

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



PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE SISTEMAS DE  
TUBERÍAS Y SU APLICACIÓN AL ANÁLISIS DE LA RED HIDRÁULICA DEL  
MUNICIPIO UNIÓN DE REYES.

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

ARNOLDO LORES MARRERO

**Matanzas, 2020**

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



PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE SISTEMAS DE TUBERÍAS Y SU APLICACIÓN AL ANÁLISIS DE LA RED HIDRÁULICA DEL MUNICIPIO UNIÓN DE REYES.

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

Autor: ARNOLDO LORES MARRERO

Tutor: Dr.C. Yanán Camaraza Medina

**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.

---

Arnoldo Lores Marrero

## Nota de aceptación del tribunal

---

---

---

---

---

---

**PRESIDENTE** \_\_\_\_\_

**MIEMBRO** \_\_\_\_\_

**MIEMBRO** \_\_\_\_\_

**MIEMBRO** \_\_\_\_\_

**MIEMBRO** \_\_\_\_\_

**MIEMBRO** \_\_\_\_\_

## **Resumen**

En esta tesis, realizada en el INRH del municipio Unión de Reyes, se aplica un nuevo modelo adimensional, válido en la zona de transición para la determinación del factor de fricción en el interior de tuberías, efectuándose de esta forma una evaluación de los parámetros de trabajo fundamentales de la red de distribución hidráulica del poblado cabecera municipal. Dicha red presenta en los momentos actuales deficiencias en el suministro de agua, ya que la carga de la columna líquida recae sobre el bombeo directo, pues no existen depósitos elevados, afectándose de esta forma un total de 1 676 personas, debiéndose en ocasiones operar válvulas para lograr que el abasto de líquido llegue a estos, a pesar que el caudal entregado por el sistema es superior a las necesidades de consumo, lo que obliga, al no obtenerse los parámetros de presión requeridos, a poner en funcionamiento un grupo de bombas de elevado consumo (103,5 kW), y de capacidad superior a la requerida, trabajando por esta razón fuera de su zona de trabajo. Fue realizado un análisis de la red, con vistas a detectar los problemas fundamentales que invalidan su correcto funcionamiento, incluyendo un levantamiento del estado técnico actual. Para la evaluación del sistema de tuberías se utilizó el método Cross, determinándose que se requiere de un bombeo intermedio para la solución de esta problemática. Fue recuperado el antiguo bombeo intermedio, para ello se adquirió en el mercado varios componentes, con un costo total de la inversión igual a 967,3 CUC. El análisis económico de la propuesta de inversión arroja como resultados que el ahorro de energía eléctrica anual es de 630,3MWh lo que reduce el importe de la factura eléctrica en 7 563,6 CUP y que el tiempo de recuperación de la inversión es de 7 meses y 13 días, además el valor del VAN en un horizonte de dos años será igual a 24 226,7 CUP, con un TIR del orden del 585%.

## Summary

In this thesis, carried out in the INRH of the municipality Union de Reyes, a new adimensional model is applied, valid in the transition area for the determination of the friction factor inside pipes, being made this way an evaluation of the fundamental work parameters of the distribution hydraulic net of the town municipal head. This net presents in this moments current deficiencies in the supply of water, since the load of the liquid column relapses about the direct pumping, because high deposits don't exist, being affected this way a total of 1 676 people, being due in occasions to operate valves to achieve that the supply of liquid arrives to these, to weigh that the flow surrendered by the system is superior to the consumption necessities, what forces, when not being obtained the required parameters of pressure, to put into operation a group of pumps of high consumption (103,5 kW), and of superior capacity to the one required. An complete analysis of the net was made, with a view to detecting the fundamental problems that invalidate its correct operation, including a rising of the current technical state of the net. For the evaluation of the nets system, the Cross method was used, being determined that it is required of an intermediate pumping for the solution of this problem. The old pumping intermission was recovered, for it was acquired it in the market several component, with a total cost of the investment similar to 967,2 CUC

The economic analysis of the investment proposal throws as results that the saving of annual electric power is of 630,3 MWh what reduces the amount of the electric invoice in 7 563,6 CUP and that the time of recovery of the investment is of 7 months and 13 days, also the value of the NPV in a two year-old horizon will be similar to \$ 24 226,7 and the IRR it will be of the order of 585%.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPÍTULO 1 ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO</b>	5
1.1 Generalidades	5
1.2 Regímenes de corriente de líquidos y gases en los tubos	5
1.3 Ecuaciones fundamentales para flujo incompresible	7
1.4 Análisis dimensional del problema de fricción para flujo incompresible	9
1.4.1 Determinación del factor de fricción para el cálculo de pérdidas de presión por el interior de tubos rectos	11
1.5 Problemas sobre líneas de tuberías. Tubos múltiples	24
1.5.1 Solución de problemas sobre tubos múltiples mediante el Método de Cross	27
1.6 Principales resultados de investigaciones y aportes más recientes a la solución de problemas de flujo en tuberías en redes hidráulicas en Cuba	32
1.7 Procedimientos computacionales para la solución de problemas de flujo en tuberías	33
<b>CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS</b>	34
2.1 Generalidades	34
2.1.1 Breve descripción de la red de distribución hidráulica Unión de Reyes.	34
2.2 Pérdidas menores producidas por accesorios	36
2.2.1 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por la entrada de una tubería introducida en un depósito.	38
2.2.2 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por la entrada con un ángulo $\alpha$	38
2.2.3 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por la entrada de un depósito a una tubería con borde cónico	39
2.2.4 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por la salida, unión o descarga de un depósito a una tubería con bordes curvados	39
2.2.5 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por el paso de un fluido por un codo poligonal	40
2.2.6 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por el paso de un fluido a través de un codo de $90^\circ$	40
2.2.7 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por el paso de un fluido por un codo en cualquier ángulo	41
2.2.8 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por el paso de un fluido a través de un conducto convergente	42

2.2.9	Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por el paso de un fluido a través de un conducto divergente . . . . .	42
2.2.10	Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por el paso de un fluido a través de una válvula . . . . .	43
2.2.11	Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por el paso de un fluido a través de una ramificación . . . . .	44
2.3	Elementos a tener en cuenta para la correcta selección de una bomba . . . . .	44
2.3.1	Características fundamentales del trabajo de sistemas de bombas en serie y en paralelo . . . . .	45
2.4	Proceso de obtención del nuevo modelo adimensional para la determinación del factor de fricción en la zona de transición. . . . .	46
2.5	Método de investigación a aplicar en el análisis de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes . . . . .	48
<b>CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS . . . . .</b>		<b>50</b>
3.1	Antecedentes. . . . .	50
3.2	Red de distribución . . . . .	50
3.3	Análisis hidráulico de la conductora de suministro Piloto . . . . .	51
3.4	Análisis hidráulico de la conductora de suministro Fumerito . . . . .	54
3.5	Análisis del caudal por ramas y mallas por el método de Cross . . . . .	56
3.5.1	Balance de carga mediante la aplicación del método de Cross.. . . . .	58
3.5.2	Análisis de los resultados obtenidos con el uso del método de Cross . . . . .	62
3.5.3	Selección del bombeo intermedio . . . . .	62
3.6	Propuestas para incrementar la eficiencia y fiabilidad de la red . . . . .	63
3.7	Análisis de la inversión . . . . .	64
3.7.1	Cálculo y análisis de los ahorros logrados. . . . .	67
3.7.2	Movimiento de fondos. . . . .	68
3.8	Diferentes criterios de selección para alternativas de inversión. . . . .	69
3.8.1	Período de recuperación de la inversión. . . . .	69
3.8.2	Valor actual neto . . . . .	70
3.8.3	Tasa interna de retorno . . . . .	71
<b>CONCLUSIONES . . . . .</b>		<b>72</b>
<b>RECOMENDACIONES . . . . .</b>		<b>73</b>

..

## **INTRODUCCIÓN**

EL agua es un elemento de la naturaleza, integrante de los ecosistemas naturales, fundamental para el sostenimiento y la reproducción de la vida en el planeta ya que constituye un factor indispensable para el desarrollo de los procesos biológicos que la hacen posible. De ella depende la supervivencia de casi todos los seres vivos que habitamos este planeta ya sea para cocinar, beber, lavarse o regar los cultivos. Nada de lo que se conoce podría existir sin este recurso natural. El agua es un recurso limitado que debe recogerse y distribuirse cada vez más cuidadosamente. La fuente de agua más importante es la lluvia, la cual puede ser almacenada directamente en cisternas y embalses, o indirectamente, a través de pozos o de la cuenca de captación, nombre que recibe la red de arroyos, riachuelos y ríos de una zona. El agua de la capa freática es agua de lluvia que se ha filtrado a través de capas de roca y se ha acumulado a lo largo de los años y en los casos en que esta se encuentre bajo presión, puede brotar a la superficie en forma de manantiales. Los canales de riego, pantanos, pozos y depósitos son dispositivos artificiales, creados para garantizar el abasto de agua que proviene de dichas fuentes naturales. Debido a la posibilidad de contaminación, el agua se suele procesar en una planta de tratamiento antes de su distribución.

Los primeros asentamientos de nuestros antepasados siempre tenían lugar en ubicaciones donde hubiese agua dulce disponible, como lagos y ríos. Y fue entorno al agua donde se originaron las primeras formas de sociedad, tal y como la concebimos hoy. Cuando estas formas primitivas de sociedad empezaron a evolucionar y crecer de manera extensiva surgió la necesidad de buscar otras fuentes diferentes de agua. El constante incremento de la población humana no siempre hizo posible que estas sociedades crecieran cercanas a fuentes de fácil acceso como lagos y ríos, por lo que las personas se vieron obligadas a desarrollar sistemas que le permitiera aprovechar los recursos de aguas subterráneas. Los primeros antecedentes los encontramos en Israel hace aproximadamente 7 000 años, donde el agua era almacenada en los pozos para su posterior utilización. Como el agua era necesaria trasladarla de los pozos a otros puntos, se empezaron a desarrollar los sistemas de transporte y distribución del agua. Comenzó con canales sencillos, escavados en la arena o las rocas. Años más tardes se utilizaron

tubos huecos, más parecidos a lo que son nuestras tuberías de hoy. La verdadera revolución llegó con los acueductos romanos, ya que por primera vez se podía transportar agua a través de redes de distribución a distintos puntos de su amplio imperio.

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.

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 sí y el caudal consumido es suministrado mediante bombas, las cuales generalmente emplean como fuente energética la electricidad.

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.

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.

Es por eso que 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.

Es por esta razón, que se hace necesaria la tarea de una correcta evaluación de la red de distribución hidráulica del municipio Unión de Reyes, la cual en estos momentos le suministra sus servicios a un total de 8 791 habitantes<sup>1</sup>, 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 l diarios<sup>2</sup>.

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 valvuleo, para que el servicio pueda beneficiar a los clientes mas 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 un total de 460 habitantes entrevistados, los cuales refieren que existía un bombeo intermedio en la estación de acueducto y alcantarillado, y que desde la fecha de su rotura y salida de servicio es cuando se ha agudizado la situación de abasto de agua

A partir de lo planteado anteriormente para la correcta realización de este trabajo se enfrenta el siguiente problema.

**Problema:**

El suministro de agua en acueducto Unión de Reyes es mediante bombeo directo, pero las condiciones de actuales generan una operación fuera de su zona de trabajo óptimo, siendo requerido un bombeo intermedio que sea capaz de entregar la carga requerida para un correcto funcionamiento de la red de distribución.

---

<sup>1</sup> Según datos de la oficina municipal de estadística, Marzo del 2019

<sup>2</sup> Según recomendaciones de la ASCE

Para dar solución al problema antes planteado se formula la siguiente hipótesis.

**Hipótesis:**

A partir de los métodos existentes de diseño y comprobación de redes hidráulicas (Cross) se puede establecer un balance de la red hidráulica del poblado Unión de Reyes, para determinar de esta forma la carga necesaria para la correcta selección del equipo de flujo requerido.

Para dar cumplimiento a la hipótesis del trabajo se ha trazado el siguiente **objetivo:**

Seleccionar un equipo de flujo para el bombeo intermedio del caudal de agua a suministrar a la red hidráulica del poblado Unión de Reyes, que posibilite su correcto funcionamiento.

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

- 1- Obtener los principales parámetros y coeficientes de la red de distribución hidráulica, que permita establecer la correcta selección de la bomba requerida para incrementar el nivel de carga necesario para el correcto funcionamiento de la red hidráulica.
- 2- Obtener mediciones del consumo de la nueva bomba, así como el nivel de satisfacción de la población, para demostrar así que la selección del equipo de flujo fue adecuada, permitiendo el correcto funcionamiento de la red hidráulica, y la obtención del ahorro de energía previsto por los tiempos de paradas de las bombas de abasto, de mayor capacidad y consumo de energía eléctrica.
- 3- Realizar el cálculo económico, demostrando así la posibilidad de un ahorro considerable.
- 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.

## **CAPÍTULO 1 ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO**

### **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 incomprensible, el análisis dimensional del problema de fricción para flujo incomprensible, pérdidas menores en líneas de tuberías, 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. 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 [1, 7, 15, 20, 23], 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 [4, 16, 25, 28, 34, 35, 49], 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  $\nu$ , e inversamente proporcional al diámetro del tubo ( $d$ ), o sea:

$$V_{CR} = k \frac{\nu}{d} \quad (\text{m/s}) \quad (1.1)$$

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:

$$\text{Re}_{CR} = \frac{V_{CR} \cdot d}{\nu} \quad (1.3)$$

Como muestran los experimentos, el número crítico de Reynolds es aproximadamente 2300. Sin embargo, se puede hablar no solamente del número crítico  $\text{Re}_{CR}$ , 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  $\text{Re} < \text{Re}_{CR}$  la corriente siempre debe ser laminar mientras que si  $\text{Re} \geq \text{Re}_{CR}$ , la corriente siempre debe ser turbulenta.

### 1.3 Ecuaciones fundamentales para flujo incompresible.

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 [42, 43, 47, 48, 58, 59, 60, 72, 74], se expresa de la siguiente forma:

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

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  $m/s$ .

$\rho_1$  es la densidad a la entrada del conducto, en  $kg/m^3$ .

$\rho_2$  es la densidad a la salida del conducto, en  $kg/m^3$ .

$\alpha_1$  y  $\alpha_2$  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  $9,809 m/s^2$ .

$d$  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 [33, 65, 69, 72, 74], se pueden omitir los términos de  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  por varias razones:

1. La mayor parte de los problemas de ingeniería acerca de flujo en tubos implica un flujo turbulento en el cual  $\alpha$  es apenas ligeramente mayor que la unidad.
2. En el flujo laminar, en el que  $\alpha$  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  $\alpha$  tiene poco efecto en el resultado final. El efecto de  $\alpha$  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  $\alpha$ , se puede recurrir a los valores recomendados en las referencias [30, 34, 35, 63, 65].

Una ecuación empírica para la obtención de este coeficiente para régimen turbulento fue descrita en las referencias [11, 13, 14], la cual queda de la siguiente forma:

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

La cual es válida en el siguiente intervalo de valores:

$$4000 \leq \text{Re} \leq 5 \times 10^7$$

En la ecuación (1.4.a) para valores de  $\text{Re} > 5 \times 10^7$ , el valor del coeficiente  $\alpha$  va a ser igual a la unidad

Los experimentos iniciales, cerca de 1 850, según lo descrito en [9, 54, 61], 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:

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

En la ecuación (1.5)

$\Delta p$  es la caída de presión en el tramo del 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 [1, 6, 10, 12, 14, 56, 57, 78], 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  $\tau_0$  puede ser expresado como:

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

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, 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 [33, 59, 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 [1, 4, 7, 8, 12].

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  $f = \frac{64}{Re}$  para el caso de que el conducto sea circular<sup>1</sup> 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  $f$  vs.  $Re$  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 las pruebas sobre tubos hidráulicamente lisos, los resultados de las pruebas de Nikuradse confirman el criterio elaborado anteriormente 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

---

<sup>1</sup> Para otros tipos de secciones transversales véase por ejemplo [33] Pág. 218

demostrado que esta curva para  $(3 \cdot 10^3 < Re < 10^5)$  se puede representar muy aproximadamente por una línea cuya ecuación es:

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

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:

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

Esta ecuación es válida para el siguiente rango de valores:

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

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] y [80], aceptados por [1, 28, 30, 31, 41], que al criterio de este autor son los de mayor confiabilidad, y estos estarán 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 por métodos tradicionales, debido a que esta es implícita y depende de un aparato matemático más complejo para su solución (método de aproximaciones sucesivas).

Esta ecuación fue graficada por Moody en forma de un diagrama de Stanton, conocido actualmente como diagrama de Moody, el cual se puede encontrar en las siguientes referencias [1, 5, 24, 29, 31, 38, 39, 45, 54, 64, 69, 71, 72, 74, 76, 77, 79, 81, 82], en las cuales es recomendado para dar solución a los problemas prácticos de flujo de fluido.

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

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 según los autores [1, 5, 24, 29, 31, 38, 39, 45, 54, 64, 69, 71, 72, 74, 76, 77, 79, 81, 82], 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 1.2 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
$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left[ -1,8 \text{Log} \left( \left( \frac{e/d}{3.7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right) \right]^{-2}$	Halaland [40] (1.9.c)	$5000 \leq Re \leq 10^8$ $0,01 \leq e/d \leq 10^{-6}$	1,44

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. El proceso de obtención de esta expresión será discutido en el epígrafe 2.4 del capítulo dos, pues será esta la expresión 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.

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 habrían entonces más de una línea de energía para el tubo corriente arriba y corriente abajo, siendo esto una imposibilidad obvia.

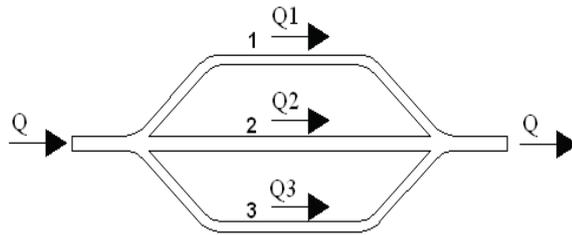


Figura 1.1 Esquema representativo de una tubería ramificada en paralelo

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:

$$Q = V \cdot A$$

Donde

A es el área de la sección transversal de la tubería, en  $m^2$  determinada en conductos de sección circular como:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Sustituyendo en la ecuación (1.5) y arreglando convenientemente se obtiene:

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

Esta relación se puede generalizar escribiéndola de la siguiente forma

$$\Delta p = K \cdot Q^2 \quad (1.11-a)$$

Donde

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

En la expresión (1.11-b) las pérdidas menores ocasionadas por accesorios generalmente son tratadas como longitudes equivalentes de tuberías<sup>2</sup>, por tanto la expresión (1.11-b) se transformará entonces, siguiendo este criterio, en:

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

En esta expresión

$L_{Tub}$  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:

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

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

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 será prácticamente imposible.

El espacio disponible en este informe no permite aquí una discusión exhaustiva de este tema, pero si la exposición de un método que a la opinión del autor es uno de los más

---

<sup>2</sup> La relación existente entre las longitudes equivalente y los coeficientes de pérdidas menores es dada en el epígrafe 2.2 ecuación (2.4)

difundidos y empleados a nivel mundial, atribuido a Hardy Cross, siendo recomendado por los autores [1, 4, 5, 8, 10, 14, 16, 19, 36, 37, 41, 42, 43, 48], siendo este a su vez el de mayor uso en Cuba en el diseño y evaluación de redes de distribución hidráulicas.

### **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.

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 1 hasta el 7, 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.

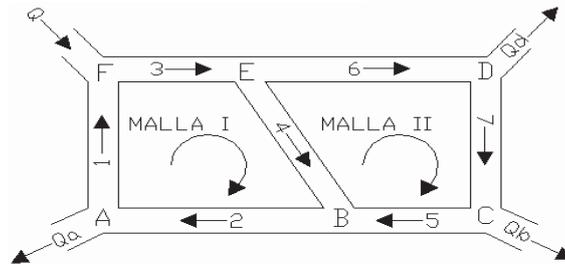


Figura 1.2 Representación esquemática de una red de distribución hidráulica

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.

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

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

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

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

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

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: que en él se satisfacen automática 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  $\Delta_L$ , 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  $m^3/s$

$\Delta_L$  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  $\Delta_L$ . Para mantener la continuidad se aplica a cada tubo de la malla la corrección  $\Delta_L$ , 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  $\Delta_L$ , 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 en sentido dextrógiro (hacia la derecha) entonces  $\Delta_L$  es (+).
- 2- Cuando el momento producido por el sentido asumido para el desplazamiento del fluido es en sentido levógiro (hacia la izquierda) entonces  $\Delta_L$  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:

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

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

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

Expandiendo la expresión (1.16) por el teorema del binomio y despreciando los términos que contienen productos de la corrección  $\Delta_L$ , 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:

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

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  $\Delta_L$  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).

En recientes investigaciones [5, 8, 10, 24, 36, 37, 42, 46, 51, 52, 84], se ha demostrado la posibilidad de una convergencia acelerada de los valores de caudales asumidos inicialmente, incluyéndose además en el proceso iterativo la influencia de las caídas de presiones. Este método permite además considerar esta última variable como incógnita en el proceso de iteración, lo que reduce la complejidad del análisis, desafortunadamente este método es válido solamente para redes cerradas, y en las cuales no existan bombeos integrados en el cuerpo de la red.

En la práctica en ocasiones se encuentran casos en que dentro de la red se encuentran instaladas bombas, en ese caso el proceso sufre una modificación, ya que se requiere de una expresión que represente la curva de la carga aportada por la bomba versus la curva de capacidad. Por tanto resulta conveniente en esta situación ajustar una curva polinómica a la curva experimental reportada por el fabricante, para obtener una expresión que sea capaz de dar una aproximación lo suficientemente buena para insertarla en el proceso iterativo a desarrollar, tanto en forma manual como utilizando métodos computacionales, sin que este pierda su nivel de precisión. En la literatura consultada [8, 10, 14, 16, 19, 35, 36, 55, 69, 72, 81, 84], se recomienda que se ajuste la expresión mostrada a continuación para obtener la curva característica de carga de la bomba vs flujo:

$$\Psi_p \approx \Psi_{p_0} \cdot (1 + a_1 \cdot Q + a_2 \cdot Q^2 + \dots + a_N \cdot Q^N) \quad (1.18)$$

En la expresión anterior  $\Psi_p$  es la carga aproximada de la bomba bajo las condiciones de operabilidad de la red, en m y  $\Psi_{p_0}$  es la carga nominal de la bomba en el punto de máxima eficiencia, (dado por el fabricante), en m.

Para garantizar el nivel de precisión en el análisis se tomarán cuantos coeficientes  $a$  sean necesarios, con lo cual se coincide ya que esto es una exigencia para ajustar por regresión modelos matemáticos con alta confiabilidad estadística.

## **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 Habana<sup>3</sup>, 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 10 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 periodo 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 3 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 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].

---

<sup>3</sup> Sánchez, López J. , Historia de las ciencias en Cuba, Ed: Científico Técnica, La Habana, 1998

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

En la actualidad con el desarrollo de la informática y el aumento de la potencia de los ordenadores, 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 de la mecánica de fluidos computacional, 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 [2, 3, 18, 21, 22, 24,25, 26, 27, 31, 41, 51, 73, 75, 84], se describen procedimientos computacionales para la solución de problemas de flujo en tuberías, a través del empleo de modelos de programación comerciales. 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, generalmente mediante el uso de técnicas lineales de interpolación.

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.

Para más detalles acerca del empleo de la mecánica de fluidos computacional, sus potencialidades, métodos de solución, así como sus limitantes, el autor les recomienda la consulta de las referencias [2, 3, 18, 21, 22, 41, 44, 48, 51, 53, 56, 60, 67, 68, 75, 83].

## **CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **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.

Estos elementos aportan pérdidas de carga, las cuales influyen directamente sobre el correcto funcionamiento de la red, las cuales en ocasiones son mal llamadas en la literatura como pérdidas menores [1, 6, 7, 15, 19, 20, 23, 28, 30, 33, 34, 35], ya que se presentan situaciones en la práctica en que los valores de pérdidas de presión por accesorios alcanzan mayor valor que las ocasionadas por el rozamiento en el interior de las líneas de tuberías. Las características de la red de tuberías estudiada son expuestas en el siguiente epígrafe.

