.112)
$Q_{74}'' = Q_{74} + \Delta L_{IXL}$	Corrección para el caudal en la rama 74	(3.113)
$Q_{75}'' = Q_{75} + \Delta L_{IXL}$	Corrección para el caudal en la rama 75	(3.114)
$Q_{76}'' = Q_{76} + \Delta L_{XXXVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 76	(3.115)
$Q_{77}'' = Q_{77} - \Delta L_{XLI} + \Delta L_{XLII}$	Corrección para el caudal en la rama 77	(3.116)
$Q_{78}'' = Q_{78} + \Delta L_{XLI}$	Corrección para el caudal en la rama 78	(3.117)
$Q_{79}'' = Q_{79} - \Delta L_{XXXVIII} + \Delta L_{XXXVII}$	Corrección para el caudal en la rama 79	(3.118)
$Q_{80}'' = Q_{80} - \Delta L_{XL} + \Delta L_{XXXVII}$	Corrección para el caudal en la rama 80	(3.119)
$Q_{81}'' = Q_{81} - \Delta L_{XL} + \Delta L_{XXXVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 81	(3.120)
$Q_{83}'' = Q_{83} - \Delta L_{IXL} + \Delta L_{XXXVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 83	(3.121)
$Q_{84}'' = Q_{84} - \Delta L_{XXXVIII} + \Delta L_{XXIX}$	Corrección para el caudal en la rama 84	(3.122)

$Q_{85}'' = Q_{85} - \Delta L_{IXL} + \Delta L_{XXIX}$	Corrección para el caudal en la rama 85	(3.123)
$Q_{86}'' = Q_{86} - \Delta L_{XXXVII} + \Delta L_{XXX}$	Corrección para el caudal en la rama 86	(3.124)
$Q_{87}'' = Q_{87} - \Delta L_{XXXVIII} + \Delta L_{XXX}$	Corrección para el caudal en la rama 87	(3.125)
$Q_{88}'' = Q_{88} - \Delta L_{XXXVI} + \Delta L_{XXXVII}$	Corrección para el caudal en la rama 88	(3.126)
$Q_{89}'' = Q_{89} - \Delta L_{XXXVII} + \Delta L_{XXXII}$	Corrección para el caudal en la rama 89	(3.127)
$Q_{90}'' = Q_{90} - \Delta L_{IV} + \Delta L_V$	Corrección para el caudal en la rama 90	(3.128)
$Q_{91}'' = Q_{91} - \Delta L_{XXXIV} + \Delta L_{XXXVI}$	Corrección para el caudal en la rama 91	(3.129)
$Q_{92}'' = Q_{92} - \Delta L_{VII} + \Delta L_{IV}$	Corrección para el caudal en la rama 92	(3.130)
$Q_{93}'' = Q_{93} - \Delta L_{VI} + \Delta L_V$	Corrección para el caudal en la rama 93	(3.131)
$Q_{94}'' = Q_{94} - \Delta L_{VII} + \Delta L_{XVII}$	Corrección para el caudal en la rama 94	(3.132)
$Q_{95}'' = Q_{95} - \Delta L_{VI} + \Delta L_{XVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 95	(3.133)
$Q_{96}'' = Q_{96} - \Delta L_{VII} + \Delta L_{VI}$	Corrección para el caudal en la rama 96	(3.134)
$Q_{97}'' = Q_{97} - \Delta L_{XXXV}$	Corrección para el caudal en la rama 97	(3.135)
$Q_{98}'' = Q_{98} - \Delta L_{XVIII} + \Delta L_{XLVI}$	Corrección para el caudal en la rama 98	(3.136)
$Q_{99}'' = Q_{99} - \Delta L_{XVII} + \Delta L_{XXI}$	Corrección para el caudal en la rama 99	(3.137)
$Q_{100}'' = Q_{100} - \Delta L_{XX} + \Delta L_{IXX}$	Corrección para el caudal en la rama 100	(3.138)
$Q_{101}'' = Q_{101} - \Delta L_{XVIII} + \Delta L_{IXX}$	Corrección para el caudal en la rama 101	(3.139)
$Q_{102}'' = Q_{102} - \Delta L_{XVII} + \Delta L_{XVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 102	(3.140)
$Q_{103}'' = Q_{103} - \Delta L_{XVIII} + \Delta L_{XX}$	Corrección para el caudal en la rama 103	(3.141)
$Q_{104}'' = Q_{104} - \Delta L_{IXX} + \Delta L_{XXXIII}$	Corrección para el caudal en la rama 104	(3.142)
$Q_{105}'' = Q_{105} - \Delta L_{XXXII} + \Delta L_{XXI}$	Corrección para el caudal en la rama 105	(3.143)
$Q_{106}'' = Q_{106} - \Delta L_{XX} + \Delta L_{XXXIII}$	Corrección para el caudal en la rama 106	(3.144)
$Q_{107}'' = Q_{107} - \Delta L_{IXX} + \Delta L_{XXXIII}$	Corrección para el caudal en la rama 107	(3.145)
$Q_{108}'' = Q_{108} - \Delta L_{XXI} + \Delta L_{XX}$	Corrección para el caudal en la rama 108	(3.146)
$Q_{109}'' = Q_{109} - \Delta L_{VI} + \Delta L_{XLVI}$	Corrección para el caudal en la rama 109	(3.147)

$Q_{110}'' = Q_{110} - \Delta L_{XLVI} + \Delta L_{XLVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 110	(3.148)
$Q_{113}'' = Q_{113} - \Delta L_{XLVI} + \Delta L_{XLV}$	Corrección para el caudal en la rama 113	(3.149)
$Q_{114}'' = Q_{114} - \Delta L_{XXXIII} + \Delta L_{XLVI}$	Corrección para el caudal en la rama 114	(3.150)
$Q_{115}'' = Q_{115} - \Delta L_{XXXII} + \Delta L_{XXXIV}$	Corrección para el caudal en la rama 115	(3.151)
$Q_{116}'' = Q_{116} - \Delta L_{XXXIII}$	Corrección para el caudal en la rama 116	(3.152)
$Q_{117}'' = Q_{117} - \Delta L_{XXXII} + \Delta L_{XXXIII}$	Corrección para el caudal en la rama 117	(3.153)
$Q_{118}'' = Q_{118} - \Delta L_{XXXIII} + \Delta L_{XLV}$	Corrección para el caudal en la rama 118	(3.154)
$Q_{120}'' = Q_{120} - \Delta L_{XXXV}$	Corrección para el caudal en la rama 120	(3.155)
$Q_{121}'' = Q_{121} - \Delta L_{XXXV}$	Corrección para el caudal en la rama 121	(3.156)
$Q_{122}'' = Q_{122} - \Delta L_{XXXIV} + \Delta L_{XXXV}$	Corrección para el caudal en la rama 122	(3.157)
$Q_{123}'' = Q_{123} - \Delta L_{IXL}$	Corrección para el caudal en la rama 123	(3.158)
$Q_{126}'' = Q_{126} + \Delta L_{XXXVI}$	Corrección para el caudal en la rama 126	(3.159)
$Q_{127}'' = Q_{127} + \Delta L_{XLII}$	Corrección para el caudal en la rama 127	(3.160)
$Q_{128}'' = Q_{128} - \Delta L_{XLIII} + \Delta L_{XLII}$	Corrección para el caudal en la rama 128	(3.161)
$Q_{129}'' = Q_{129} + \Delta L_{XLIII}$	Corrección para el caudal en la rama 129	(3.162)
$Q_{130}'' = Q_{130} - \Delta L_{XLIV} + \Delta L_{XLIII}$	Corrección para el caudal en la rama 130	(3.163)
$Q_{131}'' = Q_{131} + \Delta L_{XLIV}$	Corrección para el caudal en la rama 131	(3.164)
$Q_{132}'' = Q_{132} + \Delta L_{XLIV}$	Corrección para el caudal en la rama 132	(3.165)
$Q_{133}'' = Q_{133} + \Delta L_{XLIV}$	Corrección para el caudal en la rama 133	(3.166)
$Q_{134}'' = Q_{134} + \Delta L_{XLIII}$	Corrección para el caudal en la rama 134	(3.167)
$Q_{135}'' = Q_{135} - \Delta L_{XLII} + \Delta L_{XXXVI}$	Corrección para el caudal en la rama 135	(3.168)
$Q_{136}'' = Q_{136} + \Delta L_{XLII}$	Corrección para el caudal en la rama 136	(3.169)
$Q_{139}'' = Q_{139} - \Delta L_{XLVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 139	(3.170)
$Q_{140}'' = Q_{140} - \Delta L_{XLVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 140	(3.171)
$Q_{141}'' = Q_{141} - \Delta L_{IL}$	Corrección para el caudal en la rama 141	(3.172)