#### **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 I y II y la otra desde la estación de bombeo de Fumerito.

La línea de tuberías de descarga del pozo Piloto I 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 II, 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 2 410 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 traviesa llega a la calle General Lacret, 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 aquí.

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 técnicas de las fuentes de abasto.

Aspectos fundamentales <sup>1</sup>	Piloto 1	Piloto 2	Fumerito	Bombeo intermedio
Cota geográficas <sup>2</sup>	327355 (N) <sup>3</sup> 444275 (E) <sup>4</sup>	327220 (N) 444240 (E)	327355 (N) 444245 (E)	326125 (N) 444125 (E)
Aforo medido (l/s)	22	21	24	-----
Nivel Dinámico (m)	34,18	32,73	40,15	-----
Profundidad (m)	54,09	46,8	45,46	-----
Nivel Estático (m)	28,58	28,17	37,15	-----
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	1750	3500	1750	1750
Voltaje Nominal (V)	220-440	220	220	220-440

Los valores reportados en la tabla 2.1 son los promedios de un total de 156 mediciones efectuadas en el año 2018 por los compañeros del INRH Unión de Reyes.

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Oficina Provincial de Geodesia y Cartografía, 2018.

<sup>3</sup> Coordenadas nacionales en dirección Norte.

<sup>4</sup> Coordenadas nacionales en dirección Este.

El termino aforo es el que se emplea para designar el caudal de agua proveniente de las corrientes subterráneas, que se incorpora al pozo, cuando sobre este actúa el efecto de trasiego de la bomba. Por nivel dinámico se entiende la altura media de la columna líquida en el pozo medido desde la superficie libre del líquido hasta el nivel del terreno cuando la bomba se encuentra en funcionamiento. El nivel estático es idéntico al dinámico, con la diferencia de que es el empleado cuando la bomba se encuentra detenida.

## 2.2 Pérdidas menores producidas por accesorios.

Las pérdidas locales tienen lugar en los cambios de sección y dirección de la corriente, en las contracciones, ensanchamientos bruscos, curvas, codos, bifurcaciones, o por accesorios instalados en ellas, como diafragmas, llaves, válvulas, etc. Todos ellos originan una perturbación de la corriente que provoca la aparición de remolinos, intensificándose de esta forma las pérdidas de carga, que en algunos casos pueden ser más importantes que las pérdidas continuas, sobre todo en conducciones relativamente cortas.

Se admite en la ingeniería práctica, sin que se cometa un error considerable, que si la conducción tiene una longitud superior a mil veces el diámetro, el error que se comete despreciando las pérdidas accidentales es menor que el que se cometería en el cálculo del factor de pérdidas por rozamiento para las pérdidas continuas.

Los valores de pérdidas menores se determinan, como se demostró anteriormente, y coincidiendo con el criterio de los autores [23, 38, 39, 49, 54, 55, 58, 59, 60], a partir del último término de la derecha en la ecuación (1.4), o sea, por la siguiente relación para el caso en que el conducto tenga el mismo diámetro. En el caso de que el conducto tenga varios diámetros se calcularán las pérdidas locales para cada una de los tramos de tuberías teniendo en consideración sus velocidades características, calculadas usando la ecuación de balance de energía mecánica (1.4) y se sumarán para establecer el valor de las pérdidas totales en el conducto:

$$\Delta p_m = \sum_{i=1}^{i=n} \xi_i \cdot \frac{V_i^2}{2g} \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.1)

$\Delta p_m$  es la caída de presión debido los accesorios integrantes de la red, en m

Los valores de los coeficientes de pérdidas por accesorios dados en la literatura fueron determinados en la zona de turbulencia total, o sea, para números de  $Re$  mayores que el segundo número de  $Re_{crit}$ . [23, 35, 55].

Actualmente existen un amplio grupo de expresiones para la determinación del valor del segundo número adimensional de Reynolds crítico, el cual posee una importancia vital en el análisis del flujo de fluidos por el interior de conductos cerrados, ya que para valores de  $Re$  superiores a él, en las mismas condiciones de trabajo, el valor numérico del factor de fricción dejará de depender del valor de este número adimensional. Aquí el autor hará uso de una expresión, la cual es la de mayor difusión y uso a nivel internacional atribuida a [72], la cual se representa de la siguiente forma:

$$Re_{CRIT2} = 550 \cdot \left(\frac{e}{d}\right)^{-1,125} \quad (2.2)$$

En el caso dado, en que el número adimensional de Reynolds del sistema sea inferior al  $Re_{CRIT2}$ , entonces se deben corregir los valores de  $\sum \xi$ , a partir de la siguiente relación según lo recomendado por los autores [19, 24, 66]

$$\sum \xi_{DEF} = \sum \xi \cdot \frac{f}{f_{TUR}} \quad (2.3)$$

En la expresión (2.3), los términos no conocidos son:

$\sum \xi_{DEF}$  es el valor de la sumatoria de los coeficientes de pérdidas por accesorios equivalente en la zona de transición, adim.

$f_{TUR}$  es el valor del factor de fricción determinado según el valor del segundo número crítico de  $Re$ , adim.

$f$  es el valor del factor de fricción determinado según el valor del  $Re$  determinado a la velocidad característica, la de la tubería de menor diámetro, adim.

Existe un criterio generalizado para la determinación de las pérdidas ocasionadas por accesorios, conocido en la práctica como longitud equivalente. Este coincide en determinar que longitud de tuberías, con iguales características constructivas que el accesorio, aportaría el mismo valor de caídas de presión que este último.

Existe una expresión matemática que permite relacionar según las referencias [1, 23, 61, 62, 63, 65, 69, 71, 72, 74, 79, 80, 81, 82], los coeficientes de pérdidas menores con la longitud equivalente, la cual se expresa de la siguiente forma para un accesorio  $n$  dado como:

$$L_{Ei} = \frac{\xi_n \cdot d}{f} \quad (2.4)$$

Para un tramo de diámetro constante del conducto las pérdidas locales se determinarían como:

$$L_E = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \xi \cdot d}{f} \quad (2.4.a)$$

En la ecuación (2.4)  $L_E$  es la longitud equivalente de tuberías, que ocasionaría la misma pérdida de presión que el conjunto de accesorios integrados al tramo analizado del conducto, en m

La ventaja de este método consiste en que una vez obtenidas las longitudes equivalentes, estas se suman al término longitud, presente en la ecuación de Darcy (1.5) determinándose de esta manera, de una forma muy sencilla, las pérdidas de carga en las líneas de tuberías. Sin embargo a pesar de las facilidades proporcionadas, se sacrifica la precisión de los resultados con la aplicación de este método, por lo que en ocasiones se suele acudir a nomogramas<sup>5</sup>, los cuales relacionan la longitud equivalente con distintos tipos de accesorios, sin tener en cuenta factores como el material del cual están elaborados o el tiempo de explotación, cosa que no ocurre con los coeficientes  $\xi$ , los cuales son determinados por el fabricante mediante cuidadosa experimentación.

Se reporta a continuación un pequeño resumen de los principales coeficientes promedios de pérdidas menores de los accesorios que más abundan en la práctica. Una información mucho más completa y extensa, se puede encontrar en las referencias [1, 6, 7, 15, 19, 20, 23, 28, 30, 33, 34, 35].

### **2.2.1 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por la entrada de una tubería introducida en un depósito.**

Para la determinación del coeficiente de pérdidas local  $\xi$  ocasionados por la entrada de un fluido a una tubería desde un depósito (ver figura 1.1 anexo 2), se puede recurrir a la tabla 1.1 del anexo 1, la cual fue obtenida por el autor a partir de los valores promedios reportados por los autores [1, 23, 61, 62, 63, 65, 69, 71, 72, 74, 80, 81].

### **2.2.2 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por la entrada con un ángulo $\alpha$ .**

Según lo reportado en las referencias [23, 38, 39, 49, 54, 55, 58, 59, 60, 79, 82], los valores del coeficiente de pérdidas ocasionados por un tubo que se alimente de un recipiente, sin estar introducido dentro de este último, se puede determinar a partir de la siguiente expresión aproximada:

$$\xi = 0.5 + 0.3 \cdot \text{sen} \alpha + 0.2 \cdot \text{sen}^2 \alpha \quad (2.5)$$

<sup>5</sup> Véase por ejemplo la referencia [24] Pág. 182

Donde  $\alpha$  es el ángulo que se forma desde la línea central de flujo hasta el final de vértice del cono (ver figura 1.2 anexo 2).

Para el caso de la entrada o la salida con bordes rectos de un fluido a un depósito de este al exterior, se recomienda por parte de los autores [1, 6, 7, 15, 19, 20, 23, 28, 30, 33, 34, 35], un valor de  $\xi = 1$ . Si existieran uniones roscadas, existe uniformidad de criterios en las referencias [15, 19, 38, 45, 61, 63, 65], en las cuales se le asigna a este tipo de accesorio un valor de  $\xi = 0,9$ .

### **2.2.3 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por la entrada de un depósito a una tubería con borde cónico.**

En la práctica se encuentran casos que coinciden con lo explicado en el epígrafe 2.2.2, lo que presentan la diferencia de que los bordes del tubo que contactan con el recipiente, no son agudos, sino que presentan una entrada cónica a modo de difusor, por tanto sus valores de los coeficientes de pérdidas van a diferir. A partir de lo consultado en los textos [1, 23, 61, 62, 63, 65, 69, 71, 72, 74, 80, 81], los valores promedios de  $\xi$  para este tipo de accesorios son reflejados en la tabla 1.2 del anexo 1. (ver figura 1.3 anexo 2)

Se debe resaltar que en tabla citada anteriormente, el caso 1 corresponde a una entrada a ras con la pared y el caso 2 a una entrada desde el exterior, o sea que el cono se encuentra introducido dentro del depósito. Esta tabla es válida solamente para un valor de  $\alpha = 60^{\circ}$ . Si ocurriera que  $\alpha \neq 60^{\circ}$ , entonces se multiplica el valor obtenido en la tabla por el correspondiente coseno del ángulo  $\alpha$ .

### **2.2.4 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por la salida, unión o descarga de un depósito a una tubería con bordes curvados.**

Si la salida, unión o descarga del depósito al tubo presentara bordes curvados, cosa que suele suceder con frecuencia, se pueden estimar los valores de  $\xi$  a partir de lo reflejado por los autores [15, 19, 23, 38, 45, 61, 63, 65], siendo expuestos sus valores promedios en la tabla 1.3 del anexo 1. La explicación para los casos 1 y 2 es idéntica a la tabla nombrada en el epígrafe 2.2.3. En la figura 1.4 del anexo 2 se muestra un esquema para la correcta utilización de esta tabla.

### **2.2.5 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por el paso de un fluido por un codo poligonal.**

Se conoce como codo poligonal (Ver figura 1.5 anexo 2) a los accesorios que permiten cambiar la dirección del fluido, estando integrados por dos o más elementos, en los cuales

sus líneas de corriente o ejes centrales se intersecan en un punto común, denominado vértice.

Según lo descrito en las referencias [23, 38, 39, 49, 54, 55, 58, 59], los coeficientes de pérdidas locales para codos poligonales pueden ser determinados a partir de los valores reportados en la tabla 1.4 del anexo 1.

### 2.2.6 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por el paso de un fluido a través de un codo de 90°.

Los codos de 90° (ver figura 1.6 anexo 2), cumplen la misma función que los de tipo poligonal, lo que con la diferencia que están constituidos por una línea de eje único, la cual sigue una trayectoria suave (radio o curvatura), lo que contribuye notablemente a la disminución de los valores del coeficiente de pérdidas, además no poseen vértice de corriente, aunque presentan como principal desventaja que solo permiten desviar la línea de corriente fluida en un único valor numérico de ángulo, en este caso igual a 90°.

En la literatura consultada existen multitud de criterios en cuanto a los valores numéricos de los coeficientes de pérdidas para este tipo de accesorio, pero en este trabajo se tomarán los datos en los trabajos [23, 61, 62, 63, 65, 69, 71, 72, 74, 80], los cuales a opinión de este autor, son los de mayor confiabilidad, siendo reflejados estos en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Coeficientes de pérdidas locales para un codo de 90°

$R/d$	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	2	3	4	5	6	7	8
$\xi$	1,5	1,2	1	0,25	0,2	0,17	0,15	0,12	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07

En la Tabla 2.2 el término  $R/d$  es la relación que existe entre el radio de curvatura y el diámetro interno del codo. En las referencias [19, 20, 23, 28, 30, 33, 34, 35], se plantea que los coeficientes de pérdidas locales para codos de 90° pueden ser determinados con bastante precisión a partir de las siguientes formulas experimentales atribuidas a [57]:

$$\xi = 0,051 + 0,19 \cdot (d/R), \text{ para el caso que } R/d \geq 1 \quad (2.6)$$

$$\xi = 0,95 \cdot \sqrt[3]{(d/R)}, \text{ para el caso que } R/d < 1 \quad (2.6.a)$$

Aquí:

$(d/R)$  es la relación que existe entre el diámetro interno del codo y el radio de curvatura del mismo, (adim). Un esquema para la correcta utilización de lo reflejado en la tabla 2.2 se muestra en la figura 1.6 del anexo 2

### 2.2.7 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por el paso de un fluido por un codo en cualquier ángulo.

La aplicación de codos en cualquier ángulo (ver figura 1.7 anexo 2) permite direccionar la corriente de fluido en cualquier ángulo mayor que cero y menor que 180°.

En la mayoría de los trabajos encontrados en la literatura moderna [1, 23, 61, 62, 63, 65, 69, 71, 72, 74, 80, 81], se muestra uniformidad en cuanto a los valores de los coeficientes de pérdidas, aquí el autor presentará un resumen de estos valores en la tabla 1.5 del anexo 1, en esta tabla se cumple que:

$$\xi = \varepsilon \cdot \xi_{codo 90^\circ} \quad (2.7)$$

En la ecuación (2.7) los términos no conocidos son:

$\varepsilon$  es un coeficiente que tiene en cuenta el aumento o disminución de capacidad portante de los codos en función de la disposición de la línea de corriente y del ángulo que forma esta última con respecto a la entrada del fluido, (adim).

$\xi_{codo 90^\circ}$  es el valor numérico del coeficiente de pérdidas que tendría un codo de 90° que tenga la misma relación  $R/d$  que el codo analizado, (adim), mientras el valor del coeficiente  $\varepsilon$  se obtiene de la tabla 1.5 del anexo 1.

Según lo reportado en las referencias [40, 65], el valor del coeficiente  $\varepsilon$  puede ser determinado con suficiente precisión a partir de las siguientes expresiones.

$$\text{Para } \alpha \leq 80^\circ, \text{ se cumple que } \varepsilon = (0,9 \cdot \text{sen } \alpha) \quad (2.8)$$

$$\text{Para } \alpha \geq 100^\circ, \text{ se cumple que } \varepsilon = 0,7 + \left( \frac{0,35 \cdot \text{sen } \alpha}{90} \right) \quad (2.8.a)$$

En las expresiones (2.8) y (2.8.a) el término  $\text{sen } \alpha$ , es el valor numérico del seno del ángulo del codo.

### 2.2.8 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por el paso de un fluido a través de un conducto convergente.

Se entiende por conducto convergente (Ver figura 1.7 anexo 2) al accesorio que surge a partir de la reducción de la sección transversal del conducto, donde esa disminución es de forma gradual, formando un cono hasta alcanzar el diámetro final del tubo o sistema al cual se pretende suministrar un fluido.

A partir de la búsqueda de información acerca de los coeficientes de pérdidas locales para este tipo de accesorio, el autor de este trabajo elaboró un resumen de sus valores fundamentales, siendo reflejados en la tabla 1.6 del anexo 1, según lo descrito por las

referencias [15, 19, 38, 45, 61, 63, 65]. En esta se cumple que  $d/D$  es la relación existente entre el diámetro menor y mayor del conducto, (adim) y  $\alpha$  es el ángulo de la generatriz del cono, en grados.

Un caso especial de este tipo de accesorios lo constituye las contracciones en la que el ángulo  $\alpha = 90^\circ$ , siendo conocidas en la literatura como contracciones bruscas y rectas. Según los autores [55, 58, 59, 60, 79, 82], para las contracciones bruscas se cumple la siguiente relación:

$$\xi = 0,45 \cdot \left[1 - (d/D)^2\right]^2 \quad (2.9)$$

### **2.2.9 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por el paso de un fluido a través de un conducto divergente.**

Un conducto divergente es todo lo contrario de un conducto convergente, pues en él, al moverse el fluido en dirección longitudinal aumenta la sección transversal del conducto, El diámetro interno del mismo aumenta hasta alcanzar su valor final, lo contrario que ocurre en los conductos convergentes, en forma de cono y gradualmente.

Los valores de los coeficientes de pérdidas locales para este tipo de accesorios según lo recomendado en los textos [1, 6, 7, 15, 19, 20, 23, 28, 30], se pueden determinar a partir de la siguiente relación:

$$\xi = \beta \cdot \left[1 - (d/D)^2\right]^2 \quad (2.10)$$

Donde:

$\beta$  es un término correctivo que va a depender del ángulo de divergencia del conducto, el cual será determinado a partir de la tabla 1.7 del anexo 1

### **2.2.10 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por el paso de un fluido a través de una válvula.**

Las válvulas son accesorios ampliamente empleados en las redes de tuberías, ya que permiten de una forma sencilla y barata regular el caudal a entregar en cualquier rama de la misma. Existe una amplia gama de válvulas, pero las más empleadas son las de compuerta y de globo. En la literatura existente [1, 23, 61, 62, 63, 65, 69, 71, 72, 74, 80, 81, 82], se da un tratamiento muy amplio a los coeficientes de pérdidas locales en válvulas, los cuales han sido resumidos y representados por el autor en las tablas 1.8 y 1.9 en el anexo 1, para el caso de las válvulas de compuerta y para las válvulas de globo respectivamente.

Para efectuar el uso de la tabla 1.9 del anexo 1, se debe restarle a la unidad, la magnitud  $x/d$  para obtener a que capacidad está abierta la válvula, siendo  $x$  la porción del tubo que se encuentra descubierto del cierre valvular.

En la tabla 1.9 del anexo 1 se cumple además que:

$$A_x = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (2.11)$$

Donde  $A_x$  es el área de la sección del flujo, en  $m^2$ .

En la figura 1.12 del anexo 2 se muestra un esquema de una válvula de compuerta, para facilitar la comprensión de las dimensiones utilizadas en la tabla 1.9. En la tabla 1.8 del anexo 1 se cumple que  $\alpha$  es el ángulo de apertura de la válvula con respecto a la línea de simetría de la tubería en la cual se encuentra instalada la válvula.

Un esquema para la correcta utilización de la tabla 1.8 del anexo 1 se muestra en la figura 1.13 del anexo 2. En las válvulas de no retorno (cheques) ya sean oscilante o de asiento, existen multitud de recomendaciones, pero a criterio de este autor, los valores más confiables son los determinados por la firma Crane [23] los cuales no son dados aquí.

### **2.2.11 Coeficiente de pérdidas locales ocasionadas por el paso de un fluido a través de una ramificación.**

En las redes hidráulicas resulta muy común el uso de las ramificaciones de flujo para direccionar el sentido de este en función de suministrar un fluido determinado a un consumidor.

Las ramificaciones son de dos tipos fundamentales:

- 1- Separación de ramas
- 2- Unión de ramas

La separación de ramas consiste en una ramificación en el que el fluido viene por una conductora principal, y al llegar a este accesorio se separa en dos o más líneas de fluido. Todo lo contrario sucede con las uniones de ramas, pues en estas lo que sucede es que dos o más líneas de corriente convergen en un punto común o nodo, para posteriormente continuar su movimiento por una conductora común.

En la actualidad existen disímiles criterios acerca de la determinación de los coeficientes de pérdidas locales para el caso de una ramificación. A partir de lo recomendado por los autores [19, 38, 39, 49, 54, 55, 58, 59, 60, 79, 82], con los cuales coinciden plenamente el criterio de este autor, los valores de dichas pérdidas han sido reflejados en las tablas 1.10; 1.11; 1.12 y 1.13 del anexo 1.

Un esquema para la correcta utilización de las tablas 1.10 y 1.11 del anexo 1 se muestra en la figura 1.14 del anexo 2. Un esquema para la correcta utilización de las tablas 1.12 y 1.13 se muestra en la figura 1.15 del anexo 2.

### **2.3 Elementos a tener en cuenta para la correcta selección de una bomba.**

Para realizar una correcta selección de una bomba centrífuga es necesario conocer de antemano los requerimientos de servicio (carga y capacidad) para condiciones normales de operación, las características del fluido a bombear, (temperatura, densidad, propiedades corrosivas y erosivas, toxicidad, etc.), así como las condiciones de la instalación (carga de succión), condiciones de operación (trabajo continuo, intermitente o esporádico, así como la posibilidades de actuar bajo sobrecarga (por encima de las condiciones normales de operación), etc. Basado en estos planteamientos se realiza la selección de la bomba, ocurriendo en muchas ocasiones, que más de un tipo de bomba puede satisfacer estas condiciones de servicio, es entonces que debe efectuarse un análisis de los restantes factores para tomar una decisión final.

La condiciones de explotación, por ejemplo pueden resultar un factor decisivo para la determinación del costo inicial de la bomba y su costo de explotación, es evidente que una bomba que posea un buen diseño y esté construida con gran precisión, debe poseer un costo inicial elevado, pero un alto rendimiento y seguridad en su trabajo por tanto será aconsejable su empleo para un uso continuo y seguro. Si por el contrario se necesita una bomba para uso esporádico, será más conveniente emplear al efecto una bomba cuyo costo inicial sea menor, aunque su explotación (por menor tiempo de uso) sea más costosa (menor rendimiento y mayor costo de mantenimiento).

Para más detalles acerca de la selección de bombas, así como los elementos a tener en cuenta en esta, el autor recomienda las referencias [4, 17, 24, 25, 54, 55, 60, 64, 66, 82].

#### **2.3.1 Características fundamentales del trabajo de sistemas de bombas en serie y en paralelo.**

Es conocido del curso de máquinas de flujo, que el parámetro limitativo en las máquinas centrífugas lo constituye la velocidad tangencial en el borde exterior del impelente ( $v_2$ ), que generalmente se conserva por debajo de los 300  $m/s$  para compresores centrífugos trabajando con aire, en el caso de las bombas estas velocidad se mantiene en valores más bajos ( $\leq 40 m/s$ ).

Es por esta sencilla razón que cuando se precisa más carga de la que un impelente puede proporcionar, se emplea la solución de colocar dos o más impelentes en serie. Esto

consiste en conectar la descarga de una máquina a la succión de la otra. Como resultado de esto se obtiene una característica resultante de las máquinas conectadas en serie., o sea dos máquinas de características A y B.

Para hallar la característica resultante de H contra Q, se considera que el flujo que pasa por la máquina A es igual al que pasa por B, o sea:

$$Q_A = Q_B = Q_{A+B} \quad (2.12)$$

Siendo:

$Q_A$  es el caudal evacuado por la máquina A, en  $m^3/s$

$Q_B$  es el caudal evacuado por la máquina B, en  $m^3/s$

La carga total que recibe el fluido será entonces igual a la sumatoria de las cargas que este recibe por su paso en la bomba **A** más la recibida en la bomba **B**, o sea:

$$H_A = H_B = H_{A+B} \quad (2.13)$$

Donde:

$H_A$  es la carga total recibida por el fluido en su paso por la bomba A, en  $m$

$H_B$  es la carga total recibida por el fluido en su paso por la bomba B, en  $m$

Las instalaciones de bombas en paralelo, son muy comunes en las industrias, ya que de por si mismas constituyen un método para operar con gastos variables. Las máquinas en paralelo se conectan a cabezales comunes en la succión y en la descarga.

Este tipo de conexión posee la ventaja de mantener bombas de reserva que se ponen en servicio cuando el sistema demanda un gasto superior al que pueden ofrecer los equipos que se encuentran en servicio.

La característica de carga resultante se obtiene sumando los gastos que es capaz de entregar cada bomba por separado, para un valor de carga dado, o sea:

$$Q_A + Q_B = Q_{A+B} \quad (2.14)$$

La potencia consumida en el proceso se obtiene sumando los valores de potencia consumida por cada bomba individualmente, esto se expresa a partir de la siguiente relación:

$$N_A + N_B = N_{A+B} \quad (2.14)$$

Siendo:

$N_A$  es la potencia consumida por la máquina A, en  $W$

$N_B$  es la potencia consumida por la máquina B, en  $W$

Para una revisión más exhaustiva del tema el autor recomienda las referencias [4, 17, 24, 25, 54, 55, 60, 64, 66, 82].

#### 2.4 Proceso de obtención del nuevo modelo adimensional para la determinación del factor de fricción en la zona de transición.

Una de las mayores dificultades que presenta en la actualidad la ingeniería dedicada a los problemas relacionados con el flujo de fluidos, consiste en la determinación del factor de fricción, existiendo al efecto, tal como se mencionó en el análisis bibliográfico innumerables trabajos al respecto, pero en todos se presenta la misma problemática, la cual consiste en el grado de precisión de las expresiones desarrolladas, ya que estas dependen en gran medida de la experimentación, y el posterior ajuste y validación de relaciones empíricas, con el consiguiente grado de imperfección. Todo esto se debe en lo fundamental a la naturaleza estocástica del flujo turbulento, el cual no permite la implementación de un análisis matemático riguroso de la corriente fluida.

La ecuación de mayor difusión a nivel internacional en la actualidad es la ecuación empírica de Colebrook, la cual tiene como inconveniente que para su utilización se requiere del empleo de las aproximaciones sucesivas, puesto que la función incógnita  $f$  se encuentra implícita en la fórmula. Existen otras expresiones cuyo uso es más sencillo pero la sencillez de su aplicación trae consigo la disminución en la precisión de los resultados obtenidos. En la universidad de Matanzas fue desarrollada una expresión para determinar el factor de fricción de Darcy, de tipo trascendente, que suple todas las limitantes planteadas con anterioridad. El nuevo modelo viene dado por la siguiente relación:

$$f = \left[ -2 \cdot \text{Log} \left( \frac{e/d}{0,2707} - \frac{A}{B} \right) \right]^{-2} \quad (2.15)$$

Donde:

$$A = 2,296 \cdot \text{Log} \left[ \frac{47,5}{\text{Re}^2} + \frac{3,27 \cdot (e/d)^{1,12}}{\text{Re}} + \frac{(e/d)^{2,25}}{18,26} \right] \quad (2.15-a)$$

$$B = \text{Re} \cdot \left[ \text{Log} \left( \text{Re}^{2,5} \cdot (e/d)^{1,12} \right) \right]^{0,01} \quad (2.15-b)$$

Para el caso de tuberías lisas ( $e/d = 0$ ), el factor de fricción de Darcy de la ecuación (2.15), se obtiene entonces por la siguiente expresión:

$$f = \left[ -2 \cdot \text{Log} (A_2/\text{Re}) \right]^{-2} \quad (2.16)$$

Donde:

$$A_2 = 8,23 \cdot \text{Log} \left[ \frac{\text{Re}^{0,56}}{3,196} \right] \quad (2.16-a)$$

## **2.5 Método de investigación a aplicar en el análisis de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes.**

Como ya se mencionó en el epígrafe 2.2, la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes, consta de dos fuentes de abasto, de las cuales mediante bombeo directo se garantiza la carga y el suministro de agua para el consumo.

Para efectuar una correcta evaluación de las características técnicas de la misma, se procederá en el orden que se muestra a continuación:

- 1- Recopilar los datos fundamentales para poder efectuar la evaluación de la red (diámetros interiores, rugosidades equivalentes, cantidad y tipos de accesorios instalados, longitudes, de la totalidad de las ramas integrantes de la red).
- 2- Realizar una representación en planta de la red, para facilitar el análisis y permitir una mejor comprensión del problema, a la hora de desarrollar el sistema de ecuaciones de ajuste de caudales, enumerando para ello cada nodo y mallas, según la notación empleada en el cuerpo del trabajo.
- 3- Efectuar el análisis hidráulico de las conductoras Fumerito y Piloto, para disponer de los valores de presión de entrega de ambas conductoras en el punto de entrada de la red.
- 4- Realizar el balance de flujos por mallas mediante el método de Cross, para ello se asumen los valores de caudales iniciales, que posteriormente serán ajustados en un proceso de aproximaciones sucesivas. Los valores inicialmente asumidos deben satisfacer el principio de continuidad en cada nodo, o sea que la suma de todos los caudales que converjan en un mismo nodo debe ser igual a cero.
- 5- El proceso iterativo debe continuar hasta tanto el error de los caudales ajustados no se encuentre entre el 2 y el 5 %, de acuerdo a lo estipulado en las normas cubanas de diseño de redes hidráulicas<sup>6</sup>.
- 6- Obtener con los valores de caudales definitivos el resto de los parámetros de importancia de la red, como son el coeficiente de fricción, los valores de pérdidas de presión, etc.

---

<sup>6</sup> NC- 345-79 (Normativas a emplear en la comprobación del estado técnico de redes de distribución hidráulicas)

- 7- Efectuar un análisis de los principales parámetros obtenidos y proponer una solución para el subsanamiento de las posibles deficiencias detectadas, teniendo en cuenta que estas propuestas deben ser económicamente factibles y técnicamente aplicables.
- 8- 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.
- 9- Realizar el cálculo económico, de las variantes propuestas, aplicando las técnicas de análisis diferencial (TIR y VAN), y seleccionar en caso de que existan varias propuestas la más adecuada para su futura implementación en la explotación de la red hidráulica.

## **CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

### **3.1 Antecedentes.**

Aunque no existen documentos oficiales al respecto, el acueducto de Unión de Reyes fue construido en el intervalo de tiempo comprendido entre los años 1906 y 1908, según lo reportado por el museo municipal y el historiador de la localidad<sup>1</sup>. En sus inicios este 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. En la década del 40 del pasado siglo, se realizaron trabajos de ampliación, pero los mismos no fueron significativos, pues el beneficio que reportaba dicha inversión era solamente en función de cubrir las necesidades de las nacientes industrias pertenecientes a grupos de capital privado, y no con propósitos de solucionar los graves problemas de abasto de agua potable que confrontaba la población en general.

### **3.2 Red de distribución.**

La red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes surge, como ya se dijo, a partir del 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 fundamentales. En la tabla 3.1 del anexo 3, se dan las características fundamentales de los elementos que lo componen.

Una vista en planta de la red analizada, en la cual se muestran los circuitos fundamentales, nombres de calles y ubicación de válvulas se reporta en la figura 4.1 del anexo 4. Los diámetros y longitudes correspondientes a cada rama, se reflejan en la tabla 4.2 del anexo antes citado.

### **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

---

<sup>1</sup> Oficina de patrimonio municipal, Unión de Reyes, 2009

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.

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).

En el municipio Unión de Reyes, según lo reportado por el Instituto Municipal de Meteorología<sup>2</sup>, la temperatura media anual del agua es igual a 25°C. Para esta temperatura, según lo reportado por Perry *et al* [63], la viscosidad cinemática del agua será igual a  $0,905 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

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 3.1.

Tabla 3.1 Coeficientes de pérdidas de los accesorios integrantes de la conductora Piloto

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

Con los datos necesarios se está en condiciones de determinar los valores de pérdidas por fricción en el interior de las líneas de tuberías y las ocasionadas por la existencia de accesorios en el tramo analizado, para ello se comienza por determinar el número de Reynolds, el cual es obtenido a partir de la expresión (1.3), disponiéndose para esto de los siguientes datos:

$$\nu = 0,905 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad d = 0,25 \text{ m} \quad \text{y} \quad Q = 0,051 \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d \cdot \nu} = \frac{4 \cdot 0,051}{3,1416 \cdot 0,25 \cdot 0,905 \cdot 10^{-6}} = 287\,005,8 \quad (\text{Turbulento})$$

Con el valor determinado de Re se procede a calcular el factor de fricción, utilizando para ello la ecuación (2.15), y comprobando su valor posteriormente con la expresión (1.8), con el objetivo de demostrar el alto grado de semejanza de los valores numéricos

<sup>2</sup> Memorias descriptivas, INRH, Unión de Reyes, 2018

obtenidos entre ambas expresiones. Para ello se dispone de los siguientes valores:  
 $Re = 287\,005,8$   $d = 0,25\,m$  y  $e = 1,6\,mm$ . Calculando se obtiene:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \text{Log} \left( \frac{e/d}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) = 0,03305 \approx 0,033$$

$$f = \left[ -2 \cdot \text{Log} \left( \frac{e/d}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \right]^{-2} = 0,033048 \approx 0,033$$

Lo que demuestra el alto nivel de coincidencia entre ambos modelos, corroborándose de esta forma lo descrito en los trabajos [11, 12, 13, 14].

Con el valor del factor de fricción ya determinado, se pueden determinar los valores de pérdidas ocasionadas por la fricción entre el fluido y las paredes de la tubería, aplicando para ello la ecuación (1.5).

Para este análisis se dispone de los siguientes datos:

$$f = 0,033 \quad , \quad Q = 0,051\,m^3/s \quad , \quad l = 3160\,m \quad , \quad g = 9,806\,m/s^2$$

Sustituyendo en la ecuación (1.5):

$$\Delta p = f \cdot \frac{V^2 \cdot l}{2 \cdot d \cdot g} = f \cdot \frac{8 \cdot l \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot d^5 \cdot g} = 0,033 \cdot \frac{8 \cdot 3160 \cdot (0,051)^2}{(3,1416)^2 \cdot (0,25)^5 \cdot 9,806} = 22,991 \approx 23\,m$$
 El

valor numérico de pérdidas hidráulicas debidas a la presencia de accesorios se determina a partir de la expresión (2.1), para lo cual se disponen de los datos que se dan a continuación:

$$Q = 0,051\,m^3/s \quad , \quad \sum \xi = 13,5 \quad , \quad g = 9,806\,m/s^2 \quad .$$

$$\Delta p_m = \sum \xi \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = \sum \xi \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot g} = 13,5 \cdot \frac{8 \cdot 0,051^2}{3,1416^2 \cdot 0,25^4 \cdot 9,806} = 0,743\,m$$

Es conocido, como se explicó en el análisis bibliográfico, que los valores de los coeficientes de pérdidas, ocasionadas estas pérdidas por la presencia de accesorios, los que se disponen en la literatura especializada, son válidos solamente en la zona de turbulencia total. En la zona de transición estos aumentan en forma proporcional a la disminución del número adimensional de Reynolds, por tanto, se empleará la ecuación (2.2) para comprobar si el fluido que circula en el interior del intervalo analizado se encuentra en la zona de transición o de turbulencia total, disponiéndose al efecto de los datos siguientes:

$d = 0,25\,m$  y  $e = 1,6\,mm$ . Sustituyendo en la ecuación (2.2),

$$\text{Re}_{\text{CRIT2}} = 550 \cdot \left( \frac{e/d}{0,25 \cdot 1000} \right)^{-1,125} = 550 \cdot \left( \frac{1,6}{0,25 \cdot 1000} \right)^{-1,125} = 161\,588,4$$

$$\text{Re}_{\text{CRIT2}} < \text{Re} = 287\,005,8$$

Como se acaba de demostrar, el número adimensional de Reynolds que caracteriza el régimen de flujo que circula en el intervalo analizado es superior al segundo número crítico de Re, por tanto, el tramo estudiado se encuentra en la zona de turbulencia total. El valor total de pérdidas hidráulicas en el tramo analizado será igual a la sumatoria de la producida por la presencia de accesorios, más la ocurrida por la fricción interna, matemáticamente esto se describe a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta p_{\text{sis}} = \Delta p_m + \Delta p \quad (3.1)$$

Sustituyendo los valores ya conocidos en la expresión (3.1)

$$\Delta p_{\text{sis}} = \Delta p_m + \Delta p = 0,743 + 23 = 23,7 \text{ m}$$

Por tanto ya es conocido el valor numérico de las pérdidas hidráulicas del sistema, siendo estas iguales a 23,7 m, lo que aproximadamente es igual a 232,7 kPa.

Aplicando la ecuación (1.4), y despejando la presión en el extremo aguas abajo del conducto analizado, se obtiene la presión en este punto, valor necesario para continuar con el análisis del resto de la red hidráulica. Procediendo:

$$P_2 = P_1 - \rho \cdot g \cdot \left[ \alpha_2 \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot g} + \Delta p_{\text{sis}} \right] \quad (3.2)$$

En la literatura consultada se muestra uniformidad de criterios acerca del valor numérico de la densidad del agua a una temperatura media igual a 25 °C, por tanto el autor utilizará los datos reportados por Streeter [74] y Shames [72], los cuales plantean que para esta temperatura la densidad del agua será igual a 997,1 kg/m<sup>3</sup>.

Aquí se tomó el fluido como incompresible, para facilitar el análisis y de esta forma considerar a la densidad como constante en todos los puntos del intervalo analizado.

El valor del coeficiente que tiene en cuenta la no uniformidad de la energía cinética del flujo, se determinara a partir de la expresión (1.4.a)

$$\alpha = 1,284 \cdot \text{Re}^{-0,015} = 1,284 \cdot 287005,8^{-0,015} = 1,0634$$

Tomando el valor de  $P_1$  de la Tabla 2.1 y sustituyendo los valores conocidos en la expresión (3.2), se obtiene en definitiva que:

$$P_2 = P_1 - \rho \cdot g \cdot \left[ \alpha_2 \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot g} + \Delta p_{\text{sis}} \right] = 132\,049,05 \approx 132\,049,1 \text{ Pa}$$

Por tanto, se ha determinado que la presión del agente de trabajo que se suministra a través de la conductora Piloto, se incorpora al punto de distribución a una presión aproximadamente igual a 132,1 kPa.

### 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 4.1 y la tabla 4.2 del anexo 4, 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 a partir de lo planteado en la tabla 1.1, se toma un valor intermedio de rugosidad equivalente igual a 1,6 mm.

El caudal de fluido que circula por esta conductora es igual al proporcionado por la estación de bombeo Fumerito, en la tabla 2.1 se obtiene que es igual a 30 l/s (0,03 m<sup>3</sup>/s). El tramo analizado está constituido por un grupo de accesorios, los cuales son resumidos, con sus respectivos coeficientes de pérdidas en la tabla 3.2

Tabla 3.2 Coeficientes de pérdidas de los accesorios de la conductora Fumerito

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

Para la determinación de los valores de pérdidas por fricción, se comienza inicialmente por obtener el valor del número adimensional de Reynolds, el cual se define a partir de la relación (1.3), disponiéndose para ello de los datos siguientes:

$$\nu = 0,905 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad d = 0,2 \text{ m} \quad Q = 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d \cdot \nu} = \frac{4 \cdot 0,03}{3,1416 \cdot 0,2 \cdot 0,905 \cdot 10^{-6}} = 211034,18 \approx 211\,034,2 \text{ (Turbulento)}$$

Con el valor determinado de  $Re$  se procede a calcular el factor de fricción, utilizando para este fin la ecuación (2.15), contando con los siguientes valores:

$$Re = 211\,034,2 \quad , \quad d = 0,2 \text{ m} \quad , \quad e = 1,6 \text{ mm}$$

$$f = \left[ -2 \cdot \text{Log} \left( \frac{e}{d} \cdot 0,2707 - \frac{A}{B} \right) \right]^{-2} = 0,03548 \approx 0,0355$$

Conocido el valor del factor de fricción, la magnitud de las pérdidas ocasionadas por la fricción entre el fluido y las paredes de la tubería se determina con la aplicación de la relación (1.5)

Para este análisis se dispone de los siguientes datos:

$$f = 0,0355 \quad Q = 0,03 \text{ m}^3/\text{s} \quad l = 1755 \text{ m} \quad g = 9,806 \text{ m/s}^2$$

$$\Delta p = f \cdot \frac{V^2 \cdot l}{2 \cdot d \cdot g} = f \cdot \frac{8 \cdot l \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot d^5 \cdot g} = 0,0355 \cdot \frac{8 \cdot 1755 \cdot (0,03)^2}{(3,1416)^2 \cdot (0,2)^5 \cdot 9,806} = 14,476 \approx 14,48 \text{ m}$$

El valor numérico de pérdidas hidráulicas debidas a la presencia de accesorios se obtiene a partir de la expresión (2.1), para lo cual se disponen de los datos que se dan a continuación:

$$Q = 0,03 \text{ m}^3/\text{s} \quad \sum \xi = 14,1 \quad g = 9,806 \text{ m/s}^2$$

$$\Delta p_m = \sum \xi \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} = \sum \xi \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot g} = 14,1 \cdot \frac{8 \cdot 0,03^2}{3,1416^2 \cdot 0,2^4 \cdot 9,806} = 0,655 \text{ m}$$

Para la determinación del segundo número crítico de  $Re$  se utiliza la expresión (2.2), comprobando de esta forma si el tramo analizado se encuentra en la zona de transición o de turbulencia completa, disponiéndose para esto de los valores siguientes.

$$d = 0,2 \text{ m} \quad e = 1,6 \text{ mm}$$

$$Re_{CRIT2} = 550 \cdot \left( \frac{e}{d} \right)^{-1,125} = 550 \cdot \left( \frac{1,6}{0,2 \cdot 1000} \right)^{-1,125} = 125\,714,8$$

$$Re_{CRIT2} < Re$$

Como se acaba de demostrar el número adimensional de Reynolds que caracteriza el régimen de flujo que circula en el intervalo analizado, es superior al segundo número crítico de  $Re$ , por tanto el intervalo estudiado se encuentra en la zona de turbulencia total. El valor total de las pérdidas hidráulicas en el intervalo analizado será determinado a partir de la expresión (3.1). Sustituyendo los valores ya conocidos:

$$\Delta s_{is} = \Delta p_m + \Delta p = 0,655 + 14,48 = 15,135 \text{ m}$$

Como se acaba de demostrar las pérdidas hidráulicas del intervalo analizado, serán iguales a 15,135 m, lo que aproximadamente es igual a 148,5 kPa. El valor de la presión final del agente de trabajo en la conductora Fumerito, será determinado mediante la aplicación de la expresión (3.2). El valor del coeficiente que tiene en cuenta la no

uniformidad de la energía cinética del flujo, se determinara a partir de la expresión (1.4.a)

$$\alpha = 1,284 \cdot \text{Re}^{-0,015} = 1,284 \cdot 211034,18^{-0,015} = 1,0683$$

Sustituyendo los valores conocidos en la expresión (3.2), se obtiene en definitiva que:

$$P_2 = P_1 - \rho \cdot g \cdot \left[ \alpha_2 \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot g} + \Delta p_{sis} \right] = 134\,048,2 \text{ Pa}$$

Quedando demostrado que el agente fluido se incorpora al punto de referencia a una presión de trabajo equivalente aproximadamente igual a 134,1 kPa.

### 3.5 Análisis del caudal por ramas y mallas por el método de Cross.

Como se explicó anteriormente en el análisis bibliográfico, el método de Cross consiste en la determinación de un valor de corrección para cada malla del sistema, a partir de un valor inicial asumido de caudal, siendo necesario que este último satisfaga las condiciones de continuidad en cada nodo del sistema, y que a su vez la sumatoria de las caídas de presión en cada malla cerrada sea igual a cero.

Según se aprecia en la figura 4.1 del anexo 4, la red analizada consta de un total de 52 mallas, por lo tanto en el proceso iterativo que se efectuará mediante el ya citado método de Cross, surgirán un total de 52 ecuaciones de ajuste de valores de caudales. Debido al reducido espacio del presente trabajo, y al volumen tan extenso de espacio que requeriría la obtención de los valores reales de caudales por cada rama, el autor se limitará solamente a obtener las ecuaciones que regirán el proceso iterativo de valores y mostrará su aplicación únicamente en la primera corrida de variables.

De la tabla 4.2 del Anexo 4, se obtienen los respectivos valores de longitud y diámetro interno de todas las ramas integrantes de la red analizada, por tanto con estos valores se procede inicialmente según lo explicado en el análisis bibliográfico a la determinación del valor del factor de fricción, suponiendo inicialmente que el flujo que circula por su interior se encuentra en la zona de turbulencia total.

Es conocido de los cursos de mecánica de los fluidos que cuando el flujo se encuentra en la zona de turbulencia total, el número adimensional de Reynolds prácticamente no ejerce influencia alguna sobre el valor del factor de fricción, por tanto será muy pequeño el error que se cometerá con despreciar los valores numéricos del número adimensional antes citado en la determinación del factor de fricción, permitiendo de esta forma simplificar el análisis.

Para la obtención de los correspondientes valores del factor de fricción se empleará la relación (2.15), despreciando en ella los términos A y B, que contienen al término Re, quedando en definitiva:

$$f = \left[ -2 \cdot \text{Log} \left( \frac{e}{d} \cdot 0,2707 \right) \right]^2 \quad (3.3)$$

Las tuberías integrantes de la red analizada son de hierro fundido, por tanto, se toma para el análisis, un valor medio de grano de arena equivalente ( $e$ ), igual a 1,4 mm.

Como el sistema analizado está constituido por un total de 147 ramas, resultará extremadamente laborioso la sustitución de los valores correspondientes a cada rama en la ecuación (3.3), debido al elevado número de operaciones matemáticas a desarrollar, por tanto el autor ha implementado esta expresión en la herramienta Microsoft Excel 2007. Los valores del factor de fricción obtenidos son dados en la tabla 4.3, anexo 4.

Para la determinación de las pérdidas de carga en cada conducto resulta necesario conocer la cantidad de accesorios que integran cada línea de tuberías, así como también los que forman parte de las uniones de las mallas existentes en el sistema, por tanto la identificación de los mismos será efectuada a partir del esquema representativo de la red (véase la figura 4., anexo 4), siendo reflejados sus valores en la tabla 4.3, anexo 4.

Una vez que resultan conocidos los valores del factor de fricción y los coeficientes de pérdidas por accesorios para cada rama, se aplica la ecuación (1.11-b) para obtener los valores de pérdidas de carga en cada rama de la red, siendo resumidos en la tabla 4.3, anexo 4.

### **3.5.1 Balance de carga mediante la aplicación del método de Cross.**

La mayor dificultad en la aplicación del método de Cross, consiste en lograr el equilibrio nodal antes de comenzar a efectuar el balanceo de mallas, debido a que en ocasiones el método iterativo muestra una lenta convergencia a los valores reales. Para evitar estos inconvenientes, en la ingeniería práctica, lo que se suele hacer es comenzar por pruebas de tanteos y errores, para posteriormente lograr que los caudales asumidos inicialmente no superen el margen de error permisible (entre el 2 y 5 %), además de tener en cuenta al efectuar un diseño, que las redes cerradas son preferibles a las abiertas o semi-cerradas.

A finales de la década de los 90 en la CUJAE, un grupo de investigadores encabezados por el DrC. Diosdado Pérez Franco, elaboró un método teórico-práctico mediante el

cual se puede determinar si la red analizada es cerrada y posee solución única, al implementar una sencilla expresión la cual se muestra a continuación [19]:

$$N + M = T + 1 \quad (3.4)$$

En la expresión (3.4)  $N$  es el número de nodos que forman parte integrante de la red,  $M$  es el número de mallas que forman parte integrante de la red y  $T$  es el número de ramas que forman parte integrante de la red.

Cuando se refiere aquí a que forman parte integrante de la red, esto significa que se tienen en cuenta para la aplicación de las expresiones anteriores solamente los componentes que estén directamente conectados al sistema de mallas, y no a los exteriores como pueden ser los conductos de suministro o descarga de la red. En la figura 4.1, anexo 4 se aprecia que la red analizada posee un total de 96 nodos, 52 mallas y 147 ramas, que forman parte integrante de la misma, por tanto sustituyendo estos valores en la expresión (3.4) se obtiene que:

$$96 + 52 = 147 + 1$$

Se puede comprobar fácilmente que esta igualdad es coincidente en los términos de la izquierda y derecha, por tanto nos encontramos ante un sistema de distribución hidráulica cerrado con una única solución posible de caudales para cada rama y nodo.

Acá se toma como convenio de signos, los flujos serán positivos si entran al nodo y negativo si salen de este. El balance nodal inicial efectuado es dado en forma de tablas en el anexo 6.