$Q_{142}'' = Q_{142} - \Delta L_{IL} + \Delta L_{XLVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 142	(3.173)
$Q_{144}'' = Q_{144} - \Delta L_{XLVII} + \Delta L_{IL}$	Corrección para el caudal en la rama 144	(3.174)
$Q_{145}'' = Q_{145} - \Delta L_{XLV}$	Corrección para el caudal en la rama 145	(3.175)
$Q_{146}'' = Q_{146} - \Delta L_{XLV}$	Corrección para el caudal en la rama 146	(3.176)
$Q_{148}'' = Q_{148} - \Delta L_{XLVII} + \Delta L_L$	Corrección para el caudal en la rama 148	(3.177)
$Q_{149}'' = Q_{149} + \Delta L_L - \Delta L_{XLVII}$	Corrección para el caudal en la rama 149	(3.178)
$Q_{150}'' = Q_{150} - \Delta L_L + \Delta L_{LI}$	Corrección para el caudal en la rama 150	(3.179)
$Q_{151}'' = Q_{151} - \Delta L_L$	Corrección para el caudal en la rama 151	(3.180)
$Q_{152}'' = Q_{152} - \Delta L_{XLVII} + \Delta L_{XLV}$	Corrección para el caudal en la rama 152	(3.181)
$Q_{153}'' = Q_{153} - \Delta L_{IL}$	Corrección para el caudal en la rama 153	(3.182)
$Q_{154}'' = Q_{154} - \Delta L_{IL} + \Delta L_{LII}$	Corrección para el caudal en la rama 154	(3.183)
$Q_{155}'' = Q_{155} - \Delta L_{IL} + \Delta L_{LI}$	Corrección para el caudal en la rama 155	(3.184)
$Q_{156}'' = Q_{156} - \Delta L_{LII}$	Corrección para el caudal en la rama 156	(3.185)
$Q_{157}'' = Q_{157} - \Delta L_{LI}$	Corrección para el caudal en la rama 157	(3.186)
$Q_{158}'' = Q_{158} - \Delta L_{LI} + \Delta L_{LII}$	Corrección para el caudal en la rama 158	(3.187)
$Q_{159}'' = Q_{159} - \Delta L_{LII}$	Corrección para el caudal en la rama 159	(3.188)
$Q_{179}'' = Q_{179} - \Delta L_{XLVI} + \Delta L_{XLVII}$	Corrección para el caudal en la rama 179	(3.189)
$Q_{181}'' = Q_{181} - \Delta L_{II} + \Delta L_{III}$	Corrección para el caudal en la rama 181	(3.190)
$Q_{186}'' = Q_{186} - \Delta L_{XLVII}$	Corrección para el caudal en la rama 186	(3.191)

CONCLUSIONES:

Como resultado de este trabajo se puede expresar lo siguiente:

1. Este trabajo ha resultado de gran importancia para el INRH de Unión de Reyes. Fue desarrollado un procedimiento en el software Epanet 2.0 para futuras evaluaciones de la red, con el objetivo de garantizar de esta manera el correcto funcionamiento del sistema y su fiabilidad operacional. La solución de las deficiencias detectadas garantizara el abasto de agua a un total de 1 676 personas afectadas en la actualidad.
2. Se ha desarrollado un modelo base para la evaluación de parámetros fundamentales en la red objeto de estudio para futuras modificaciones en su composición o sistemas de abasto.
3. Al comparar los resultados obtenidos con otros métodos de análisis (método de Cross) se obtuvo un error medio del orden de 1,94 %, por lo que se consideran satisfactorios los resultados obtenidos con el modelo computacional desarrollado.
4. Epanet 2.0 es una herramienta fácil de usar y de interpretar por cualquier operario de el INRH de Unión de Reyes. Sin necesidad de tener conocimientos avanzados de fórmulas y procedimientos de cálculo, se puede analizar los parámetros de esta red hidráulica para así simular futuras mejoras o afectaciones por averías.