Seguidamente se realiza el primer balance de mallas, con el objetivo de obtener los coeficientes de corrección para la segunda corrida de valores, empleando para este fin la expresión (1.17). Acá se considerarán positivos los caudales si coincide su sentido de desplazamiento con el giro de las manecillas del reloj y negativos si sucede lo contrario. El sistema de ecuaciones formado para el balance de la red es dado íntegramente en el anexo 6. Con la aplicación de estas ecuaciones se determinan las correcciones para los caudales asumidos inicialmente para cada rama. Para efectuar esta corrección se hace necesario primeramente comprobar a que malla pertenece cada rama, y posteriormente agregar al valor del caudal asumido inicialmente los valores de ajuste que corresponden a cada malla de la que forme parte integrante la rama que se está analizando su caudal.

Es lógico que para cada rama integrante del sistema exista una ecuación de corrección, siempre y cuando estas formen parte constituyente de alguna malla cerrada. La red analizada está constituida por un total de 147 ramas, por tanto la aproximación en cada

intento de convergencia estará formada por igual número de ecuaciones. A pesar del elevado número de expresiones a desarrollar el autor obtendrá la totalidad de estas para dejar plasmada una clara idea de cómo funciona el proceso iterativo del método de Cross, siendo reportadas las mismas en el anexo 7. Estas ecuaciones permiten obtener una mejor aproximación de los valores de los caudales asumidos inicialmente y satisfacen adicionalmente las condiciones de continuidad en cada nodo, así como también en cada malla cerrada. Este proceso se aplicará cuantas veces sea necesario hasta que los valores de caudales anteriores y los nuevos obtenidos sean tales que su diferencia numérica oscile entre un dos y un cinco por ciento.

Si se desea conocer el número de iteraciones necesarias, los autores [20], [53], han elaborado un método teórico-práctico basado en las concepciones modernas de modelos CFD, mediante el cual se determina con un 99% de confianza el número de operaciones mediante la siguiente expresión:

$$\#Op = g \cdot \left[ \frac{\sqrt{M \cdot R} + \sqrt{R - M}}{\sqrt{M + R}} \right] \quad (3.5)$$

En la expresión anterior:

M es el número de mallas que integran el sistema cerrado de distribución.

R es el número de ramas que integran el sistema cerrado de distribución.

g es el valor de la aceleración de la gravedad en condiciones normales,  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

Sustituyendo los valores conocidos en la expresión (3.5):

$$\#Op = 9,81 \cdot \left[ \frac{\sqrt{52 \cdot 147} + \sqrt{147 - 52}}{\sqrt{147 + 52}} \right] = 67,577 \approx 68 \text{ Operaciones.}$$

Esto da una idea de la complejidad del sistema analizado, pues es necesario efectuar 68 operaciones de ajuste a los valores asumidos inicialmente para disponer de los valores reales del caudal que circula por cada rama.

En la actualidad, esta labor se facilita gracias a los paquetes de software que incluyen procedimientos iterativos. En este trabajo el autor utilizará el paquete TK Solver 5.0, el cual permite tratar los valores de caudales como incógnitas o Guess, facilitándose de esta forma el análisis iterativo. El algoritmo empleado se insertará en el CD acompañante al presente trabajo, mostrándose en el anexo 8, parte de la hoja de ecuaciones y de la hoja de variables. Los valores definitivos de los caudales para cada rama en específico después de un total de 68 iteraciones al sistema se muestran en la tabla 4.4 del anexo 4.

Siendo ya conocidos los valores de caudales que circulan por cada rama, es muy sencillo determinar el valor de la carga hidrostática en cada nodo, para ello se hace necesario efectuar algunas aclaraciones antes de proceder a su determinación.

- 1- La sumatoria de las pérdidas de carga en una malla cerrada siempre va a ser nula, o sea igual a cero.
- 2- Para las ramas que el fluido que circule por su interior, lo haga de forma coincidente con el giro de las manecillas del reloj, los valores de pérdidas de carga serán positivos y en el caso contrario se consideraran negativos.

Los valores definitivos de pérdidas de carga para cada rama después de la aplicación de la expresión (1.11) a cada rama en específico se muestran tabla 4.5 del anexo 4.

### **3.5.2 Análisis de los resultados obtenidos con el uso del método de Cross.**

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.

Los valores de pérdidas de carga para cada rama ya fueron determinados (véase la tabla 4.6, anexo 4), por tanto, consultando lo reflejado en la tabla anteriormente citada se llega a la conclusión de que existen un total 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 todos ubicados en la porción norte del poblado, a pesar de que las tres estaciones de bombeo se encuentran activas y entregando un caudal superior al requerido por el consumo tanto residencial como estatal.

Este análisis demuestra que el problema planteado inicialmente es correcto, y por tanto surge la necesidad de seleccionar un bombeo intermedio que sea capaz de suplir este déficit de carga, cumpliéndose así lo planteado en la hipótesis de este trabajo.

### **3.5.3 Selección del bombeo intermedio requerido.**

El bombeo intermedio que prestaba sus servicios en la red analizada, se encuentra fuera de servicio hace aproximadamente 13 meses, tras sufrir una rotura, trayendo consigo como consecuencia la agudización en la calidad de la distribución de la red, así como el incremento del consumo eléctrico, debido a que los grupos de bombas de los pozos de

abasto, trabajan para garantizar los parámetros de presión de forma continua, fuera de su zona de trabajo. Tras una inspección efectuada, el autor del presente en conjunto con los especialistas del INRH, se detectó que la bomba que se encontraba fuera de servicio reúne los requisitos técnicos para su reincorporación a la explotación, solo presenta deficiencias en los sistemas de rodamientos.

Por tanto no se hace necesario como se previó anteriormente en las tareas, la selección de un bombeo intermedio, sino que se le efectuará el correspondiente mantenimiento al ya existente, y posteriormente de su puesta en marcha se procederá a la evaluación de su funcionamiento y su influencia sobre la calidad de la operación de la red hidráulica.

Para lograr la puesta en marcha de la bomba se necesitó adquirir cuatro rodamientos axiales-radiales 32312, tipo SKF.

### **3.6 Propuestas para incrementar la eficiencia y fiabilidad de explotación de la red.**

En función de disminuir el consumo eléctrico de las fuentes de abasto ocasionado por el trabajo continuo se recomienda reprogramar los horarios de bombeo y abasto, para que estos coincidan con las necesidades reales de la población y entidades estatales, y en los horarios en el que el consumo decrece considerablemente, retirar de servicio el sistema de bombeo. La propuesta del autor se muestra en la tabla 3.3, el total de energía ahorrada que se muestra en esta tabla será obtenido con la ayuda del software Microsoft Excel 2007.

La demanda coincidente máxima es igual a 48,5 l/s, así que en cualquiera de los casos que alguna de las fuentes de abasto quede fuera de servicio no se perjudica el consumo.

De la tabla 3.3, se puede apreciar que la aplicación de la propuesta de reprogramación de los horarios de bombeo, reportara un ahorro por consumo de energía eléctrica en un espacio de tiempo de 7 días (1 semana) igual a 12 088 kWh, con promedio diario igual a 1 726,8 kWh, sin afectar la calidad del servicio, ya que este estará activo por un espacio de 16 horas, desde las seis AM hasta las 10.00 PM, entregando en todo momento un caudal superior a la demanda coincidente máxima, además de que estarán garantizados los parámetros de excelencia pues el bombeo intermedio estará en servicio ese espacio de tiempo.

Extender esta política al resto del año significaría un ahorro total de energía eléctrica igual a 630,3 MWh, lo cual asciende a 176,5 Tpe (toneladas equivalentes de petróleo). La tarifa aplicada por la Empresa Eléctrica a la entidad es a 0,012 \$/kWh, lo

representaría un ahorro de 7 563,6 CUP por concepto de energía eléctrica dejada de consumir en el período de un año.

Tabla 3.3 Propuesta para el funcionamiento de las estaciones de bombeo

Estación de bombeo	Horario	L	M	M	J	V	S	D
PILOTO 1 (30 l/s) (40kWh.)	10PM- 6AM (8h)	N	N	N	N	N	N	N
	6AM- 6PM (12h)	S	N	S	N	S	N	S
	6PM-10PM (4h)	N	S	N	S	N	S	N
PILOTO 2 (21 l/s) (26kWh.)	10PM- 6AM (8h)	N	N	N	N	N	N	N
	6AM- 6PM (12h)	N	S	S	S	S	S	S
	6PM-10PM (4h)	S	S	S	S	S	S	S
FUMERITO (30 l/s) (37,5kWh.)	10PM- 6AM (8h)	N	N	N	N	N	N	N
	6AM- 6PM (12h)	S	S	N	S	N	S	N
	6PM-10PM (4h)	S	N	S	N	S	N	S
INTERMEDIO (37,5kWh.)	10PM- 6AM (8h)	N	N	N	N	N	N	N
	6AM- 6PM (12h)	S	S	S	S	S	S	S
	6PM-10PM (4h)	S	S	S	S	S	S	S
Total de energía ahorrada por días (kWh)		1600	1758	1738	1758	1738	1758	1738
S = se encuentra funcionando		N= se encuentra fuera de servicio						

### 3.7 Análisis de la inversión.

Según el criterio del Dr.C. José Luís Sánchez Ávila [71], y las referencias [37, 50], el análisis económico se realiza teniendo en cuenta que se propone un proyecto de inversión, existiendo dos tipos de proyectos fundamentales a saber:

1. Investigación: que a su vez puede ser:
  - En ciencias básicas.
  - En ciencias aplicadas.
2. Constructivos: que pueden ser:
  - Industriales.
  - Remodelación.
  - Nuevo producto o innovación.
  - Organización de la producción.

En este caso la propuesta que se hace es de un proyecto constructivo de remodelación.

Una inversión es renunciar a algo para lograr mucho más en el futuro; para este caso es invertir un dinero para lograr más, a partir del aumento de la ganancia surgida como resultado de la explotación eficiente de la red, gracias a una reducción de los costos.

Para los cálculos se escogió un horizonte de dos años, que es la perspectiva en que se espera coincidan los ingresos con los pagos realizados producto de la inversión que se va a acometer; y se dividió el horizonte en años como período. De esta forma se está considerando que antes de los 2 años el proyecto va a producir cobros que justifiquen los pagos realizados.

El costo total de una inversión de acuerdo a lo planteado por [50, 52], se puede calcular de la forma siguiente:

$$CTI = CI + CO \cdot \left[ \frac{(1+i)^m - 1}{(1+i)^m \cdot i} \right] \quad (3.6)$$

Donde:

CTI es el costo total de la inversión, en \$

$i$  es la tasa de interés del banco de donde se extrajo el dinero, o la tasa de interés del crédito o préstamo solicitado, en fracción.

CI es el costo de instalación, que es la suma del costo de la inversión más el montaje, en \$.

CO es el costo de operación y mantenimiento, en \$.

$m$  es la vida útil del equipo, se toma 10 años.

$\left[ \frac{(1+i)^m - 1}{(1+i)^m \cdot i} \right]$  es el coeficiente que tiene en cuenta que el costo de operación y

mantenimiento se produce durante su vida útil.

Ibáñez planteó en su tesis doctoral, según [71], coincidiendo con el criterio de [37, 50, 52], que el costo de mantenimiento para un equipamiento nuevo se calcula por la siguiente expresión:

$$CO = 0,03 \cdot CI \quad (3.7)$$

Donde el costo de la instalación se puede subdividir a su vez como se explicó anteriormente en el costo de la inversión más el costo de montaje, matemáticamente esto se expresa como sigue:

$$CI = C_{INV} + C_{MON} \quad (3.8)$$

Siendo:

$C_{INV}$  es el costo de la inversión, en \$

$C_{MON}$  es el costo del montaje, en \$

El costo de la inversión se obtiene de los proveedores, en este caso de Divep S.A., esta compañía suministró los rodamientos requeridos a un precio unitario de 36,45 CUC cada uno, así como proporcionó el motor eléctrico requerido a un costo de 385,75 CUC. El costo de montaje depende de muchos factores, como son salarios de los obreros implicados en la tarea, transportación, consumo de energía eléctrica etc., para facilitar la obtención del valor de costo de montaje total, todos los gastos que formaron parte del mismo serán resumidos en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Costos de montaje e inversión asociados al bombeo intermedio.

Elementos	Cantidad	Costo Unitario(\$)	Parcial (\$)	Costo . Total (\$)
<b>Material directo</b>				
Motor eléctrico adquirido	1 und	385,75	385,75	
Rodamientos 32312 SKF	4 und	36,45	145,8	
Eléctrodos E-6013	0.5 kg	2.00	1.00	
<b>Total de material directo</b>				532,55
<i>Mano de obra directa:</i>				
Soldador A	24 hras	1.89	45,36	
Mecánico Industrial B	24 hras	1.71	41,04	
Mecánico Industrial A	24 hras	1.89	45,36	
Ayudantes(2 hombres)	24 hras	1.51	72,48	
<i>Total de mano de obra directa</i>				204,24
<b>Costos Indirectos de fabricación</b>				
Diesel	80 lts	1.15	92,00	
Aceite multi B	3 lts	0.85	2,55	
Salario de Chofer	24 hras	1.61	38,64	
Jefe de Mantenimiento	24 hras	2.08	49,92	
Jefe de Brigada	24 hras	1.97	47,28	
Total de Costos Indirectos de Fabricación				230,39
Costos de la inversión				532,55
Costos de montaje				434,63
Costo Total				967,18

De los resultados representados en la Tabla 3.4, se obtiene que el costo total de la instalación sea igual a 965,18 CUC. Sustituyendo los valores dados en la tabla anteriormente citada en la expresión (3.8), se llega al mismo resultado.

$$CI = 532,55 + (202,24 + 230,39) = 965,18 \text{ CUC}$$

Por tanto ya siendo conocido el costo de la instalación se determina fácilmente el costo de mantenimiento, con la sustitución del valor numérico de este primero en la expresión (3.7), tal como se muestra a continuación:

$$CO = 0,03 \cdot 965,18 = 28,955 \text{ CUC}$$

El dinero para la inversión se extrae del banco, bajo una tasa de interés bancario del 3 % (0,03 en fracción). Con este valor ya conocido se aplica la relación (3.6) y sustituyen en ella los términos disponibles, para de esta forma obtener el costo total de la inversión:

$$CTI = 967,18 + 28,955 \cdot \left[ \frac{(1 + 0,03)^{10} - 1}{(1 + 0,03)^{10} \cdot 0,03} \right] = 1\,214,172 \approx 1\,214,2 \text{ CUC}$$

Lo que acaba de demostrar que el costo total de la inversión asciende a 1 214,2 CUC.

### 3.7.1 Cálculo y análisis de los ahorros logrados

En el epígrafe 3.6, se propuso una metodología que permitirá considerablemente reducir la tarifa eléctrica, la cual traerá consigo el consecuente ahorro de costos por concepto de pagos por consumo de electricidad. Se había demostrado que el ahorro será igual a 7 563,6 CUP anuales, con una optimización promedio diaria de energía eléctrica igual a 1 726,8 kWh., esto será comprobado a continuación, siguiendo lo recomendado por Ibáñez y José Luis Sánchez, según [71], multiplicando para ello este valor de ahorro promedio diario, por las 24 horas que tiene el día, y los 365 días que trabaja en el año, obteniéndose:

$$\Delta Ela = \Delta El \cdot Dta \text{ (días/año)} = \text{kWh/año} \quad (3.9)$$

Donde  $\Delta El$  es el ahorro promedio diario, en kWh;  $\Delta Ela$  es el ahorro de electricidad anual, en kWh/año y  $Dta$  es la cantidad de días de trabajo en el año, 365 cuando es todo el año.

Sustituyendo los valores conocidos en la expresión (3.9)

$$\Delta Ela = 1\,726,9 \text{ kWh/día} \cdot 365 \text{ (días/año)} = 603\,302,8 \text{ kWh/año}$$

Este resultado coincide con lo determinado en el epígrafe 3.6.

Si se multiplica este valor por el pago promedio que de electricidad que le aplica la Empresa Eléctrica al INRH, según la tarifa 56 (0,12 \$/kWh), se obtiene el ahorro en \$ que se puede lograr con la variante propuesta:

$$Ah = \Delta Ela \cdot Trf \quad (3.10)$$

Donde:

$Trf$  es la tarifa aplicada a la entidad por la Empresa Eléctrica, (0,12 \$/kWh.),

$Ah$  es el ahorro en dinero por reducción del consumo eléctrico, en \$/año.

$\Delta Ela$  es el ahorro de electricidad logrado, (603 302,8 kWh /año)

Sustituyendo en la expresión (3.10), se obtiene en definitiva que:

$$Ah = \Delta Ela \cdot Trf = 0,012 \cdot 603302,805 = 7\,239,6 \text{ CUP}$$

Resultado que coincide con el determinado en el epígrafe 3.6

### 3.7.2 Movimiento de fondos

Según [29, 50, 52, 71], el movimiento de fondos de una inversión consiste en determinar en cada uno de los períodos en que se dividió el horizonte, cuántos cobros y cuántos pagos se realizan. Para facilitar su confección y análisis se realizará este movimiento en forma de tablas con los cobros y pagos a partir del momento en que se debe culminar la inversión; la resultante de esta tabla va a ser el movimiento de fondos, y se confecciona por períodos, teniendo en cuenta que todo lo que se ahorra se va a cobrar a más tardar al finalizar el año, y todo lo que se compra se va a pagar a más tardar al finalizar el año.

El valor resultante puede ser positivo o negativo, el valor positivo es lo que se desea; el valor negativo significa que la inversión no es recuperable en el horizonte determinado, esto ocurre generalmente cuando el valor de la producción que se logra con la inversión se encuentra por debajo del punto de isorrentabilidad de la empresa.

Si no se realiza el movimiento de fondo no se puede determinar y evaluar con todo rigor las inversiones según lo planteado por [16, 36, 50, 56], Es aconsejable antes de acometer una inversión realizar un estudio de mercado previo, que permita tener en cuenta todas las posibilidades de ofertas; en este caso se utiliza un solo proveedor por lo restringido del mercado cubano actual de estos equipamientos.

En resumen se tiene una sola variante, de la cual serán expuestos sus datos en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Datos de la variante disponible.

Características	Nomenclatura	Variante
Costo fijo anual = Depreciación [\$/año]	D	53,255
Ahorro anual [\$/año]	Ah	7 563,64
Inversión inicial [\$]	CTI	967,18

La depreciación se calcula como tiene normado el INRH y se encuentra regulado por el fisco, un 10 % anual del costo de la inversión. Matemáticamente esto se representa por la siguiente relación:

$$D = 0,10 \cdot CI \quad (3.11)$$

Donde:

$D$  es el valor de la depreciación, en \$/año

Sustituyendo en la ecuación (3.11) se obtiene el valor de la depreciación para la variante:

$$D = 0,10 \cdot CI = 0,10 \cdot 532,55 = 53,255 \text{ \$/año}$$

Conocido el valor de la depreciación, se puede confeccionar el movimiento de fondos de la variante, (véase la tabla 3.6). Se puede observar, que en los costos fijos se tiene en cuenta la depreciación del equipamiento, su falta de inclusión falsearía los resultados, el resto de los costos fijos y variables son los mismos. El total de cobros no son más que los ahorros que se pueden lograr.

Tabla 3.6 Movimiento de fondos de la variante analizada

Conceptos	Años		
	0	1	2
inversión	1 214,2	0	0
costos fijos	0	53,26	53,26
total de pagos	1 214,2	53,26	53,26
total de cobros	0	7 563,64	7 563,64
movimiento de fondos	0	7 510,39	7 510,39
movimiento acumulado	-1 214,2	6 296,21	13 806,60

### 3.8 Diferentes criterios de selección para alternativas de inversión.

#### 3.8.1 Período de recuperación de la inversión.

Se calcula en función de los costos y los ingresos promedios anuales durante el horizonte analizado; para ello se utilizó de las referencias [50] y [71] la siguiente ecuación adaptada para una inversión que va a durar menos de un año; además tiene en cuenta que todos los cobros y los pagos anuales son iguales.

$$Tr = \frac{CTI}{[\text{Cobros} - \text{Pagos} \cdot (Ib + 1)] \cdot (1 - Isr)} \quad (3.11)$$

Donde:

$Tr$  es el período de recuperación de la inversión, en años.

Ib es el interés a pagar por préstamos en el año k o intereses dejados de cobrar por extraer dinero del banco, ya se había tomado 0,03.

Isr es el impuesto sobre la renta, es la parte de lo ahorrado que se paga como impuesto a la ganancia de la empresa, para el INRH es el 25% de la ganancia.

Estos cálculos se realizaron mediante el auxilio de una hoja de cálculo insertada de Microsoft Excel, basándose el cálculo en una función financiera del propio Excel, la cual será incluida en el Cd acompañante del presente trabajo. En la variante propuesta se recupera el dinero invertido a los 0,62 años, que equivale a 7 meses y 13 días, inferior al año, lo cual es altamente beneficioso según Samuelson [50]; el dinero invertido se recupera muy rápido al aplicar la variante propuesta.

### **3.8.2 Valor actual neto.**

Este criterio tiene en cuenta que el dinero invertido pierde valor con el tiempo, o sea es el criterio de comparación de costo beneficio, consiste en hallar el resultado de dividir la sumatoria de los flujos de efectivo anuales entre el desembolso inicial. Este resultado, puede considerarse la rentabilidad de la inversión debido fundamentalmente al interés bancario. En su cálculo se actualizan todos los flujos de fondo de un año base, y se compara el flujo equivalente, si es mayor que cero es económico realizar la inversión, ya que permite obtener una mayor cantidad que el dinero invertido inicialmente. Todos los cálculos se realizan sobre la base de un interés conocido. El, la cual se representa en la siguiente ecuación:

$$VAN = \sum_{k=0}^n \frac{Stk}{(1+i)^k} \quad (3.12)$$

Donde:

St es el Movimiento de fondos, en \$ y k es el período analizado, en este caso el año.

Estos cálculos se realizaron mediante el auxilio de una hoja de cálculo insertada de Microsoft Excel, basándose el cálculo en una función financiera del propio Excel, ya citada anteriormente en el análisis del periodo de recuperación de la inversión, la cual será incluida en el CD acompañante del presente trabajo.

Con esta variante se obtienen 24 226,7 \$, después de haber transcurrido dos años de haberse realizado la inversión.

### 3.8.3 Tasa interna de retorno.

Consiste en la tasa de interés calculada cuando la ecuación del valor actual neto se iguala a cero. Se aplica generalmente para determinar que interés máximo se debe aceptar de los créditos propuestos o existentes en el mercado financiero; o sea, cualquier interés de crédito o préstamo menor que el calculado es aceptable para realizar la inversión. Se calcula despejando el interés de la siguiente ecuación.

$$0 = \sum_{k=1}^n \frac{Stk}{(1 + TIR)^k} \quad (3.13)$$

Donde:

TIR es la tasa interna de retorno, en fracción.

El cálculo de la tasa interna de retorno para la variante que se viene analizando se efectuó en la ya citada hoja electrónica de Microsoft Excel., basándose el cálculo en una función financiera del propio Excel. Como puede observarse para la variante propuesta la tasa interna de retorno es mucho mayor al 3% definido con anterioridad, que es lo que deja de obtener la entidad por extraer el dinero del banco, lográndose un 585% al invertirlo en las propuestas de mejoras expuestas.

Los resultados arrojados con la implementación de la hoja electrónica Microsoft Excel 2007 a los tres criterios de selección para alternativas de inversión se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.7 Resultados obtenidos en el análisis de selección para alternativas de inversión

Tr	0,62	Años
VAN	24 226,7	\$
TIR	585	%

## CONCLUSIONES:

Como resultado de este trabajo se puede expresar lo siguiente:

- 1- Este trabajo ha resultado de gran importancia para el INRH Unión de Reyes, ya que la evaluación de la red hidráulica Unión, ha demostrado la necesidad de la puesta en marcha de una bomba con un caudal de entrega igual a 45 l/s, una carga hidrostática de 50 m, y una potencia de trabajo del motor eléctrico igual a 37,5 kW, la cual ha permitido garantizar el abasto de agua potable a un total de 1676 personas, contribuyendo a la satisfacción del cliente, y a la vez asegurar una vía de ingresos en divisas por concepto de reducción de los costos de producción.
- 2- El análisis del proceso inversionista realizado permite establecer que el costo alcanzó un valor de 1 214,1 CUC, donde la propuesta de inversión arroja como resultados que el ahorro de energía eléctrica anual es de 603,3 MWh., lo que reduce el importe de la factura eléctrica en 7 239,6 CUP. El tiempo de recuperación de la inversión es de 7 meses y 13 días, además los valores del VAN y el TIR son 24 226,7 CUP y 585 % respectivamente, por tanto la inversión debió ser realizada y se ha introducido en la práctica.
- 3- El análisis de las mediciones eléctricas realizadas después de la puesta en marcha de la inversión ha permitido establecer un ahorro, solamente en la jornada diurna del mes de puesta en marcha del bombeo intermedio, igual a 51,8 MWh. lo que equivale a una reducción en los costos de producción de 621,7 CUP mensualmente en dicha jornada.
- 4- Se ha establecido un procedimiento en la herramienta computacional TKsolver para futuras evaluaciones de la red, con el objetivo de garantizar de esta manera el correcto funcionamiento del sistema y su fiabilidad operacional.

## **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 la puesta en marcha del bombeo intermedio y un funcionamiento correcto y eficiente 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 algoritmo elaborado en TKsolver.
- 2- Se deben controlar los parámetros establecidos en este trabajo, como son, presión, gasto, consumo eléctrico, etc.; por parte de los encargados de la actividad debido a la influencia directa de la máquina sobre la calidad del servicio y el correcto funcionamiento de la red.
- 3- Dar cumplimiento a los planes de mantenimiento de la unidad para la prolongación de la vida útil de la misma.
- 4- 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.
- 5- 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, n° N°4 Julio (2007): 534-547.
- 9- Bird, R., et al. Fenómenos de transporte, 10<sup>ma</sup> 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, <sup>3RD</sup> 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](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](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, 9<sup>TH</sup> 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 edición 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/htlm.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/htlm>.

- 47- Iglesias Rey, Pedro L. et al, "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, 5<sup>th</sup> 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, 11<sup>TH</sup> 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 , Pardue 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, 9<sup>th</sup> 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, 3<sup>nd</sup> 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, 2<sup>nd</sup> 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, 13<sup>TH</sup> Edition (electronic), Oklahoma, 2007.

- 83- Zienkewicz, O. C. and Taylor, R. C., The finite element method, computational fluid dynamics, 7<sup>TH</sup> edition, ed: McGraw-Hill, New York, 2018
- 84- Ziew, Ling Wong, et all, Standard Civil Engineers Handbook. University of Colorado, 7<sup>TH</sup> edition, CRC Press, 2018.

Anexo 1 Coeficientes para la determinación pérdidas por accesorios.

Tabla 1.1 Coeficientes de pérdidas ocasionados por la entrada de una tubería introducida en un depósito.

$\delta$	$l/d$	0	0,005	0,01	0,015	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
$\geq 0,5$	1	1	0,95	0,88	0,79	0,72	0,62	0,55	0,5	0,41	0,36
0,4	0,95	0,87	0,81	0,76	0,68	0,57	0,53	0,5	-----	-----	-----
0,2	0,92	0,85	0,8	0,73	0,67	0,55	0,5	-----	-----	-----	-----
0,1	0,85	0,79	0,75	0,69	0,63	0,53	0,5	-----	-----	-----	-----
0,02	0,73	0,67	0,6	0,57	0,52	0,5	-----	-----	-----	-----	-----
0,005	0,63	0,59	0,56	0,53	0,5	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla 1.2 Coeficientes de pérdidas ocasionados por la entrada de un depósito a una tubería con borde cónico.

$l/d$	0,05	0,075	0,1	0,25	0,5	0,6	0,75	1,0	1,25	1,5	2
Caso 1	0,3	0,23	0,18	0,13	0,125	0,12	0,11	0,1	0,9	0,8	0,6
Caso 2	0,67	0,5	0,41	0,16	0,14	0,13	0,115	0,1	0,9	0,85	0,7

Tabla 1.3 Coeficientes de pérdidas ocasionados por la entrada de un depósito a una tubería con borde curvado.

$r/d$	0	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,16	0,20
Caso 1	0,5	0,26	0,19	0,15	0,12	0,09	0,06	0,03
Caso 2	1,0	0,5	0,32	0,20	0,15	0,10	-----	-----

Tabla 1.4 Coeficientes de pérdidas locales en un codo poligonal.

$\alpha$	30°	45°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	135°	140°	150°	160°	170°
$\xi$	15	10	3,5	2,15	1,5	1,17	0,92	0,57	0,52	0,4	0,32	0,3	0,19	0,11	0,05

Tabla 1.5 Coeficientes de pérdidas locales en codos dispuestos en cualquier ángulo.

$\alpha$	15	30	45	60	90	100	110	120	130	140	150	160	170	175
$\varepsilon$	0,25	0,45	0,63	0,78	1,0	1,08	1,12	1,15	1,2	1,23	1,27	1,3	1,35	1,4

Tabla 1.6 Coeficientes de pérdidas locales en conductos convergentes.

$\frac{(d/D)^2}{\alpha}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
10	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01
40	0,18	0,16	0,15	0,13	0,11	0,1	0,09	0,07
60	0,25	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13	0,11	0,1
90	0,35	0,3	0,28	0,25	0,22	0,2	0,18	0,15
120	0,42	0,38	0,35	0,31	0,28	0,25	0,22	0,18
180	0,47	0,45	0,38	0,35	0,31	0,28	0,25	0,22

Tabla 1.7 Coeficientes de pérdidas locales en conductos divergentes.

$\alpha$	2,5	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
$\beta$	0,18	0,13	0,16	0,27	0,43	0,81	1,41	1,21	1,12	1,08	1,03	1,0

Tabla 1.8 Coeficientes de pérdidas locales en válvulas de globo.

$\alpha$	0	10	20	30	40	50	60	65	82,5
$\xi$	0	0,29	1,56	5,47	17,3	52,6	206	486	-----

Tabla 1.9 Coeficientes de pérdidas locales en válvulas de compuerta.

$x/d$	0	$1/8$	$2/8$	$3/8$	$4/8$	$5/8$	$6/8$	$7/8$	1
$\frac{Ax}{x}$	1,0	0,948	0,856	0,74	0,609	0,466	0,315	0,159	0
$\xi$	0	0,07	0,26	0,81	2,06	5,52	17,0	97,8	$\infty$

Tabla 1.10 Coeficientes de pérdidas locales por ramificaciones para el ramal principal (separación de ramas).

$\alpha$												
$Q_1/Q$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0	
90	0,9	0,85	0,83	0,8	0,83	0,9	1,0	1,1	1,17	1,25	1,0	
60	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,5	0,55	0,6	0,7	0,75	1,0	
45	0,75	0,7	0,6	0,45	0,45	0,4	0,35	0,3	0,4	0,45	1,0	
30	0,7	0,65	0,5	0,35	0,35	0,3	0,25	0,2	0,35	0,4	1,0	

Tabla 1.11 Coeficientes de pérdidas locales por ramificaciones para el ramal secundario (separación de ramas).

		$\alpha$											
			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0
$Q_2/Q$	45-90	-0,05	-0,1	-0,05	0	0,08	0,1	0,15	0,2	0,3	0,38	0,08	
	30	-0,08	-0,15	-0,1	-0,05	0,05	0,08	0,1	0,15	0,2	0,3	0,05	

Tabla 1.12 Coeficientes de pérdidas locales por ramificaciones para el ramal derivado (Unión del flujo).

		$\alpha$											
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
$Q_1/Q$	90	-0,9	-0,7	-0,4	0	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0	1,1	
	60	-0,9	-0,7	-0,3	0	0,15	0,3	0,47	0,5	0,53	0,6	0,7	
	45	-0,9	-0,7	-0,4	-0,3	0	0,2	0,35	0,4	0,45	0,43	0,4	
	30	-0,9	-0,7	-0,5	-0,4	-0,2	0	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	

Tabla 1.13 Coeficientes de pérdidas locales por ramificaciones para el ramal principal (Unión del flujo).

		$\alpha$											
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
$Q_2/Q$	90	0	0,2	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6	0,65	0,6	0,55	0,5	
	60	0	0,18	0,3	0,35	0,38	0,38	0,35	0,3	0,2	0	-0,3	
	45	0	0,15	0,18	0,2	0,25	0,15	0,1	0	-0,15	-0,3	-0,6	
	30	0	0,1	0,15	0,18	0,1	0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,7	

Anexo 2 Figuras correspondientes a los distintos tipos de accesorios mencionados en el Capítulo 2.

Figura # 1.1 Entrada de una tubería introducida en un depósito

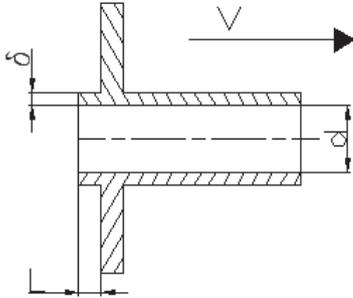


Figura # 1.2 Entrada de un depósito en ángulo

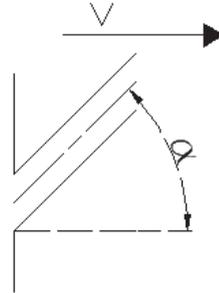


Figura #1.3 Entrada de un depósito a una tubería con borde cónico

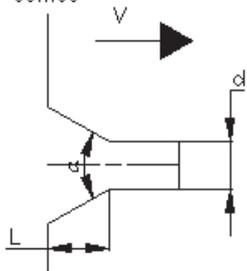


Figura #1.4 Entrada de un depósito a una tubería con borde curvado

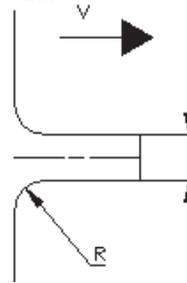


Figura #1.5 Codo poligonal

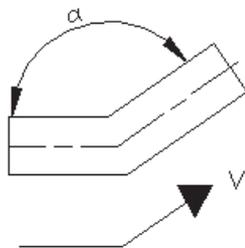


Figura #1.6 Codo de 90°

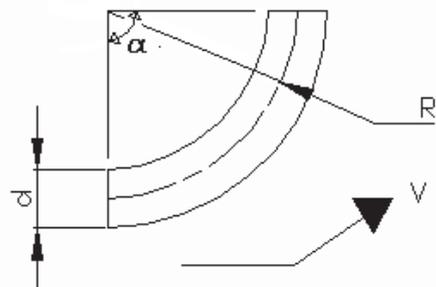


Figura #1.7 Conducto convergente

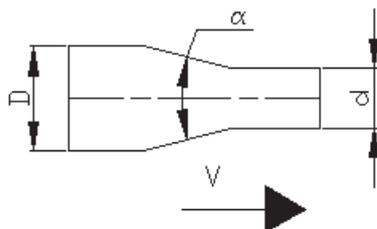
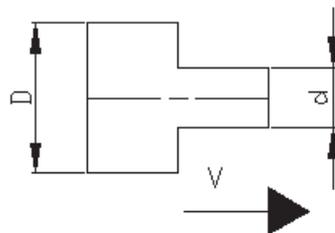


Figura #1.8 Contracción brusca



Anexo 2 Figuras correspondientes a los distintos tipos de accesorios mencionados en el Capítulo 2 (Cont.)

Figura #1.9 Conducto divergente

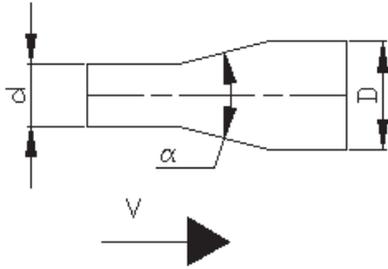


Figura #1.10 Expansión brusca

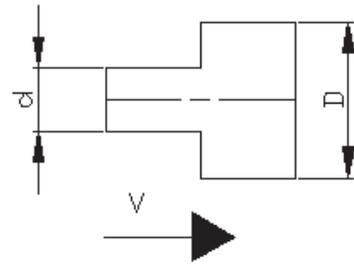


Figura #1.11 Diafragmas

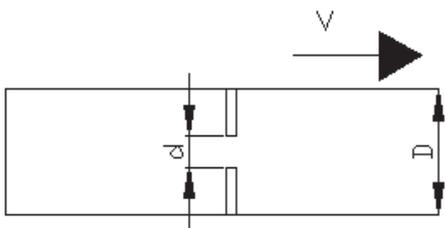


Figura #1.12 Válvulas de compuerta

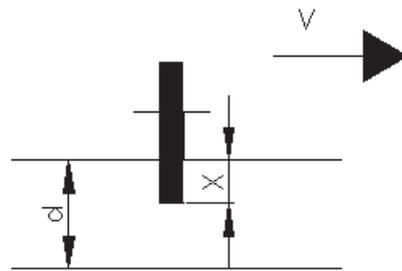


Figura #1.13 Válvulas de globo

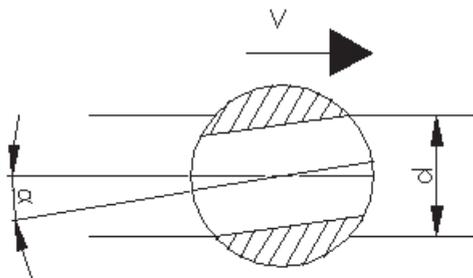


Figura #1.14 Ramificaciones (separación de ramas)

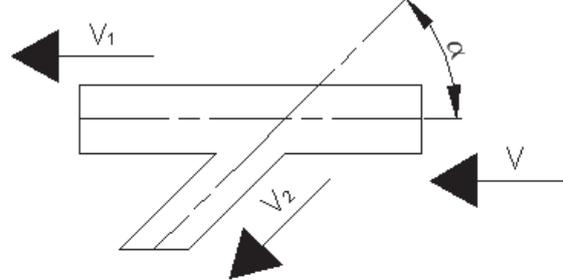
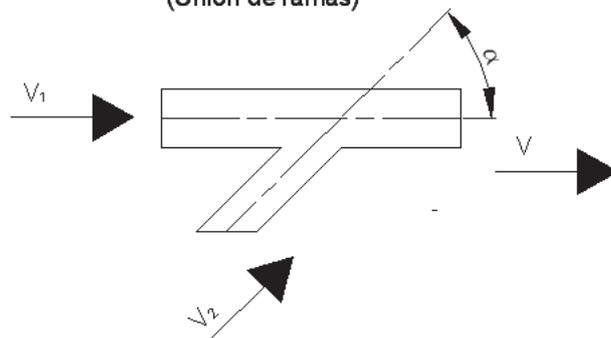


Figura #1.15 Ramificaciones (Unión de ramas)



Anexo 3 Características fundamentales de los circuitos principales de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes.

Tabla 3.1 Datos fundamentales 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

Tabla 4.2 Características fundamentales de las líneas de tuberías integrantes de la red de distribución hidráulica Unión de Reyes.

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			

### Anexo 4

Tabla 4.3 Pérdidas de carga por conductos en la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes.

ID Línea	Longitud	D	V	Pérd Unit.	f	codo 45	codo 120	codo 90	válvulas	uniones	separaciones	$\sum \xi$	K
	m	mm	m/s	m/km									
Tubería 1	120	250	1,12	8,21	0,0315					1	1	1,25	345,921
Tubería 2	76	250	0,99	6,4	0,0315					1	1	1,25	228,782
Tubería 3	82	250	0,89	5,19	0,0315					1	1	1,25	244,755
Tubería 4	102	200	0,69	4,23	0,0337					1	1	1,25	953,329
Tubería 5	68	100	1,29	36,64	0,0426					1	1	1,25	25000,590
Tubería 6	54	200	0,64	3,61	0,0337					1	1	1,25	535,094
Tubería 8	68	100	0,99	21,53	0,0426					1	1	1,25	25000,590
Tubería 9	60	100	0,66	9,66	0,0426					1	1	1,25	22180,903
Tubería 10	72	100	0,8	14,27	0,0426				1	1	1	1,716	26795,631
Tubería 11	70	100	0,64	9,18	0,0426				1	1	1	1,716	26090,709
Tubería 12	83	150	0,02	0	0,0371				1	1	1	1,716	3627,970
Tubería 13	100	100	0,77	13,22	0,0426				1	1	1	1,716	36664,533
Tubería 14	68	100	0,85	16,06	0,0426					1	1	1,25	25000,590
Tubería 15	66	100	0,64	9,05	0,0426					1	1	1,25	24295,668
Tubería 16	78	100	0,46	4,81	0,0426					1	1	1,25	28525,197
Tubería 17	78	100	0,47	5,04	0,0426					1	1	1,25	28525,197
Tubería 18	76	150	0,14	0,28	0,0371					1	1	1,25	3269,538
Tubería 19	60	200	0,87	6,61	0,0337					1	1	1,25	587,373
Tubería 20	40	200	0,63	3,51	0,0337			1	1	1	1	3,216	514,677
Tubería 21	96	100	0,93	19,04	0,0426				1	1	1	1,716	35254,690
Tubería 22	66	100	0,52	6,14	0,0426					1	1	1,25	24295,668
Tubería 23	162	150	0,83	8,86	0,0371					1	1	1,25	6738,324
Tubería 24	400	100	0,27	1,64	0,0426					1	1	1,25	142017,570

Tabla 4.3 Pérdidas de carga por conductos en la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (cont.)

	Longitud	D	V	Pérd Unit.	f	codó 45	codó 120	codó 90	válvulas	uniones	separaciones	$\sum \xi$	K
Tubería 26	80	100	0,26	1,57	0,0426					1	1	1,25	29230,119
Tubería 27	84	150	0,71	6,42	0,0371					1	1	1,25	3592,216
Tubería 28	36	100	0,55	6,75	0,0426					1	1	1,25	13721,845
Tubería 31	190	150	0,18	0,44	0,0371					1	1	1,25	7867,696
Tubería 32	100	100	0,26	1,55	0,0426					1	1	1,25	36279,335
Tubería 33	98	100	0,53	6,28	0,0426					1	1	1,25	35574,413
Tubería 25	100	100	0,53	6,28	0,0426					1	1	1,25	36279,335
Tubería 29	104	100	0,51	5,89	0,0426					1	1	1,25	37689,178
Tubería 30	74	100	0,27	1,67	0,0426					1	1	1,25	27115,354
Tubería 34	100	200	0,86	6,53	0,0337					1	1	1,25	935,903
Tubería 35	100	200	0,94	7,8	0,0337					1	1	1,25	935,903
Tubería 36	100	100	0,72	11,54	0,0426			1		1	1	1,716	36664,533
Tubería 39	122	100	0,35	2,85	0,0426					1	1	1,25	44033,472
Tubería 40	26	150	0,01	0	0,0371					1	1	1,25	1252,803
Tubería 41	100	100	0,48	5,16	0,0426					1	1	1,25	36279,335
Tubería 42	96	100	0,43	4,23	0,0426					1	1	1,25	34869,492
Tubería 43	100	150	0,31	1,29	0,0371					1	1	1,25	4237,572
Tubería 44	96	150	0,25	0,81	0,0371					1	1	1,25	4076,233
Tubería 45	70	100	0,71	11,15	0,0426				1	1	1	1,716	26090,709
Tubería 46	78	100	0,66	9,76	0,0426					1	1	1,25	28525,197
Tubería 47	100	100	0,25	1,47	0,0426					1	1	1,25	36279,335
Tubería 48	95	100	0,21	1,02	0,0426					1	1	1,25	34517,031
Tubería 49	98	100	0,3	2,03	0,0426					1	1	1,25	35574,413
Tubería 50	95	100	0,38	3,26	0,0426					1	1	1,25	34517,031

Tabla 4.3 Pérdidas de carga por conductos en la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (cont.)

	Longitud	D	V	Pérd Unit.	f	codó 45	codó 120	codó 90	válvulas	uniones	separaciones	$\sum \xi$	K
Tubería 51	26	100	0,55	6,76	0,0426					1	1	1,25	10197,237
Tubería 52	98	150	0,46	2,71	0,0371					1	1	1,25	4156,902
Tubería 53	95	100	0,48	5,12	0,0426					1	1	1,25	34517,031
Tubería 54	104	100	0,51	5,87	0,0426					1	1	1,25	37689,178
Tubería 55	114	100	0,47	4,92	0,0426					1	1	1,25	41213,786
Tubería 58	2410	250	1	6,77	0,0315					1	1	1,25	6442,463
Tubería 59	170	250	1	6,77	0,0315					1	1	1,25	479,033
Tubería 68	150	100	0,35	2,75	0,0426					1	1	1,25	53902,374
Tubería 69	60	100	0,42	4,05	0,0426					1	1	1,25	22180,903
Tubería 70	70	100	0,43	4,07	0,0426					1	1	1,25	25705,511
Tubería 71	100	75	0,37	4,63	0,0474		1			1	1	2,75	172311,906
Tubería 72	80	100	0,63	8,95	0,0426					1	1	1,25	29230,119
Tubería 73	100	200	0,16	0,23	0,0337					1	1	1,25	935,903
Tubería 74	52	100	0,5	5,67	0,0426	1				1	1	2,2	20146,492
Tubería 75	85	100	0,5	5,67	0,0426					1	1	1,25	30992,423
Tubería 76	80	100	0,63	8,95	0,0426					1	1	1,25	29230,119
Tubería 77	40	100	0,08	0,14	0,0426					1	1	1,25	15131,688
Tubería 78	70	100	0,21	1,01	0,0426					1	1	1,25	25705,511
Tubería 79	50	100	0,7	10,89	0,0426					1	1	1,25	18656,296
Tubería 80	60	100	0,7	10,93	0,0426					1	1	1,25	22180,903
Tubería 81	216	100	0	0	0,0426					1	1	1,25	77164,786
Tubería 82	30	100	0,13	0,41	0,0426	1				1	1	2,2	12392,355
Tubería 83	150	100	0,13	0,41	0,0426					1	1	1,25	53902,374
Tubería 84	56	100	0,43	4,22	0,0426					1	1	1,25	20771,060

Tabla 4.3 Pérdidas de carga por conductos en la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (cont.)

	Longitud	D	V	Pérd Unit.	f	codo 45	codo 120	codo 90	válvulas	uniones	separaciones	$\sum \xi$	K
Tubería 85	50	100	0,56	7,1	0,0426					1	1	1,25	18656,296
Tubería 86	30	100	0,29	1,88	0,0426					1	1	1,25	11607,080
Tubería 87	48	100	0,99	21,53	0,0426					1	1	1,25	17951,374
Tubería 88	120	150	0,38	1,92	0,0371					1	1	1,25	5044,266
Tubería 89	20	200	1,13	11,03	0,0337					1	1	1,25	238,843
Tubería 56	140	200	0,69	4,23	0,0337				1	1	1	1,716	1308,507
Tubería 57	120	200	0,57	2,91	0,0337					1	1	1,25	1110,168
Tubería 67	102	150	0,49	3,11	0,0371					1	1	1,25	4318,241
Tubería 90	102	100	0,44	4,34	0,0426					1	1	1,25	36984,256
Tubería 92	140	150	0,58	4,31	0,0371				1	1	1	1,716	5927,049
Tubería 93	120	150	0,38	1,86	0,0371					1	1	1,25	5044,266
Tubería 94	140	100	0,47	4,97	0,0426				1	1	1	1,716	50762,964
Tubería 95	120	100	0,34	2,6	0,0426					1	1	1,25	43328,550
Tubería 96	68	100	0,89	17,53	0,0426					1	1	1,25	25000,590
Tubería 98	40	150	0,72	6,61	0,0371					1	1	1,25	1817,489
Tubería 99	140	100	0,25	1,44	0,0426				1	1	1	1,716	50762,964
Tubería 100	100	100	0,36	2,93	0,0426					1	1	1,25	36279,335
Tubería 101	72	100	0,62	8,65	0,0426					1	1	1,25	26410,433
Tubería 102	54	100	0,76	12,76	0,0426					1	1	1,25	20066,139
Tubería 103	72	100	0,26	1,59	0,0426					1	1	1,25	26410,433
Tubería 104	100	100	0,49	5,32	0,0426			1	1	1	1	3,216	37904,440
Tubería 105	140	100	0,38	3,33	0,0426					1	1	1,25	50377,766
Tubería 106	72	100	0,85	15,88	0,0426					1	1	1,25	26410,433
Tubería 107	72	100	0,49	5,32	0,0426					1	1	1,25	26410,433

Tabla 4.3 Pérdidas de carga por conductos en la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (cont.)