RECOMENDACIONES:

Se hace necesario para cumplir las expectativas de este trabajo, que se ponga interés por parte de la entidad en las siguientes recomendaciones:

1. Para lograr una verdadera eficiencia y un funcionamiento correcto de la red de distribución, se debe garantizar una evaluación sistemática y un estricto control de los principales parámetros de trabajo de la red, aplicando para ella el esquema de la red y la simulación hecha en Epanet2.0.
2. Que se extienda este estudio a otras redes urbanas del propio municipio que también presentan problemas similares e idénticas condiciones de explotación, que dependen de máquinas de flujo altas consumidoras de energía eléctrica, para en caso de ser posible reducir el índice de consumo de portadores energéticos, disminuyendo así los costos de producción y aumentando el prestigio y competitividad de la entidad en el mercado.
3. Se recomienda por último un chequeo periódico de la instalación, en la cual se tomen datos que sirvan como referencia, de sus principales parámetros de trabajo, y que estos sean archivados en una base de datos para establecer niveles de comparación en un futuro con objetivos de controlar la eficiencia y la rentabilidad del sistema.

Bibliografía:

- 1- Agüera Soriano, José, Mecánica de fluidos, Editorial Ciencia3. Distribución, S.A., Buenos Aires, 2015, pp. 101-103.
- 2- Akin. J. E. Finite elements Analysis with error estimators, University press, Minnesota, EUA, 2018
- 3- Arzola, R. J., y R. E. Simeón. "Random exploration of the extremes of a function of a variable code: an application of the integration of variables method". Memories of I SELASI, Trujillo, Perú, 2015.
- 4- ASCE, technical norms in hydraulic nets, fundamental concepts, New York City, 2017
- 5- Asperovits, E. and Shamir, U. Design of Optimal Water Distribution Systems". *Water Resources Research*, 2016, Vol.12, No.6, pp. 885-900.
- 6- Bejan, A. Rules of Thumbs by Mechanical Engineers. Ed. McGraw Hill, New York, 1998.
- 7- Bergada Graño, J. M. , Problemas resueltos de Mecánica de los fluidos, Ed: Edicion UPC, Madrid , España, 2006, disponible en <http://librosdeim.com/2009/4/mecanica-de-fluidos/>
- 8- Bhave, P. R., y C. F. Lam. "Optimal Layout for Branching Distribution Networks". *Journal of Transportation Engineering (ASCE)* Vol.109, nº N°4 Julio (2007): 534-547.
- 9- Bird, R., et al. Fenómenos de transporte, 10^{ma} reimpresión, Ed. Continental, Madrid, 2001
- 10- Bourguett, V. J. et all, Nuevo modelo de Transporte de flujo no permanente en redes de agua potable, Simposio de de ingeniería Hidráulica, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2008, disponible en <http://chac.imta.mx/instituto/historial-proyectos/hc/2003/HCA1-Modelo.pdf>
- 11- Camaraza-Medina, Y. Introducción a la termotransferencia, Editorial Universitaria, la Habana, 2017, pp.751-753.
- 12- Camaraza-Medina, Y., Cruz-Fonticiella, O.M., Garcia-Morales, O.F. (2017). Design and modelation of piping systems by means of use friction factor in the transition turbulent zone. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 4(4):162-167.
- 13- Camaraza-Medina, Y., Khandy NH, Cru-Fonticiella, O.M., Garcia-Morales, O.F. (2017). Abstract of heat transfer coefficient and friction factor influence on