	Longitud	D	V	Pérd Unit.	f	codo 45	codo 120	codo 90	válvulas	uniones	separaciones	$\sum \xi$	K
Tubería 108	100	100	0,77	13,21	0,0426					1	1	1,25	36279,335
Tubería 109	68	150	0,87	9,64	0,0371					1	1	1,25	2946,861
Tubería 110	110	150	0,44	2,55	0,0371					1	1	1,25	4640,919
Tubería 112	30	150	0,39	1,95	0,0371			1		1	1	2,75	1659,061
Tubería 113	40	150	0,39	1,95	0,0371					1	1	1,25	1817,489
Tubería 114	74	100	0,5	5,65	0,0426					1	1	1,25	27115,354
Tubería 115	80	200	0,62	3,34	0,0337					1	1	1,25	761,638
Tubería 116	205	150	0,76	7,33	0,0371				1	1	1	1,716	8548,805
Tubería 117	120	200	0,5	2,22	0,0337					1	1	1,25	1110,168
Tubería 118	84	150	0,61	4,8	0,0371				1	1	1	1,716	3668,305
Tubería 91	60	200	1,16	11,75	0,0337					1	1	1,25	587,373
Tubería 97	230	200	0,58	2,93	0,0337					1	1	1,25	2068,624
Tubería 120	70	100	0,48	5,2	0,0426					1	1	1,25	25705,511
Tubería 121	230	100	0,48	5,2	0,0426			1		1	1	2,75	83339,144
Tubería 122	70	100	0,76	12,67	0,0426					1	1	1,25	25705,511
Tubería 123	100	200	0,31	0,86	0,0337					1	1	1,25	935,903
Tubería 126	180	100	0,47	4,97	0,0426					1	1	1,25	64476,198
Tubería 127	120	100	0,28	1,85	0,0426					1	1	1,25	43328,550
Tubería 128	170	100	0,14	0,46	0,0426					1	1	1,25	60951,590
Tubería 129	50	100	0,15	0,5	0,0426					1	1	1,25	18656,296
Tubería 130	170	100	0,08	0,17	0,0426					1	1	1,25	60951,590
Tubería 131	50	100	0,06	0,1	0,0426					1	1	1,25	18656,296
Tubería 132	170	100	0,06	0,1	0,0426			1		1	1	2,75	62191,497
Tubería 133	50	100	0,06	0,1	0,0426			1		1	1	2,75	19896,203

Tabla 4.3 Pérdidas de carga por conductos en la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (cont.)

	Longitud	D	V	Pérd Unit.	f	codo 45	codo 120	codo 90	válvulas	uniones	separaciones	$\sum \xi$	K
Tubería 134	50	100	0,15	0,5	0,0426					1	1	1,25	18656,296
Tubería 135	50	100	0,19	0,81	0,0426					1	1	1,25	18656,296
Tubería 136	80	100	0,28	1,85	0,0426					1	1	1,25	29230,119
Tubería 137	80	250	1,68	18,27	0,0315					1	1	1,25	239,431
Tubería 139	186	100	0,2	0,95	0,0426		1			1	1	2,75	67830,870
Tubería 140	110	100	0,2	0,95	0,0426					1	1	1,25	39803,943
Tubería 141	54	100	0,2	0,97	0,0426		1			1	1	2,75	21306,046
Tubería 142	186	100	0	0	0,0426					1	1	1,25	66590,962
Tubería 144	52	100	0,42	4,02	0,0426			1	1	1	1	1,716	19746,415
Tubería 146	74	100	0,33	2,43	0,0426		1		1	1	1	3,216	28740,460
Tubería 148	120	150	0,13	0,25	0,0371					1	1	1,25	5044,266
Tubería 149	76	100	0,3	2,09	0,0426		1			1	1	2,75	29060,183
Tubería 150	120	150	0,07	0,07	0,0371					1	1	1,25	5044,266
Tubería 151	76	100	0,32	2,38	0,0426					1	1	1,25	27820,276
Tubería 152	172	100	0,3	2,04	0,0426					1	1	1,25	61656,511
Tubería 153	160	100	0,2	0,97	0,0426					1	1	1,25	57426,982
Tubería 154	40	150	0,05	0,04	0,0371					1	1	1,25	1817,489
Tubería 155	72	150	0,02	0	0,0371					1	1	1,25	3108,200
Tubería 156	120	150	0,04	0,03	0,0371		1			1	1	2,75	5289,186
Tubería 157	72	150	0,08	0,08	0,0371					1	1	1,25	3108,200
Tubería 158	120	150	0,04	0,02	0,0371					1	1	1,25	5044,266
Tubería 159	40	150	0,04	0,03	0,0371					1	1	1,25	1817,489
Tubería 145	146	100	0,33	2,43	0,0426		1		1	1	1	3,441	54303,622
Tubería 179	170	100	0,57	7,28	0,0426					1	1	1,25	60951,590

Tabla 4.3 Pérdidas de carga por conductos en la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (cont.)

	Longitud	D	V	Pérd Unit.	f	codo 45	codo 120	codo 90	válvulas	uniones	separaciones	$\sum \xi$	K
Tubería 180	146	100	0,33	2,43	0,0426					1	1	1,25	52492,531
Tubería 181	50	100	0,62	8,57	0,0426				1	1	1	1,716	19041,493
Tubería 182	50	100	0,62	8,57	0,0426					1	1	1,25	18656,296
Tubería 185	26	100	0,63	8,74	0,0426					1	1	1,25	10197,237
Tubería 186	30	100	0,63	8,74	0,0426				1	1	1	1,716	19031,468

Tabla 4.4 Caudales definitivos para cada rama integrante de la red de distribución hidráulica Unión de Reyes.

Rama	Q (l/s)	Rama	Q (l/s)	Rama	Q (l/s)
Tubería 1	54,16	Tubería 59	48,08	Tubería 115	19,05
Tubería 2	47,58	Tubería 60	48,08	Tubería 116	13,05
Tubería 3	42,82	Tubería 61	47,66	Tubería 117	15,37
Tubería 4	21,33	Tubería 62	33,33	Tubería 118	10,53
Tubería 5	9,91	Tubería 63	33,33	Tubería 91	35,28
Tubería 6	19,68	Tubería 64	33,33	Tubería 97	16,64
Tubería 8	7,58	Tubería 68	2,68	Tubería 119	20,23
Tubería 9	5,06	Tubería 69	3,25	Tubería 120	3,59
Tubería 10	6,16	Tubería 70	3,26	Tubería 121	3,59
Tubería 11	4,93	Tubería 71	1,6	Tubería 122	5,77
Tubería 12	0,32	Tubería 72	4,87	Tubería 123	9,36
Tubería 13	5,92	Tubería 73	4,87	Tubería 124	20,23
Tubería 14	6,54	Tubería 74	3,86	Tubería 126	3,59
Tubería 15	4,9	Tubería 75	3,86	Tubería 127	2,18
Tubería 16	3,55	Tubería 76	4,87	Tubería 128	1,07
Tubería 17	3,64	Tubería 77	0,58	Tubería 129	1,11
Tubería 18	2,49	Tubería 78	1,6	Tubería 130	0,62
Tubería 19	26,83	Tubería 79	5,37	Tubería 131	0,49
Tubería 20	19,52	Tubería 80	5,38	Tubería 132	0,49
Tubería 21	7,13	Tubería 81	0,01	Tubería 133	0,49
Tubería 22	4,02	Tubería 82	1	Tubería 134	1,11
Tubería 23	14,37	Tubería 83	1	Tubería 135	1,41
Tubería 24	2,06	Tubería 84	3,33	Tubería 136	2,18
Tubería 26	2,01	Tubería 85	4,33	Tubería 137	81
Tubería 27	12,21	Tubería 86	2,21	Tubería 125	20,23
Tubería 28	4,22	Tubería 87	7,58	Tubería 138	0,41
Tubería 31	3,11	Tubería 88	6,65	Tubería 37	23,88
Tubería 32	1,99	Tubería 89	34,57	Tubería 139	1,55

Tabla 4.4 Caudales definitivos para cada rama integrante de la red de distribución hidráulica Unión de Reyes (cont.)

Rama	Q (l/s)		Rama	Q (l/s)		Rama	Q (l/s)
Tubería 33	4,07		Tubería 56	21,33		Tubería 140	1,55
Tubería 25	4,07		Tubería 57	17,65		Tubería 141	1,57
Tubería 29	3,94		Tubería 67	8,46		Tubería 142	0,02
Tubería 30	2,07		Tubería 90	3,37		Tubería 144	3,24
Tubería 34	26,54		Tubería 92	9,98		Tubería 146	2,51
Tubería 35	29,04		Tubería 93	6,52		Tubería 148	2,33
Tubería 36	5,54		Tubería 94	3,61		Tubería 149	2,33
Tubería 39	2,72		Tubería 95	2,6		Tubería 150	1,18
Tubería 40	0,2		Tubería 96	6,83		Tubería 151	2,48
Tubería 41	3,68		Tubería 98	12,38		Tubería 152	2,3
Tubería 42	3,33		Tubería 99	1,92		Tubería 153	1,57
Tubería 43	5,41		Tubería 100	2,76		Tubería 154	0,88
Tubería 44	4,26		Tubería 101	4,78		Tubería 155	0,26
Tubería 45	5,44		Tubería 102	5,82		Tubería 156	0,69
Tubería 46	5,09		Tubería 103	2,02		Tubería 157	1,3
Tubería 47	1,94		Tubería 104	3,74		Tubería 158	0,61
Tubería 48	1,61		Tubería 105	2,94		Tubería 159	0,69
Tubería 49	2,29		Tubería 106	6,5		Tubería 145	2,51
Tubería 50	2,92		Tubería 107	3,74		Tubería 179	4,38
Tubería 51	4,23		Tubería 108	5,92		Tubería 180	2,51
Tubería 52	7,89		Tubería 109	14,98		Tubería 181	4,76
Tubería 53	3,67		Tubería 110	7,64		Tubería 182	4,76
Tubería 54	3,93		Tubería 112	6,68		Tubería 185	4,81
Tubería 55	3,6		Tubería 113	6,68		Tubería 186	4,81
Tubería 58	48,08		Tubería 114	3,86			

Tabla 4.5 Pérdidas de carga definitivas para cada rama integrante de la red de distribución hidráulica Unión de Reyes.

<b>Nodo</b>	<b>Carga (m)</b>						
Nodo 2	19,2	Nodo 28	17,11	Nodo 56	14,64	Nodo 82	13,13
Nodo 3	18,76	Nodo 29	17,29	Nodo 57	14,04	Nodo 83	10,44
Nodo 4	18,37	Nodo 30	13,3	Nodo 58	16,03	Nodo 85	13,28
Nodo 5	19,72	Nodo 31	14,58	Nodo 59	16,01	Nodo 86	13,52
Nodo 6	19,58	Nodo 32	15,78	Nodo 60	13,04	Nodo 87	13,54
Nodo 7	17,97	Nodo 33	16,41	Nodo 36	17,91	Nodo 88	13,55
Nodo 8	17,92	Nodo 34	16,77	Nodo 62	17,65	Nodo 89	13,57
Nodo 9	17,91	Nodo 35	16,77	Nodo 63	17,48	Nodo 90	13,58
Nodo 10	17,92	Nodo 1	21,5	Nodo 64	17,36	Nodo 91	13,6
Nodo 12	18,12	Nodo 37	21,94	Nodo 65	16,22	Nodo 93	40,37
Nodo 13	17,48	Nodo 38	23,8	Nodo 66	16,88	Nodo 95	17,33
Nodo 14	16,69	Nodo 39	24,89	Nodo 67	15,37	Nodo 97	17,54
Nodo 15	16,28	Nodo 41	40,31	Nodo 68	16,74	Nodo 98	17,48
Nodo 16	15,19	Nodo 42	23,82	Nodo 69	15,65	Nodo 99	17,44
Nodo 17	17,57	Nodo 43	26,24	Nodo 70	13,58	Nodo 100	17,32
Nodo 18	17,33	Nodo 44	39,9	Nodo 71	15,27	Nodo 101	17,19
Nodo 19	16,02	Nodo 46	13,31	Nodo 72	15,89	Nodo 102	17,21
Nodo 20	15,63	Nodo 47	16,46	Nodo 73	16,88	Nodo 103	16,83
Nodo 21	14,97	Nodo 48	15,94	Nodo 75	16,89	Nodo 104	16,14
Nodo 22	20,11	Nodo 49	15,16	Nodo 76	17,48	Nodo 105	17,33
Nodo 23	16,83	Nodo 50	14,04	Nodo 77	13,43	Nodo 106	17,33
Nodo 11	16,69	Nodo 51	13,77	Nodo 78	13,2	Nodo 107	17,33
Nodo 24	14,19	Nodo 52	15,13	Nodo 61	12,39	Nodo 108	17,33
Nodo 25	15,04	Nodo 53	14,35	Nodo 79	11,85	Nodo 96	14,78
Nodo 26	15,87	Nodo 54	13,84	Nodo 80	11,46	Nodo 109	18,33
Nodo 27	16,52	Nodo 55	13,76	Nodo 81	12,15	Nodo 110	17

Anexo 5 Balance inicial de caudales por nodos para la evaluación de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (Cont.).

Nodo 22	
Expresión de equilibrio nodal	$Q = q1 + q19$
Rama	Caudales iniciales ( $l/s$ )
Rama 1	47,503
Rama 19	33,496
Entrada bombeo	81

Nodo 2	
Expresión de equilibrio nodal	$q1 = q2 + q13 + 0,66$
Rama	Caudales iniciales ( $l/s$ )
Rama 1	47,503
Rama 2	36.542
Rama 13	10.301

La diferencia de 0,66 l/s en el nodo 2 es consumido por la Fábrica de hielo Municipal,

Nodo 3	
Expresión de equilibrio nodal	$q2 = q181 + q3$
Rama	Caudales iniciales ( $l/s$ )
Rama 2	36.542
Rama 181	14.538
Rama 3	22.004

Nodo 4	
Expresión de equilibrio nodal	$q3 = q56 + q4 + 0,16$
Rama	Caudales iniciales ( $l/s$ )
Rama 3	22.004
Rama 4	-3.130
Rama 56	24.974

La diferencia de 0,16 l/s en el nodo 3 es consumido por el Organopónico Juan Ávila,

Nodo 10	
Expresión de equilibrio nodal	$q4 = q5 + q92 + q12 + 1,12$
Rama	Caudales iniciales ( $l/s$ )
Rama 5	14.213
Rama 4	-3.130
Rama 92	14.170
Rama 12	-32.633

La diferencia de 1,12 l/s en el nodo 10 es consumido por la recirculación de este nodo.

Nodo 16	
Expresión de equilibrio nodal	$q6 = q10 + q94 + q5$
Rama	Caudales iniciales ( $l/s$ )
Rama 5	14.213
Rama 6	22.844
Rama 10	2.196
Rama 94	6.435

Anexo 5 Balance inicial de caudales por nodos para la evaluación de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (Cont.).

Nodo 21	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{34} = q_{11} + q_{99} + q_6$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 99	-6.100
Rama 6	22.844
Rama 11	0.525
Rama 34	17.269

Nodo 24	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{34} = q_{35} + q_{105} - q_{45}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 34	17.269
Rama 35	8.862
Rama 105	5.282
Rama 45	-3.124

Nodo 25	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{41} = q_{45} + q_{42} - q_{46}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 41	-0.943
Rama 42	5.515
Rama 46	3.334
Rama 45	-3.124

Nodo 20	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{16} = q_{41} + q_{11} - q_9$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 16	3.832
Rama 11	0.525
Rama 9	-4.250
Rama 41	-0.943

Nodo 9	
Expresión de equilibrio nodal	$q_8 = q_{18} + q_{181} + q_{12}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 8	-6.503
Rama 18	11.592
Rama 181	14.538
Rama 12	-32.633

Nodo 15	
Expresión de equilibrio nodal	$q_8 = q_9 + q_{10} - q_{17}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 8	-6.503
Rama 9	-4.250
Rama 10	2.196
Rama 17	4.449

Anexo 5 Balance inicial de caudales por nodos para la evaluación de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (Cont.).

Nodo 26	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{43} = q_{46} + q_{44} - q_{54}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 43	5.624
Rama 46	3.334
Rama 44	6.893
Rama 54	4.603

Nodo 19	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{25} = q_{43} + q_{16} - q_{15}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 25	4.713
Rama 43	5.624
Rama 16	3.832
Rama 15	4.742

Nodo 14	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{32} = q_{17} + q_{15} - q_{14}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 32	3.086
Rama 17	4.449
Rama 15	4.742
Rama 14	6.105

Nodo 8	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{13} = q_{18} + q_{14} - q_{131}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 13	10.301
Rama 18	11.592
Rama 14	6.105
Rama 131	0.597

Nodo 11	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{30} = q_{25} + q_{47} - q_{29}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 30	1,778
Rama 25	4,714
Rama 47	1,974
Rama 29	4,909

Nodo 68	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{98} = q_{114} + q_{104} + q_{101}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 98	14,919
Rama 114	6,092
Rama 104	4,725
Rama 101	4,101

Anexo 5 Balance inicial de caudales por nodos para la evaluación de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (Cont.).

Nodo 108	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{156} = q_{159}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 156	0,992
Rama 159	0,992

Nodo 13	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{24} = q_{33} + q_{26} - q_{22}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 24	2,996
Rama 33	4,865
Rama 26	0,814
Rama 22	2,683

Nodo 46	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{68} = q_{135} + q_{88} - q_{80}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 68	3,453
Rama 135	1,237
Rama 88	9,116
Rama 80	6,9

Nodo 62	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{57} = q_{110} + q_{67} + q_{139}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 57	21,319
Rama 110	13,379
Rama 139	2,158
Rama 67	8,781

Nodo 76	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{110} = q_{179} + q_{142} + q_{144}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 179	8,812
Rama 110	13,379
Rama 142	0,073
Rama 144	4,496

Nodo 95	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{149} = q_{155} - q_{150} + q_{144}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 149	3,223
Rama 155	0,323
Rama 150	1,596
Rama 144	4,496

Anexo 5 Balance inicial de caudales por nodos para la evaluación de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (Cont.).

Nodo 65	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{96} = q_{102} + q_{94} + q_{95}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 96	8,385
Rama 102	4,951
Rama 94	6,435
Rama 95	3,001

Nodo 6	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{20} = q_{23} + 5,15$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 20	23,236
Rama 23	18,086

La diferencia de 5,15 l/s en el nodo 6 es consumido por la recirculación de este nodo.

Nodo 70	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{117} = q_{106} + q_{108} + q_{105}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 117	25,161
Rama 106	9,953
Rama 108	9,926
Rama 105	5,282

Nodo 67	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{102} = q_{108} + q_{99} - q_{103}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 108	9,926
Rama 102	4,951
Rama 99	-6,1
Rama 103	-1,126

Nodo 71	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{106} = q_{100} + q_{107}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 106	9,953
Rama 100	5,228
Rama 107	4,725

Nodo 36	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{90} = q_{56} + q_{57} + 0,3$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 90	3,354
Rama 56	24,974
Rama 57	21,319

La diferencia de 0,3 l/s en el nodo 36 es consumido por la recirculación de este nodo.

Anexo 5 Balance inicial de caudales por nodos para la evaluación de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (Cont.).

Nodo 63	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{90} = q_{93} + q_{96} - q_{92}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 90	3,354
Rama 93	9,139
Rama 96	8,385
Rama 92	14,17

Nodo 78	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{115} = q_{116} + q_{117} - q_{123}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 115	32,493
Rama 116	18,631
Rama 117	25,161
Rama 123	11,299

Nodo 85	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{126} = q_{127} + q_{135}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 126	3,992
Rama 127	2,755
Rama 135	1,237

Nodo 86	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{127} = q_{128} + q_{129}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 127	2,755
Rama 128	1,356
Rama 129	1,398

Nodo 90	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{134} = q_{133} + q_{130}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 134	1,398
Rama 133	0,596
Rama 130	0,801

Nodo 91	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{136} = q_{134} + q_{128}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 136	2,755
Rama 134	1,398
Rama 128	1,356

Anexo 5 Balance inicial de caudales por nodos para la evaluación de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (Cont.).

Nodo 55	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{136} = q_{78} + q_{77}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 136	2,755
Rama 78	2,216
Rama 77	0,538

Nodo 51	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{69} = q_{68} + q_{77}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 69	3,992
Rama 68	3,453
Rama 77	0,538

Nodo 50	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{70} = q_{81} + q_{69}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 70	4,874
Rama 81	0,882
Rama 69	3,992

.Nodo 53	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{72} = q_{71} + q_{70}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 72	7,09
Rama 71	2,216
Rama 70	4,874

.Nodo 57	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{80} = q_{81} + q_{79}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 79	6,018
Rama 80	6,9
Rama 81	0,882

.Nodo 98	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{140} = q_{141} - q_{142}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 140	2,158
Rama 141	2,23
Rama 142	0,071

Anexo 5 Balance inicial de caudales por nodos para la evaluación de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (Cont.).

.Nodo 106	
Expresión de equilibrio nodal	$q153 = q154 + q156$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 153	2,23
Rama 154	1,237
Rama 156	0,993

.Nodo 105	
Expresión de equilibrio nodal	$q154 = q155 + q158$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 155	0,323
Rama 154	1,237
Rama 158	0,913

.Nodo 107	
Expresión de equilibrio nodal	$q151 = q150 + q157$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 157	1,906
Rama 150	1,596
Rama 151	3,503

.Nodo 101	
Expresión de equilibrio nodal	$q186 = q146 + q152$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 186	6,726
Rama 146	4,041
Rama 152	2,684

.Nodo 103	
Expresión de equilibrio nodal	$q186 = q148 + q151$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 186	6,726
Rama 148	3,223
Rama 151	3,503

.Nodo 73	
Expresión de equilibrio nodal	$q118 = q113 + q114$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 118	14,589
Rama 113	8,497
Rama 114	6,092

Anexo 5 Balance inicial de caudales por nodos para la evaluación de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (Cont.).

.Nodo 102	
Expresión de equilibrio nodal	$q149 = q148$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 149	3,223
Rama 148	3,223

.Nodo 104	
Expresión de equilibrio nodal	$q146 = q145$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 146	4,041
Rama 145	4,041

.Nodo 82	
Expresión de equilibrio nodal	$q123 = q121 + 122$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 123	11,299
Rama 121	4,128
Rama 122	7,171

.Nodo 79	
Expresión de equilibrio nodal	$q119 = q120 + q97$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 119	20,23
Rama 120	4,128
Rama 97	16,101

.Nodo 77	
Expresión de equilibrio nodal	$q116 = q145 + q118$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 116	18,631
Rama 145	4,041
Rama 118	14,589

.Nodo 75	
Expresión de equilibrio nodal	$q113 = q179 + q152$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 152	2,684
Rama 179	5,812
Rama 113	8,497

.Nodo 72	
Expresión de equilibrio nodal	$q107 = q107$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 104	4,725
Rama 107	4,725

Anexo 5 Balance inicial de caudales por nodos para la evaluación de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (Cont.).

.Nodo 29	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{52} = q_{51} + q_{53}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 52	8,933
Rama 51	5,226
Rama 53	3,707

.Nodo 58	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{85} = q_{84} + q_{83}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 85	6,608
Rama 84	1,074
Rama 83	5,533

.Nodo 30	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{89} = q_{35} + q_{36}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 89	16,327
Rama 35	8,862
Rama 36	7,465

.Nodo 31	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{36} = q_{86} + q_{42}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 36	7,465
Rama 86	1,95
Rama 42	5,515

.Nodo 32	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{87} = q_{44} + q_{84}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 87	7,968
Rama 44	6,893
Rama 84	1,074

.Nodo 33	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{85} = q_{39} + q_{48}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 85	6,608
Rama 39	4,496
Rama 48	2,111

Anexo 5 Balance inicial de caudales por nodos para la evaluación de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (Cont.).