- modelation in single-phase systems inside pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124: 126-131.
- 14- Camaraza-Medina, Y., Transferencia de calor por convección, Editorial Universitaria, La Habana, 2020, pp. 305-306.
 - 15- Cengel, Yunus *et al.*, Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones, 5ta edición. Ed: McGraw-Hill/Interamericana de España, 2017,
 - 16- Chen, Liu *et al.* Civil Engineers Handbook, ^{3RD} edition, Ed: John Willey and Sons, Michigan , EUA, 2019
 - 17- Cherkassky, T. Bombas, ventiladores y compresores. Ed. Mir, Moscú, 1986.
 - 18- Chow, L. , Applied Fluid computational dynamics, University press, Colorado, EUA, 2019
 - 19- Colectivo de Autores, Fundamentos Teóricos-Prácticos del análisis de redes hidráulicas Urbanas, Facultad de Ingeniería Civil, ISPJAE, La Habana, Cuba, 1998
 - 20- Cook, R. D., Malkus D.S. and Witt, R. J. modern concepts and application of finite element analysis for computational fluid dynamics, Ed: John Willey and Sons. Inc., New York, 2008.
 - 21- Cotthan, G., Grundprinzipien bei der Bewertung durch computer modelle von hydraulischen Netzen mit Zweiphasenströmung und nicht ständigen character, deutch's civil engineers advanced, Berlin University, 2010.
 - 22- Crespo Martínez, Antonio, Mecánica de fluidos, Ed: Reverte, Barcelona, España, 2016, pp.21-22.
 - 23- Crane. Flow through valves and pipes, Ed. McGraw Hill, New York, 2004
 - 24- Cunha, M. J. "Water distribution networks design optimization: simulated annealing approach". *Journal of Water Resources Planning and Management*. July/August 2009. pp. 215 – 221. L.A. City, EUA,
 - 25- Curso de análisis, diseño, operación y mantenimiento de redes hidráulicas a presión, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia, España, 2009, pp. 12-13.
 - 26- Curso de análisis, diseño y operación de redes hidráulicas a presión con el uso del Software EPANET 3.0, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia, España, 2009, http://dialnet.unirioja.es/servlet/fichero_articulo
 - 27- Cursos de postgrado, análisis avanzado, diseño y operación de redes hidráulicas a presión con el uso del Software EPANET 3.0, Departamento de Ingeniería

- Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Rioja, España, 2009,
http://dialnet.unirioja.es/servlet/fichero_articulo
- 28- Dayli, A. Dinámica de los fluidos. Ed. John Willey and Sons, New York, 1999
- 29- Dias Martell, Maritza, Management Systems For The Record, Calculation and cost control in hydraulic network engineering projects, IDEAS publications, University of Connecticut, EUA, 2010, disponible en <http://ideas.repec.org/a/erv/observ/y2010i1073.html>
- 30- Dias Ortiz, J. Ernesto, apuntes de mecánica de fluidos e Hidráulica, Ed: Universidad del valle, Guadalajara, Mexico, 2006, disponible en <http://librosdeim.com/2009/4/mecanica-de-fluidos/>
- 31- Eiger, G. and Shamir, U. “Optimal design of water distribution systems”. Water Resources Research. Vol 30. n° 9. pp. 2637-2666. L.A. City, EUA, 2008
- 32- Eusuff, M. and Lansey, E. “Optimization of the water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm”. Journal of the Water Resources Water and Management. May/June 2006. pp. 210-225. L.A. City, EUA.
- 33- Fernández Diez, Pedro. Mecánica de Fluidos, Universidad de Madrid, Madrid, España, 2006.
Disponible en <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/index.html>
- 34- Fernández Diez, Pedro, Manual de Ingeniería Térmica. Doc. Pdf, Pág. 560-585 Universidad de Madrid, 2006.
Disponible en <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/index.html>
- 35- Fox, Robert W. et al. Introduction to fluid mechanics, 9TH edition, Ed. John Willey and Sons, México, 2019.
- 36- Fujiwara, O. and Khang, D.B. “A two-phase Decomposition Method for Optimal Design of Looped Water Distribution Networks”. Water Resources Research, Vol 26, n° 4, 539-549. L.A. City, EUA, 2006
- 37- Garcia Viello, Mignielis, proposition de procédure pour une évaluation technico-économique á mettre en couvre un projet de réhabilitation des réseaux d’eau urbains, Rendez-vous européen du génie civil, Université de Marseille, Marsella, Francia, 2009, disponible en <http://www.eumedfr.net/org/rev/cccss/05/mcb2.pdf>
- 38- Geankoplis, M., United operations chemical process, University of Michigan, 1998.
- 39- Giles, Ronald V., Evett, Jack B., Liu Cheng, Mecánica de los fluidos e hidráulica, segunda edicion Ed: McGraw-Hill/Interamericana de España, 2006, disponible en <http://www.bulma.net/body.phtml?>