.Nodo 34	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{50} = q_{40} + q_{39}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 50	2,346
Rama 40	-2,149
Rama 39	4,496

.Nodo 35	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{74} = q_{40} + q_{53}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 74	1,557
Rama 40	-2,149
Rama 53	3,707

.Nodo 12	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{23} = q_{27} + q_{24} + 0,1$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 23	18,086
Rama 27	14,99
Rama 24	2,996

La diferencia de 0,1 l/s en el nodo 12 es consumido por la recirculación de este nodo.

.Nodo 17	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{27} = q_{52} + q_{28} + 0,1$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 28	5,956
Rama 27	14,99
Rama 52	8,933

La diferencia de 0,1 l/s en el nodo 17 es consumido por la recirculación de este nodo.

.Nodo 18	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{28} = q_{29} + q_{49} - q_{26}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 28	5,956
Rama 29	4,909
Rama 49	1,861
Rama 26	0,814

.Nodo 23	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{33} = q_{32} + q_{30}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 33	4,865
Rama 32	3,086
Rama 30	1,778

Anexo 5 Balance inicial de caudales por nodos para la evaluación de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (Cont.).

.Nodo 27	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{47} = q_{54} + q_{48} - q_{55}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 47	1,974
Rama 54	4,603
Rama 48	2,111
Rama 55	4,741

.Nodo 28	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{51} = q_{55} + q_{50} - q_{49}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 51	5,226
Rama 55	4,741
Rama 50	2,346
Rama 49	1,861

.Nodo 56	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{87} = q_{79} + q_{86}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 87	7,968
Rama 79	6,018
Rama 86	1,95

.Nodo 66	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{109} = q_{95} + q_{98}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 109	17,92
Rama 95	3,001
Rama 98	14,919

.Nodo 7	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{21} = q_{22} + q_{31}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 21	10,079
Rama 22	2,683
Rama 31	7,396

.Nodo 69	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{101} = q_{100} + q_{103}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 101	4,101
Rama 100	5,228
Rama 103	-1,126

Anexo 5 Balance inicial de caudales por nodos para la evaluación de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (Cont.).

.Nodo 87	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{129} = q_{130} + q_{131}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 129	1,398
Rama 130	0,801
Rama 131	0,596

.Nodo 64	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{109} = q_{93} + q_{67}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 109	17,92
Rama 93	9,139
Rama 67	8,781

.Nodo 49	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{76} = q_{74} + q_{83}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 76	7,09
Rama 74	1,557
Rama 83	5,533

.Nodo 5	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{19} = q_{20} + q_{21} + 0,18$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 19	33,496
Rama 20	23,236
Rama 21	10,079

La diferencia de 0,18 L/s en el nodo 5 es consumida por el Centro de Elaboración de Alimentos Municipal

.Nodo 81	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{120} = q_{121}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 120	4,128
Rama 121	4,128

.Nodo 54	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{120} = q_{121}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 120	4,128
Rama 121	4,128

Anexo 5 Balance inicial de caudales por nodos para la evaluación de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (Cont.).

.Nodo 54	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{120} = q_{121}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 120	4,128
Rama 121	4,128

.Nodo 52	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{76} = q_{72}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 76	7,09
Rama 72	7,09

.Nodo 88	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{131} = q_{132}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 131	0,596
Rama 132	0,596

.Nodo 89	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{133} = q_{132}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 133	0,596
Rama 132	0,596

.Nodo 97	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{139} = q_{140}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 139	2,158
Rama 140	2,158

.Nodo 99	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{141} = q_{153}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 141	2,301
Rama 153	2,301

.Nodo 54	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{71} = q_{78}$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 71	2,216
Rama 78	2,216

Anexo 6 Balance inicial de caudales por nodos para la evaluación de la red de distribución hidráulica del poblado Unión de Reyes (Cont.).

.Nodo 79	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{119} = Q - 60,77$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 119	20,23
Caudal inicial	81

La diferencia de 60,77 L/s en el nodo 79 es la sumatoria de los caudales de recirculación en todos los nodos internos de la red para lograr el equilibrio del sistema

.Nodo 61	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{97} = q_{126} + q_{122} + q_{91} - 28$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 97	16,101
Rama 126	3,992
Rama 122	7,171
Rama 91	32,937

La diferencia de 28 l/s en el nodo 61 es consumido por la recirculación de este nodo.

.Nodo 60	
Expresión de equilibrio nodal	$q_{91} = q_{89} + q_{88} + q_{115} - 25$
Rama	Caudales iniciales $\left(\frac{l}{s}\right)$
Rama 91	32,937
Rama 89	16,327
Rama 88	9,116
Rama 115	32,493

La diferencia de 25 l/s en el nodo 60 es consumido por la recirculación de este nodo.

Anexo 6 Sistema de ecuaciones para efectuar el balanceo de las mallas integrantes de la red hidráulica del poblado Unión de Reyes

Corrección para la malla I.

$$\Delta L_I = - \left[ \frac{K_{19}Q_{19}^2 + K_{21}Q_{21}^2 + K_{31}Q_{31}^2 - K_1Q_1^2 - K_{13}Q_{13}^2}{2[K_{19}Q_{19} + K_{21}Q_{21} + K_{31}Q_{31} + K_1Q_1 + K_{13}Q_{13}]} \right] \quad (6.1)$$

Corrección para la malla II.

$$\Delta L_{II} = - \left[ \frac{-K_2Q_2^2 + K_{13}Q_{13}^2 + K_{18}Q_{18}^2 - K_{181}Q_{181}^2}{2[K_2Q_2 + K_{13}Q_{13} + K_{18}Q_{18} + K_{181}Q_{181}]} \right] \quad (6.2)$$

Corrección para la malla III.

$$\Delta L_{III} = - \left[ \frac{-K_3Q_3^2 - K_4Q_4^2 - K_{12}Q_{12}^2 + K_{181}Q_{181}^2}{2[K_3Q_3 + K_4Q_4 + K_{163}Q_{163} + K_{181}Q_{181}]} \right] \quad (6.3)$$

Corrección para la malla IV.

$$\Delta L_{IV} = - \left[ \frac{K_{92}Q_{92}^2 + K_4Q_4^2 - K_{90}Q_{90}^2 - K_{56}Q_{56}^2}{2[K_{92}Q_{92} + K_4Q_4 + K_{90}Q_{90} + K_{56}Q_{56}]} \right] \quad (6.4)$$

Corrección para la malla V.

$$\Delta L_V = - \left[ \frac{K_{93}Q_{93}^2 - K_{57}Q_{57}^2 + K_{90}Q_{90}^2 + K_{67}Q_{67}^2}{2[K_{93}Q_{93} + K_{57}Q_{57} + K_{90}Q_{90} + K_{67}Q_{67}]} \right] \quad (6.5)$$

Corrección para la malla VI.

$$\Delta L_{VI} = - \left[ \frac{-K_{93}Q_{93}^2 - K_{109}Q_{109}^2 - K_{95}Q_{95}^2 + K_{96}Q_{96}^2}{2[K_{93}Q_{93} + K_{109}Q_{109} + K_{95}Q_{95} + K_{96}Q_{96}]} \right] \quad (6.6)$$

Corrección para la malla VII.

$$\Delta L_{VII} = - \left[ \frac{K_5Q_5^2 - K_{94}Q_{94}^2 - K_{92}Q_{92}^2 - K_{96}Q_{96}^2}{2[K_5Q_5 + K_{94}Q_{94} + K_{92}Q_{92} + K_{96}Q_{96}]} \right] \quad (6.7)$$

Corrección para la malla VIII.

$$\Delta L_{VIII} = - \left[ \frac{-K_5Q_5^2 + K_8Q_8^2 + K_{10}Q_{10}^2 + K_{12}Q_{12}^2}{2[K_5Q_5 + K_8Q_8 + K_{10}Q_{10} + K_{12}Q_{12}]} \right] \quad (6.8)$$

Corrección para la malla IX.

$$\Delta L_{IX} = - \left[ \frac{-K_{18}Q_{18}^2 - K_8Q_8^2 + K_{17}Q_{17}^2 + K_{14}Q_{14}^2}{2[K_{18}Q_{18} + K_8Q_8 + K_{17}Q_{17} + K_{14}Q_{14}]} \right] \quad (6.9)$$

Corrección para la malla X.

$$\Delta L_X = - \left[ \frac{K_{32}Q_{32}^2 + K_{33}Q_{33}^2 + K_{22}Q_{22}^2 - K_{14}Q_{14}^2 - K_{31}Q_{31}^2}{2[K_{32}Q_{32} + K_{33}Q_{33} + K_{22}Q_{22} + K_{14}Q_{14} + K_{31}Q_{31}]} \right] \quad (6.10)$$

Corrección para la malla XI.

$$\Delta L_{XI} = - \left[ \frac{K_{20}Q_{20}^2 + K_{23}Q_{23}^2 - K_{22}Q_{22}^2 + K_{24}Q_{24}^2 - K_{21}Q_{21}^2}{2[K_{20}Q_{20} + K_{23}Q_{23} + K_{22}Q_{22} + K_{24}Q_{24} + K_{21}Q_{21}]} \right] \quad (6.11)$$

Corrección para la malla XII.

$$\Delta L_{XII} = - \left[ \frac{K_{27}Q_{27}^2 + K_{28}Q_{28}^2 - K_{26}Q_{26}^2 - K_{24}Q_{24}^2}{2[K_{27}Q_{27} + K_{28}Q_{28} + K_{26}Q_{26} + K_{24}Q_{24}]} \right] \quad (6.12)$$

Corrección para la malla XIII.

$$\Delta L_{XIII} = - \left[ \frac{K_{29}Q_{29}^2 - K_{30}Q_{30}^2 + K_{26}Q_{26}^2 - K_{33}Q_{33}^2}{2[K_{29}Q_{29} + K_{30}Q_{30} + K_{26}Q_{26} + K_{33}Q_{33}]} \right] \quad (6.13)$$

Corrección para la malla XIV.

$$\Delta L_{XIV} = - \left[ \frac{K_{25}Q_{25}^2 - K_{32}Q_{32}^2 + K_{30}Q_{30}^2 - K_{15}Q_{15}^2}{2[K_{25}Q_{25} + K_{32}Q_{32} + K_{30}Q_{30} + K_{15}Q_{15}]} \right] \quad (6.14)$$

Corrección para la malla XV.

$$\Delta L_{XV} = - \left[ \frac{-K_9Q_9^2 - K_{17}Q_{17}^2 + K_{16}Q_{16}^2 + K_{15}Q_{15}^2}{2[K_9Q_9 + K_{17}Q_{17} + K_{16}Q_{16} + K_{15}Q_{15}]} \right] \quad (6.15)$$

Corrección para la malla XVI.

$$\Delta L_{XVI} = - \left[ \frac{K_9Q_9^2 - K_{10}Q_{10}^2 + K_{11}Q_{11}^2 - K_6Q_6^2}{2[K_9Q_9 + K_{10}Q_{10} + K_{11}Q_{11} + K_6Q_6]} \right] \quad (6.16)$$

Corrección para la malla XVII.

$$\Delta L_{XVII} = - \left[ \frac{K_6Q_6^2 - K_{102}Q_{102}^2 + K_{94}Q_{94}^2 - K_{99}Q_{99}^2}{2[K_6Q_6 + K_{102}Q_{102} + K_{94}Q_{94} + K_{99}Q_{99}]} \right] \quad (6.17)$$

Corrección para la malla XVIII.

$$\Delta L_{XVIII} = - \left[ \frac{K_{95}Q_{95}^2 + K_{102}Q_{102}^2 - K_{98}Q_{98}^2 - K_{101}Q_{101}^2 - K_{103}Q_{103}^2}{2[K_{95}Q_{95} + K_{102}Q_{102} + K_{98}Q_{98} + K_{101}Q_{101} + K_{103}Q_{103}]} \right] \quad (6.18)$$

Corrección para la malla XIX.

$$\Delta L_{XIX} = - \left[ \frac{K_{100}Q_{100}^2 - K_{104}Q_{104}^2 + K_{101}Q_{101}^2 - K_{107}Q_{107}^2}{2[K_{100}Q_{100} + K_{104}Q_{104} + K_{101}Q_{101} + K_{107}Q_{107}]} \right] \quad (6.19)$$

Corrección para la malla XX.

$$\Delta L_{XX} = - \left[ \frac{-K_{100}Q_{100}^2 - K_{106}Q_{106}^2 + K_{103}Q_{103}^2 + K_{108}Q_{108}^2}{2[K_{100}Q_{100} + K_{106}Q_{106} + K_{103}Q_{103} + K_{108}Q_{108}]} \right] \quad (6.20)$$

Corrección para la malla XXI.

$$\Delta L_{XXI} = - \left[ \frac{K_{34}Q_{34}^2 + K_{99}Q_{99}^2 + K_{105}Q_{105}^2 - K_{108}Q_{108}^2}{2[K_{34}Q_{34} + K_{99}Q_{99} + K_{105}Q_{105} + K_{108}Q_{108}]} \right] \quad (6.21)$$

Corrección para la malla XXII.

$$\Delta L_{XXII} = - \left[ \frac{-K_{34}Q_{34}^2 - K_{11}Q_{11}^2 + K_{45}Q_{45}^2 + K_{41}Q_{41}^2}{2[K_{34}Q_{34} + K_{11}Q_{11} + K_{45}Q_{45} + K_{41}Q_{41}]} \right] \quad (6.22)$$

Corrección para la malla XXIII.

$$\Delta L_{XXIII} = - \left[ \frac{-K_{16}Q_{16}^2 + K_{43}Q_{43}^2 + K_{46}Q_{46}^2 - K_{41}Q_{41}^2}{2[K_{16}Q_{16} + K_{43}Q_{43} + K_{46}Q_{46} + K_{41}Q_{41}]} \right] \quad (6.23)$$

Corrección para la malla XXIV.

$$\Delta L_{XXIV} = - \left[ \frac{K_{54}Q_{54}^2 - K_{43}Q_{43}^2 + K_{47}Q_{47}^2 - K_{25}Q_{25}^2}{2[K_{54}Q_{54} + K_{43}Q_{43} + K_{47}Q_{47} + K_{25}Q_{25}]} \right] \quad (6.24)$$

Corrección para la malla XXV.

$$\Delta L_{XXV} = - \left[ \frac{K_{49}Q_{49}^2 + K_{55}Q_{55}^2 - K_{47}Q_{47}^2 - K_{29}Q_{29}^2}{2[K_{49}Q_{49} + K_{55}Q_{55} + K_{47}Q_{47} + K_{29}Q_{29}]} \right] \quad (6.25)$$

Corrección para la malla XXVI.

$$\Delta L_{XXVI} = - \left[ \frac{-K_{49}Q_{49}^2 - K_{28}Q_{28}^2 + K_{51}Q_{51}^2 + K_{52}Q_{52}^2}{2[K_{49}Q_{49} + K_{28}Q_{28} + K_{51}Q_{51} + K_{52}Q_{52}]} \right] \quad (6.26)$$

Corrección para la malla XXVII.

$$\Delta L_{XXVII} = - \left[ \frac{K_{53}Q_{53}^2 - K_{40}Q_{40}^2 - K_{51}Q_{51}^2 - K_{50}Q_{50}^2}{2[K_{53}Q_{53} + K_{40}Q_{40} + K_{51}Q_{51} + K_{50}Q_{50}]} \right] \quad (6.27)$$

Corrección para la malla XXVIII.

$$\Delta L_{XXVIII} = - \left[ \frac{-K_{55}Q_{55}^2 - K_{48}Q_{48}^2 + K_{39}Q_{39}^2 + K_{50}Q_{50}^2}{2[K_{55}Q_{55} + K_{48}Q_{48} + K_{39}Q_{39} + K_{50}Q_{50}]} \right] \quad (6.28)$$

Corrección para la malla XXIX.

$$\Delta L_{XXIX} = - \left[ \frac{K_{84}Q_{84}^2 + K_{85}Q_{85}^2 + K_{48}Q_{48}^2 - K_{44}Q_{44}^2 - K_{54}Q_{54}^2}{2[K_{84}Q_{84} + K_{85}Q_{85} + K_{48}Q_{48} + K_{44}Q_{44} + K_{54}Q_{54}]} \right] \quad (6.29)$$

Corrección para la malla XXX.

$$\Delta L_{XXX} = - \left[ \frac{-K_{46}Q_{46}^2 - K_{42}Q_{42}^2 + K_{86}Q_{86}^2 + K_{44}Q_{44}^2 + K_{87}Q_{87}^2}{2[K_{46}Q_{46} + K_{42}Q_{42} + K_{86}Q_{86} + K_{44}Q_{44} + K_{87}Q_{87}]} \right] \quad (6.30)$$

Corrección para la malla XXXI.

$$\Delta L_{XXXI} = - \left[ \frac{K_{36}Q_{36}^2 - K_{35}Q_{35}^2 - K_{45}Q_{45}^2 + K_{42}Q_{42}^2}{2[K_{36}Q_{36} + K_{35}Q_{35} + K_{45}Q_{45} + K_{42}Q_{42}]} \right] \quad (6.31)$$

Corrección para la malla XXXII.

$$\Delta L_{XXXII} = - \left[ \frac{-K_{117}Q_{117}^2 - K_{105}Q_{105}^2 - K_{115}Q_{115}^2 + K_{89}Q_{89}^2 + K_{35}Q_{35}^2}{2[K_{117}Q_{117} + K_{105}Q_{105} + K_{115}Q_{115} + K_{89}Q_{89} + K_{35}Q_{35}]} \right] \quad (6.32)$$

Corrección para la malla XXXIII.

$$\Delta L_{XXXIII} = - \left[ \frac{-K_{114}Q_{114}^2 - K_{118}Q_{118}^2 - K_{116}Q_{116}^2 + K_{117}Q_{117}^2 + K_{106}Q_{106}^2 + K_{104}Q_{104}^2 + K_{107}Q_{107}^2}{2[K_{114}Q_{114} + K_{118}Q_{118} + K_{116}Q_{116} + K_{117}Q_{117} + K_{106}Q_{106} + K_{104}Q_{104} + K_{107}Q_{107}]} \right] \quad (6.33)$$

Corrección para la malla XXXIV.

$$\Delta L_{XXXIV} = - \left[ \frac{-K_{123}Q_{123}^2 - K_{122}Q_{122}^2 + K_{91}Q_{91}^2 + K_{115}Q_{115}^2}{2[K_{123}Q_{123} + K_{122}Q_{122} + K_{91}Q_{91} + K_{115}Q_{115}]} \right] \quad (6.34)$$

Corrección para la malla XXXV.

$$\Delta L_{XXXV} = - \left[ \frac{-K_{121}Q_{121}^2 + K_{122}Q_{122}^2 - K_{120}Q_{120}^2 + K_{97}Q_{97}^2}{2[K_{121}Q_{121} + K_{122}Q_{122} + K_{120}Q_{120} + K_{97}Q_{97}]} \right] \quad (6.35)$$

Corrección para la malla XXXVI.

$$\Delta L_{XXXVI} = - \left[ \frac{-K_{88}Q_{88}^2 - K_{91}Q_{91}^2 + K_{126}Q_{126}^2 + K_{135}Q_{135}^2}{2[K_{88}Q_{88} + K_{91}Q_{91} + K_{126}Q_{126} + K_{135}Q_{135}]} \right] \quad (6.36)$$

Corrección para la malla XXXVII.

$$\Delta L_{XXXVII} = - \left[ \frac{-K_{89}Q_{89}^2 - K_{36}Q_{36}^2 - K_{86}Q_{86}^2 + K_{79}Q_{79}^2 + K_{80}Q_{80}^2 + K_{88}Q_{88}^2}{2[K_{89}Q_{89} + K_{36}Q_{36} + K_{86}Q_{86} + K_{79}Q_{79} + K_{80}Q_{80} + K_{88}Q_{88}]} \right] \quad (6.37)$$

Corrección para la malla XXXVIII.

$$\Delta L_{XXXVIII} = - \left[ \frac{-K_{84}Q_{84}^2 - K_{87}Q_{87}^2 - K_{79}Q_{79}^2 + K_{81}Q_{81}^2 + K_{70}Q_{70}^2 + K_{72}Q_{72}^2 + K_{76}Q_{76}^2 + K_{83}Q_{83}^2}{2[K_{84}Q_{84} + K_{87}^*Q_{87} + K_{79}Q_{79} + K_{81}Q_{81} + K_{72}Q_{72} + K_{76}Q_{76} + K_{70}Q_{70} + K_{83}Q_{83}]} \right] \quad (6.38)$$

Corrección para la malla IXL.

$$\Delta L_{IXL} = - \left[ \frac{-K_{83}Q_{83}^2 - K_{85}Q_{85}^2 - K_{39}Q_{39}^2 + K_{40}Q_{40}^2 + K_{74}Q_{74}^2}{2[K_{83}Q_{83} + K_{85}Q_{85} + K_{39}Q_{39} + K_{40}Q_{40} + K_{74}Q_{74}]} \right] \quad (6.39)$$

Corrección para la malla XL.

$$\Delta L_{XL} = - \left[ \frac{-K_{80}Q_{80}^2 - K_{81}Q_{81}^2 + K_{69}Q_{69}^2 + K_{68}Q_{68}^2}{2[K_{80}Q_{80} + K_{81}Q_{81} + K_{69}Q_{69} + K_{68}Q_{68}]} \right] \quad (6.40)$$

Corrección para la malla XLI.

$$\Delta L_{XLI} = - \left[ \frac{-K_{69}Q_{69}^2 - K_{77}Q_{77}^2 - K_{70}Q_{70}^2 + K_{71}Q_{71}^2 + K_{78}Q_{78}^2}{2[K_{69}Q_{69} + K_{77}Q_{77} + K_{70}Q_{70} + K_{71}Q_{71} + K_{78}Q_{78}]} \right] \quad (6.41)$$

Corrección para la malla XLII.

$$\Delta L_{XLII} = - \left[ \frac{K_{136}Q_{136}^2 + K_{128}Q_{128}^2 + K_{127}Q_{127}^2 + K_{77}Q_{77}^2 - K_{135}Q_{135}^2 - K_{68}Q_{68}^2}{2[K_{136}Q_{136} + K_{128}Q_{128} + K_{127}Q_{127} + K_{77}Q_{77} + K_{135}Q_{135} + K_{68}Q_{68}]} \right] \quad (6.42)$$

Corrección para la malla XLIII.

$$\Delta L_{XLIII} = - \left[ \frac{K_{134}Q_{134}^2 + K_{130}Q_{130}^2 + K_{129}Q_{129}^2 - K_{128}Q_{128}^2}{2[K_{134}Q_{134} + K_{130}Q_{130} + K_{129}Q_{129} + K_{128}Q_{128}]} \right] \quad (6.43)$$

Corrección para la malla XLIV.

$$\Delta L_{XLIV} = - \left[ \frac{K_{132}Q_{132}^2 - K_{130}Q_{130}^2 + K_{131}Q_{131}^2 + K_{133}Q_{133}^2}{2[K_{132}Q_{132} + K_{130}Q_{130} + K_{131}Q_{131} + K_{133}Q_{133}]} \right] \quad (6.44)$$

Corrección para la malla XLV.

$$\Delta L_{XLV} = - \left[ \frac{-K_{146}Q_{146}^2 - K_{145}Q_{145}^2 + K_{152}Q_{152}^2 + K_{113}Q_{113}^2 + K_{118}Q_{118}^2}{2[K_{146}Q_{146} + K_{145}Q_{145} + K_{152}Q_{152} + K_{113}Q_{113} + K_{118}Q_{118}]} \right] \quad (6.45)$$

Corrección para la malla XLVI.

$$\Delta L_{XLVI} = - \left[ \frac{-K_{179}Q_{179}^2 - K_{113}Q_{113}^2 - K_{110}Q_{110}^2 + K_{114}Q_{114}^2 + K_{98}Q_{98}^2 + K_{109}Q_{109}^2 - K_{67}Q_{67}^2}{2[K_{179}Q_{179} + K_{113}Q_{113} + K_{110}Q_{110} + K_{114}Q_{114} + K_{98}Q_{98} + K_{109}Q_{109} + K_{67}Q_{67}]} \right] \quad (6.46)$$

Corrección para la malla XLVII.