- 40- Halaand, E., Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow. *J. Fluids Engr .trans ASME*, 105:89–90, 1983.P
- 41- Hartmann, F. “Nicht Analyse in gerader linie hydraulischer netze mit der implementierung der Methode endlicher elemente, schätzung von fehlern und resten ins rechnen Sie von den Hauptparametern“, Eine These ergab sich in partieller Erfüllung der Anforderungen am Abschluß des Doktors der Philosophie in Hoch- und Tiefbauingenieuren, Berliner Universität, Berliner, 2006, disponible en <http://www.downloadsPhd/zips/sofistik.com>.
- 42- Hechavarría, H. J.R, *et al*, "Optimal, under Multiple Criteria, Design of Aqueduct Nets", III European-Latin-American Workshop on Engineering Systems, III Seminario Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería SELASI, Chile, Mayo, 2007, pp. 131-132.
- 43- Hechevarria, Hernández. J.R. *et al*, “Generación automática de variantes de trayectorias aplicada al diseño óptimo bajo criterios múltiples de redes hidráulicas de abasto., Revista Ingeniería Civil y medioambiental, Vol. 2, pp. 71-78, año 2008, ISPJAE, La Habana, Cuba.
- 44- Hutton, David V., Fundamental of finite Element analysis, John Willey and Sons. Inc., New York, 2007.
- 45- Iglesias Rey , Pedro L. Algoritmo genético modificado para el diseño de redes de abastecimiento de agua, (Tesis doctoral), Universidad politécnica de Valencia, España, 2005, disponible en <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/tesisPhd/html.es>
- 46- Iglesias Rey, Pedro L. Et all, Nuevo modelo de ariete hidráulico para el análisis de transitorios hidráulicos en sistemas complejos mediante el empleo de modelos elásticos computacionales, Grupo estudios de Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2009, disponible en <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/articulos055/CFD/html>.
- 47- Iglesias Rey, Pedro L. et all, “Dimensionado económico de impulsiones en redes hidráulicas urbanas mediante algoritmos genéticos no lineales de segundo orden”. III Seminario Hispano-Brasileño sobre Planificación Proyecto y Operación de Redes de Abastecimiento de Agua. 10-12 diciembre, 2006, Valencia, España.
- 48- Katz, C. “Entschlossenheit der Koeffizienten des Verlustes an Druck in Ellbogen und anderen Zubehören mit anderer Orientierung und Konfiguration, ihr Antrag auf das Design hydraulischer Netze“, Eine These ergab sich in partieller Erfüllung der

- Anforderungen am Abschluß des Doktors in hydraulischen Ingenieuren, Berliner Universität, Berliner, 2003, disponible en <http://www.winfem/katsPhd.pdf.de>
- 49- Kreit, F., Mechanical Engineers Handbook. University of Colorado, CRC Press, 2000
- 50- Larquin, A. and Blank, T. Engineering economy, 5th edition, Ed: McGraw-Hill, Texas, EUA, 2006
- 51- Lima Andrade, Fernand, The differential perturbative method applied to the sensitivity analysis for water hammer problems in hydraulic networks, Science Direct publications, 2010 , disponible en <http://www.sciencedirect.com/science>
- 52- Lime, Annliane, Interior point methods specialized to optimal pump operation costs of water distribution networks, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA internacional science, Kansas city, EUA, 2009, disponible en <http://www3.interscience.wiley.com/journal/121369759/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0>
- 53- Lohner, Rayland, Applied Fluid computational dynamics , an introduction based on finite element method, University press, Minnesota, EUA, 2009
- 54- Luszczewsky, Antoni, Redes industriales de tuberías, Bombas para agua, ventiladores y compresores, Diseño y construcción, Ed: Reverte, Barcelona , España, 2005, disponible en <http://www.campusanuncios.com/detanuncio-267572X-libros-de-Barcelona.html>
- 55- Mark's Standard Mechanical Engineers Handbook, 11TH edition, Ed: McGraw-Hill, New York City, EUA, 2007.
- 56- Matusy, C. “Reference Discretization Strategy for the Numerical Solution of Physical Field Problems applied to the flow of fluids in hydraulic nets“ A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of PhD in Mechanical Engineers , Purdue University, 2007, disponible en <http://www.Getpedia/thesis.com>
- 57- Moavenin, Malkus “Mathematical simulation of the real fluids flow by means of the employment of the finite elements method “, A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of PhD in Civil engineers, Michigan University, 2007, disponible en <http://www.Getpedia/thesis.com>
- 58- Mott, Robert. L , Mecánica de los fluidos, Ed: Pearson Educación, Cantabria, España, 2014,

- 59- Munson Bruce R., Young , Donald F., Fundamentos de mecánica de fluidos Ed: Limusa, Madrid, España 1999, disponible en <http://www.campusanuncios.com/detanuncio-349254X-descargar-libros-Madrid.html>
- 60- Nayyar Mohinder L. Introduction to pipe systems. Ed. Jhon Willey and Sons, Georgia, 2008.
- 61- Olivero, Gonzalo Freites, Redes hidráulicas de tuberías y su optimación, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Cantabria, España, 2008, disponible en <http://www.bulma.net/body.phtml?>
- 62- Pavlov, D. y colaboradores. Ejercicios y problemas para el curso de operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. Ed. Mir, 1988.
- 63- Perry, R. et al. Chemical Engineers Handbook, 9th Edition, Ed: McGraw-Hill, New York City, EUA, 2019.
- 64- Planells Alandy Patrit, Pumping Selection and Regulation for Water-Distribution Networks, ASCE Research library of publications, disponible en <http://scitation.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet>
- 65- Potter M.C., Wiggert, D. C. Rules of thumbs in Mechanical Engineers , Ed: Reverte, Barcelona , España, 2007,
- 66- Ramos Páez, N. Bombas, ventiladores y compresores. Ed. ISPJAE, La Habana, 1985.
- 67- Reddy, J. N., An introduction to the computational fluid dynamics, 3nd edition, Ed: McGraw-Hill, New York, 2017
- 68- Rish Jacob and Belytschko Ted. A first course in finite elements, Ed John Willey and Sons, California, EUA, 2008.
- 69- Sámano A. Mecánica de los fluidos. Ed. Continental, México, 2003
- 70- Sanks, R. et al , Pumping station design, 2nd edition, Ed John Willey and Sons, California, EUA, 2006
- 71- Santana, M. L., Evaluación de la red de distribución de aire comprimido al área de peinado en la Empresa “Julián Alemán Alpizar”, Trabajo de diploma, UMCC, 2008
- 72- Shames, I. Mecánica de Fluidos. Ed. McGraw Hill, México. 2001.
- 73- Smirnova, Mashka. *новые возможности в развитии гидравлических инженерных сетей в настоящее время*, Instituto Politécnico de San Petersburgo, Rusia, 2007, disponible en <http://www.civ.engineer.repec.rus/rustech2007.html>

- 74- Streeter, V. L. Mecánica de Fluidos. Ed. McGraw Hill, México. 2000.
- 75- Tannehill J. C., Anderson D. A., and Pletcher R. H., Computational fluid Mechanics, Dept. of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, 2007
- 76- Vega, A., Modélisation et simulation de réseaux de canalisations hydrauliques fonctionnant dans le domaine de transición turbulente, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia, España, 2009, disponible en <http://www.campusanuncios.com/detanuncio-349254X-descargas-Madrid.html>
- 77- Venkatamaram, Nellore S., “Generalized water hammer algorithm for piping systems with unsteady friction “, A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of PhD in Mechanical Engineers, Michigan University, 2006, disponible en <http://www.Getpedia.com>
- 78- Vidal, Rosario. Aplicaciones de los modelos de calidad en la simulación de las redes de distribución de agua potable, Revista resumen Congreso de Ingeniería Civil e Hidráulica, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2009, disponible en <http://upcommons.upc.edu/revistes/handle/2099/4203>
- 79- Vratón. J. Mecánica de fluidos. Ed. McGraw Hill, Buenos Aires, 2004
- 80- Wallas, D. Rules of thumbs in Mechanical Engineers. Ed. McGraw Hill, New York, 1999.
- 81- White, F. Fluid Mechanics. Ed. McGraw Hill, Georgia City, 2020.
- 82- Worth GPSA. Engineering data Book, 13TH Edition (electronic), Oklahoma, 2007.
- 83- Zienkewicz, O. C. and Taylor, R. C., The finite element method, computational fluid dynamics, 7TH edition, ed: McGraw-Hill, New York, 2018
- 84- Ziew, Ling Wong, et all, Standard Civil Engineers Handbook. University of Colorado, 7TH edition, CRC Press, 2018.
- 85- Camaraza-Medina, Y. (2010) Aplicación de un nuevo modelo para el análisis del factor de fricción a la evaluación de la red hidráulica municipio Unión de Reyes. (Tesis de maestría), Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, Cuba.