$$\Delta L_{XLVII} = - \left[ \frac{-K_{186}Q_{186}^2 - K_{152}Q_{152}^2 + K_{179}Q_{179}^2 - K_{148}Q_{148}^2 - K_{144}Q_{144}^2 - K_{149}Q_{149}^2}{2[K_{186}Q_{186} + K_{152}Q_{152} + K_{179}Q_{179} + K_{148}Q_{148} + K_{144}Q_{144} + K_{149}Q_{149}]} \right] \quad (6.47)$$

Corrección para la malla XLVIII.

$$\Delta L_{XLVIII} = - \left[ \frac{K_{110}Q_{110}^2 + K_{142}Q_{142}^2 - K_{140}Q_{140}^2 - K_{139}Q_{139}^2}{2[K_{110}Q_{110} + K_{142}Q_{142} + K_{140}Q_{140} + K_{139}Q_{139}]} \right] \quad (6.48)$$

Corrección para la malla IL.

$$\Delta L_{IL} = - \left[ \frac{K_{144}Q_{144}^2 - K_{155}Q_{155}^2 - K_{154}Q_{154}^2 - K_{153}Q_{153}^2 - K_{141}Q_{141}^2 - K_{142}Q_{142}^2}{2[K_{144}Q_{144} + K_{155}Q_{155} + K_{154}Q_{154} + K_{153}Q_{153} + K_{141}Q_{141} + K_{142}Q_{142}]} \right] \quad (6.49)$$

Corrección para la malla L.

$$\Delta L_L = - \left[ \frac{K_{149} Q_{149}^2 + K_{148} Q_{148}^2 - K_{150} Q_{150}^2 - K_{151} Q_{151}^2}{2[K_{149} Q_{149} + K_{148} Q_{148} + K_{150} Q_{150} + K_{151} Q_{151}]} \right] \quad (6.50)$$

Corrección para la malla LI.

$$\Delta L_{LI} = - \left[ \frac{K_{155} Q_{155}^2 - K_{157} Q_{157}^2 + K_{150} Q_{150}^2 - K_{158} Q_{158}^2}{2[K_{155} Q_{155} + K_{157} Q_{157} + K_{150} Q_{150} + K_{158} Q_{158}]} \right] \quad (6.51)$$

Corrección para la malla LII.

$$\Delta L_{LII} = - \left[ \frac{K_{154} Q_{154}^2 - K_{159} Q_{159}^2 - K_{156} Q_{156}^2 + K_{158} Q_{158}^2}{2[K_{154} Q_{154} + K_{159} Q_{159} + K_{156} Q_{156} + K_{158} Q_{158}]} \right] \quad (6.52)$$

Anexo 7 Ecuaciones para efectuar las correcciones a los caudales inicialmente asumidos en la evaluación de la red hidráulica del poblado Unión de Reyes.

$$Q_1'' = Q_1 - \Delta L_I \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 1} \quad (8.1)$$

$$Q_2'' = Q_2 - \Delta L_{II} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 2} \quad (8.2)$$

$$Q_3'' = Q_3 - \Delta L_{III} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 3} \quad (8.3)$$

$$Q_4'' = Q_4 - \Delta L_{III} + \Delta L_{IV} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 4} \quad (8.4)$$

$$Q_5'' = Q_5 - \Delta L_{VIII} + \Delta L_{VII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 5} \quad (8.5)$$

$$Q_6'' = Q_6 - \Delta L_{XVI} + \Delta L_{XVII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 6} \quad (8.6)$$

$$Q_8'' = Q_8 - \Delta L_{IX} + \Delta L_{VIII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 8} \quad (8.7)$$

$$Q_9'' = Q_9 - \Delta L_{XV} + \Delta L_{XVI} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 9} \quad (8.8)$$

$$Q_{10}'' = Q_{10} - \Delta L_{XVI} + \Delta L_{VIII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 10} \quad (8.9)$$

$$Q_{11}'' = Q_{11} - \Delta L_{XII} + \Delta L_{XVI} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 11} \quad (8.10)$$

$$Q_{12}'' = Q_{12} - \Delta L_{III} + \Delta L_{VIII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 12} \quad (8.11)$$

$$Q_{13}'' = Q_{13} - \Delta L_I + \Delta L_{II} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 13} \quad (8.12)$$

$$Q_{14}'' = Q_{14} - \Delta L_X + \Delta L_{IX} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 14} \quad (8.13)$$

$$Q_{15}'' = Q_{15} - \Delta L_{XIV} + \Delta L_{XV} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 15} \quad (8.14)$$

$$Q_{16}'' = Q_{16} - \Delta L_{XXIII} + \Delta L_{XV} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 16} \quad (8.15)$$

$$Q_{17}'' = Q_{17} - \Delta L_{XV} + \Delta L_{IX} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 17} \quad (8.16)$$

$$Q_{18}'' = Q_{13} - \Delta L_{IX} + \Delta L_{II} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 18} \quad (8.17)$$

$$Q_{19}'' = Q_{19} + \Delta L_I \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 19} \quad (8.18)$$

$$Q_{20}'' = Q_{20} + \Delta L_{XI} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 20} \quad (8.19)$$

$$Q_{21}'' = Q_{21} - \Delta L_{XI} + \Delta L_I \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 21} \quad (8.20)$$

$$Q_{22}'' = Q_{22} - \Delta L_{XI} + \Delta L_X \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 22} \quad (8.21)$$

$$Q_{23}'' = Q_{23} + \Delta L_{XI} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 23} \quad (8.22)$$

$$Q_{24}'' = Q_{24} - \Delta L_{XII} + \Delta L_{XI} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 24} \quad (8.23)$$

$$Q_{25}'' = Q_{25} - \Delta L_{XXIV} + \Delta L_{XIV} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 25} \quad (8.24)$$

$$Q_{26}'' = Q_{26} - \Delta L_{XII} + \Delta L_{XIII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 26} \quad (8.25)$$

$$Q_{27}'' = Q_{27} + \Delta L_{XII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 27} \quad (8.26)$$

$$Q_{28}'' = Q_{28} - \Delta L_{XXVI} + \Delta L_{XII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 28} \quad (8.27)$$

$$Q_{29}'' = Q_{29} - \Delta L_{XXV} + \Delta L_{XIII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 29} \quad (8.28)$$

$$Q_{30}'' = Q_{30} - \Delta L_{XIII} + \Delta L_{XIV} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 30} \quad (8.29)$$

$$Q_{31}'' = Q_{31} - \Delta L_X + \Delta L_I \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 31} \quad (8.30)$$

$$Q_{32}'' = Q_{32} - \Delta L_{XIV} + \Delta L_X \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 32} \quad (8.31)$$

$$Q_{33}'' = Q_{33} - \Delta L_{XIII} + \Delta L_X \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 33} \quad (8.32)$$

$$Q_{34}'' = Q_{34} - \Delta L_{XXII} + \Delta L_{XXI} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 34} \quad (8.33)$$

Anexo 7 Ecuaciones para efectuar las correcciones a los caudales inicialmente asumidos en la evaluación de la red hidráulica del poblado Unión de Reyes (cont.)

$Q_{35}'' = Q_{35} - \Delta L_{XXXI} + \Delta L_{XXXII}$	Corrección para el caudal en la rama 35	(8.34)
$Q_{36}'' = Q_{36} - \Delta L_{XXXVII} + \Delta L_{XXXI}$	Corrección para el caudal en la rama 36	(8.35)
$Q_{39}'' = Q_{39} - \Delta L_{IXL} + \Delta L_{XXVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 39	(8.36)
$Q_{40}'' = Q_{40} - \Delta L_{XXXVII} + \Delta L_{IXL}$	Corrección para el caudal en la rama 40	(8.37)
$Q_{41}'' = Q_{41} - \Delta L_{XXXIII} + \Delta L_{XXII}$	Corrección para el caudal en la rama 41	(8.38)
$Q_{42}'' = Q_{42} - \Delta L_{XXX} + \Delta L_{XXXI}$	Corrección para el caudal en la rama 42	(8.39)
$Q_{43}'' = Q_{43} - \Delta L_{XXXIV} + \Delta L_{XXXIII}$	Corrección para el caudal en la rama 43	(8.40)
$Q_{44}'' = Q_{44} - \Delta L_{XXXIX} + \Delta L_{XXX}$	Corrección para el caudal en la rama 44	(8.41)
$Q_{45}'' = Q_{45} - \Delta L_{XXXI} + \Delta L_{XXII}$	Corrección para el caudal en la rama 45	(8.42)
$Q_{46}'' = Q_{46} - \Delta L_{XXX} + \Delta L_{XXXIII}$	Corrección para el caudal en la rama 46	(8.43)
$Q_{47}'' = Q_{47} - \Delta L_{XXV} + \Delta L_{XXIV}$	Corrección para el caudal en la rama 47	(8.44)
$Q_{48}'' = Q_{48} - \Delta L_{XXVIII} + \Delta L_{IXXX}$	Corrección para el caudal en la rama 48	(8.55)
$Q_{49}'' = Q_{49} - \Delta L_{XXVI} + \Delta L_{XXV}$	Corrección para el caudal en la rama 49	(8.56)
$Q_{50}'' = Q_{50} - \Delta L_{XXXVII} + \Delta L_{XXVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 50	(8.57)
$Q_{51}'' = Q_{51} - \Delta L_{XXXVII} + \Delta L_{XXVI}$	Corrección para el caudal en la rama 51	(8.58)
$Q_{52}'' = Q_{52} + \Delta L_{XXVI}$	Corrección para el caudal en la rama 52	(8.59)
$Q_{53}'' = Q_{53} + \Delta L_{XXVII}$	Corrección para el caudal en la rama 53	(8.60)
$Q_{54}'' = Q_{54} - \Delta L_{IXXX} + \Delta L_{XXIV}$	Corrección para el caudal en la rama 54	(8.61)
$Q_{55}'' = Q_{55} - \Delta L_{XXVIII} + \Delta L_{XXV}$	Corrección para el caudal en la rama 55	(8.62)
$Q_{56}'' = Q_{56} - \Delta L_{IV}$	Corrección para el caudal en la rama 56	(8.63)
$Q_{57}'' = Q_{57} - \Delta L_V$	Corrección para el caudal en la rama 57	(8.64)
$Q_{67}'' = Q_{67} - \Delta L_{XLVI} + \Delta L_V$	Corrección para el caudal en la rama 67	(8.65)
$Q_{68}'' = Q_{68} - \Delta L_{XLII} + \Delta L_{XL}$	Corrección para el caudal en la rama 68	(8.66)
$Q_{69}'' = Q_{69} - \Delta L_{XLI} + \Delta L_{XL}$	Corrección para el caudal en la rama 69	(8.67)
$Q_{70}'' = Q_{70} - \Delta L_{XLI} + \Delta L_{XXXVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 70	(8.68)
$Q_{71}'' = Q_{71} + \Delta L_{XLI}$	Corrección para el caudal en la rama 71	(8.69)
$Q_{72}'' = Q_{72} + \Delta L_{XXXVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 72	(8.70)
$Q_{74}'' = Q_{74} + \Delta L_{IXL}$	Corrección para el caudal en la rama 74	(8.71)
$Q_{75}'' = Q_{75} + \Delta L_{IXL}$	Corrección para el caudal en la rama 75	(8.72)
$Q_{76}'' = Q_{76} + \Delta L_{XXXVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 76	(8.73)
$Q_{77}'' = Q_{77} - \Delta L_{XLI} + \Delta L_{XLII}$	Corrección para el caudal en la rama 77	(8.74)
$Q_{78}'' = Q_{78} + \Delta L_{XLI}$	Corrección para el caudal en la rama 78	(8.75)
$Q_{79}'' = Q_{79} - \Delta L_{XXXVIII} + \Delta L_{XXXVII}$	Corrección para el caudal en la rama 79	(8.76)

Anexo 7 Ecuaciones para efectuar las correcciones a los caudales inicialmente asumidos en la evaluación de la red hidráulica del poblado Unión de Reyes (cont.)

$Q_{80}'' = Q_{80} - \Delta L_{XL} + \Delta L_{XXXVII}$	Corrección para el caudal en la rama 80	(8.77)
$Q_{81}'' = Q_{81} - \Delta L_{XL} + \Delta L_{XXXVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 81	(8.78)
$Q_{83}'' = Q_{83} - \Delta L_{IXL} + \Delta L_{XXXVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 83	(8.79)
$Q_{84}'' = Q_{84} - \Delta L_{XXXVIII} + \Delta L_{XXIX}$	Corrección para el caudal en la rama 84	(8.80)
$Q_{85}'' = Q_{85} - \Delta L_{IXL} + \Delta L_{XXIX}$	Corrección para el caudal en la rama 85	(8.81)
$Q_{86}'' = Q_{86} - \Delta L_{XXXVII} + \Delta L_{XXX}$	Corrección para el caudal en la rama 86	(8.82)
$Q_{87}'' = Q_{87} - \Delta L_{XXXVIII} + \Delta L_{XXX}$	Corrección para el caudal en la rama 87	(8.83)
$Q_{88}'' = Q_{88} - \Delta L_{XXXVI} + \Delta L_{XXXVII}$	Corrección para el caudal en la rama 88	(8.84)
$Q_{89}'' = Q_{89} - \Delta L_{XXXVII} + \Delta L_{XXXII}$	Corrección para el caudal en la rama 89	(8.85)
$Q_{90}'' = Q_{90} - \Delta L_{IV} + \Delta L_V$	Corrección para el caudal en la rama 90	(8.86)
$Q_{91}'' = Q_{91} - \Delta L_{XXXIV} + \Delta L_{XXXVI}$	Corrección para el caudal en la rama 91	(8.87)
$Q_{92}'' = Q_{92} - \Delta L_{VII} + \Delta L_{IV}$	Corrección para el caudal en la rama 92	(8.88)
$Q_{93}'' = Q_{93} - \Delta L_{VI} + \Delta L_V$	Corrección para el caudal en la rama 93	(8.89)
$Q_{94}'' = Q_{94} - \Delta L_{VII} + \Delta L_{XVII}$	Corrección para el caudal en la rama 94	(8.90)
$Q_{95}'' = Q_{95} - \Delta L_{VI} + \Delta L_{XVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 95	(8.91)
$Q_{96}'' = Q_{96} - \Delta L_{VII} + \Delta L_{VI}$	Corrección para el caudal en la rama 96	(8.92)
$Q_{97}'' = Q_{97} - \Delta L_{XXXV}$	Corrección para el caudal en la rama 97	(8.93)
$Q_{98}'' = Q_{98} - \Delta L_{XVIII} + \Delta L_{XLVI}$	Corrección para el caudal en la rama 98	(8.94)
$Q_{99}'' = Q_{99} - \Delta L_{XVII} + \Delta L_{XXI}$	Corrección para el caudal en la rama 99	(8.95)
$Q_{100}'' = Q_{100} - \Delta L_{XX} + \Delta L_{IXX}$	Corrección para el caudal en la rama 100	(8.96)
$Q_{101}'' = Q_{101} - \Delta L_{XVIII} + \Delta L_{IXX}$	Corrección para el caudal en la rama 101	(8.97)
$Q_{102}'' = Q_{102} - \Delta L_{XVII} + \Delta L_{XVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 102	(8.98)
$Q_{103}'' = Q_{103} - \Delta L_{XVIII} + \Delta L_{XX}$	Corrección para el caudal en la rama 103	(8.99)
$Q_{104}'' = Q_{104} - \Delta L_{IXX} + \Delta L_{XXXIII}$	Corrección para el caudal en la rama 104	(8.100)
$Q_{105}'' = Q_{105} - \Delta L_{XXXII} + \Delta L_{XXI}$	Corrección para el caudal en la rama 105	(8.101)
$Q_{106}'' = Q_{106} - \Delta L_{XX} + \Delta L_{XXXIII}$	Corrección para el caudal en la rama 106	(8.102)
$Q_{107}'' = Q_{107} - \Delta L_{IXX} + \Delta L_{XXXIII}$	Corrección para el caudal en la rama 107	(8.103)
$Q_{108}'' = Q_{108} - \Delta L_{XXI} + \Delta L_{XX}$	Corrección para el caudal en la rama 108	(8.104)
$Q_{109}'' = Q_{109} - \Delta L_{VI} + \Delta L_{XLVI}$	Corrección para el caudal en la rama 109	(8.105)
$Q_{110}'' = Q_{110} - \Delta L_{XLVI} + \Delta L_{XLVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 110	(8.106)
$Q_{113}'' = Q_{113} - \Delta L_{XLVI} + \Delta L_{XLV}$	Corrección para el caudal en la rama 113	(8.107)
$Q_{114}'' = Q_{114} - \Delta L_{XXXIII} + \Delta L_{XLVI}$	Corrección para el caudal en la rama 114	(8.108)
$Q_{115}'' = Q_{115} - \Delta L_{XXXII} + \Delta L_{XXXIV}$	Corrección para el caudal en la rama 115	(8.109)

Anexo # 8 Sistema de ecuaciones para efectuar las correcciones a los caudales inicialmente asumidos en la evaluación de la red hidráulica del poblado Unión de Reyes

(cont.)

$Q_{116}'' = Q_{116} - \Delta L_{XXXIII}$	Corrección para el caudal en la rama 116	(8.110)
$Q_{117}'' = Q_{117} - \Delta L_{XXXII} + \Delta L_{XXXIII}$	Corrección para el caudal en la rama 117	(8.111)
$Q_{118}'' = Q_{118} - \Delta L_{XXXIII} + \Delta L_{XLV}$	Corrección para el caudal en la rama 118	(8.112)
$Q_{120}'' = Q_{120} - \Delta L_{XXXV}$	Corrección para el caudal en la rama 120	(8.113)
$Q_{121}'' = Q_{121} - \Delta L_{XXXV}$	Corrección para el caudal en la rama 121	(8.114)
$Q_{122}'' = Q_{122} - \Delta L_{XXXIV} + \Delta L_{XXXV}$	Corrección para el caudal en la rama 122	(8.115)
$Q_{123}'' = Q_{123} - \Delta L_{IXL}$	Corrección para el caudal en la rama 123	(8.116)
$Q_{126}'' = Q_{126} + \Delta L_{XXXVI}$	Corrección para el caudal en la rama 126	(8.117)
$Q_{127}'' = Q_{127} + \Delta L_{XLII}$	Corrección para el caudal en la rama 127	(8.118)
$Q_{128}'' = Q_{128} - \Delta L_{XLIII} + \Delta L_{XLII}$	Corrección para el caudal en la rama 128	(8.119)
$Q_{129}'' = Q_{129} + \Delta L_{XLIII}$	Corrección para el caudal en la rama 129	(8.120)
$Q_{130}'' = Q_{130} - \Delta L_{XLIV} + \Delta L_{XLIII}$	Corrección para el caudal en la rama 130	(8.121)
$Q_{131}'' = Q_{131} + \Delta L_{XLIV}$	Corrección para el caudal en la rama 131	(8.122)
$Q_{132}'' = Q_{132} + \Delta L_{XLIV}$	Corrección para el caudal en la rama 132	(8.123)
$Q_{133}'' = Q_{133} + \Delta L_{XLIV}$	Corrección para el caudal en la rama 133	(8.124)
$Q_{134}'' = Q_{134} + \Delta L_{XLIII}$	Corrección para el caudal en la rama 134	(8.125)
$Q_{135}'' = Q_{135} - \Delta L_{XLII} + \Delta L_{XXXVI}$	Corrección para el caudal en la rama 135	(8.126)
$Q_{136}'' = Q_{136} + \Delta L_{XLII}$	Corrección para el caudal en la rama 136	(8.127)
$Q_{139}'' = Q_{139} - \Delta L_{XLVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 139	(8.128)
$Q_{140}'' = Q_{140} - \Delta L_{XLVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 140	(8.129)
$Q_{141}'' = Q_{141} - \Delta L_{IL}$	Corrección para el caudal en la rama 141	(8.130)
$Q_{142}'' = Q_{142} - \Delta L_{IL} + \Delta L_{XLVIII}$	Corrección para el caudal en la rama 142	(8.131)
$Q_{144}'' = Q_{144} - \Delta L_{XLVII} + \Delta L_{IL}$	Corrección para el caudal en la rama 144	(8.132)
$Q_{145}'' = Q_{145} - \Delta L_{XLV}$	Corrección para el caudal en la rama 145	(8.133)
$Q_{146}'' = Q_{146} - \Delta L_{XLV}$	Corrección para el caudal en la rama 146	(8.134)
$Q_{148}'' = Q_{148} - \Delta L_{XLVII} + \Delta L_L$	Corrección para el caudal en la rama 148	(8.135)
$Q_{149}'' = Q_{149} + \Delta L_L - \Delta L_{XLVII}$	Corrección para el caudal en la rama 149	(8.136)
$Q_{150}'' = Q_{150} - \Delta L_L + \Delta L_{LI}$	Corrección para el caudal en la rama 150	(8.137)
$Q_{151}'' = Q_{151} - \Delta L_L$	Corrección para el caudal en la rama 151	(8.138)
$Q_{152}'' = Q_{152} - \Delta L_{XLVII} + \Delta L_{XLV}$	Corrección para el caudal en la rama 152	(8.139)
$Q_{153}'' = Q_{153} - \Delta L_{IL}$	Corrección para el caudal en la rama 153	(8.140)
$Q_{154}'' = Q_{154} - \Delta L_{IL} + \Delta L_{LII}$	Corrección para el caudal en la rama 154	(8.141)
$Q_{155}'' = Q_{155} - \Delta L_{IL} + \Delta L_{LI}$	Corrección para el caudal en la rama 155	(8.142)

Anexo # 8 Sistema de ecuaciones para efectuar las correcciones a los caudales inicialmente asumidos en la evaluación de la red hidráulica del poblado Unión de Reyes  
(cont.)

$$Q_{156}'' = Q_{156} - \Delta L_{LII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 156} \quad (8.143)$$

$$Q_{157}'' = Q_{157} - \Delta L_{LI} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 157} \quad (8.144)$$

$$Q_{158}'' = Q_{158} - \Delta L_{LI} + \Delta L_{LII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 158} \quad (8.145)$$

$$Q_{159}'' = Q_{159} - \Delta L_{LII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 159} \quad (8.146)$$

$$Q_{179}'' = Q_{179} - \Delta L_{XLVI} + \Delta L_{XLVII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 179} \quad (8.147)$$

$$Q_{181}'' = Q_{181} - \Delta L_{II} + \Delta L_{III} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 181} \quad (8.148)$$

$$Q_{186}'' = Q_{186} - \Delta L_{XLVII} \quad \text{Corrección para el caudal en la rama 186} \quad (8.149)$$

Anexo 8 Muestra parcial de las hojas de ecuaciones y variables del algoritmo TKSolver empleado en la evaluación de la red hidráulica.

Status	Rule
Comment	;Ecuaciones de balanceo de mallas
Satisfied	$\Delta 1 = -(k19^*q19^{\wedge}2+k21^*q21^{\wedge}2+k31^*q31^{\wedge}2-k1^*q1^{\wedge}2-k13^*q13^{\wedge}2)/(2^*(k19^*q19+k21^*q21+k31^*q31+k1^*q1+k13^*q13))$
Satisfied	$\Delta 2 = -(-k2^*q2^{\wedge}2+k13^*q13^{\wedge}2+k18^*q18^{\wedge}2-k181^*q181^{\wedge}2)/(2^*(k2^*q2+k13^*q13+k18^*q18+k181^*q181))$
Satisfied	$\Delta 3 = -(-k3^*q3^{\wedge}2-k4^*q4^{\wedge}2-k12^*q12^{\wedge}2+k181^*q181^{\wedge}2)/(2^*(k3^*q3+k4^*q4+k12^*q12+k181^*q181))$
Satisfied	$\Delta 4 = -(k92^*q92^{\wedge}2+k4^*q4^{\wedge}2-k90^*q90^{\wedge}2-k56^*q56^{\wedge}2)/(2^*(k92^*q92+k4^*q4+k90^*q90+k56^*q56))$
Satisfied	$\Delta 5 = -(k93^*q93^{\wedge}2-k57^*q57^{\wedge}2+k90^*q90^{\wedge}2+k67^*q67^{\wedge}2)/(2^*(k93^*q93+k57^*q57+k90^*q90+k67^*q67))$
Satisfied	$\Delta 6 = -(-k93^*q93^{\wedge}2-k109^*q109^{\wedge}2-k95^*q95^{\wedge}2+k96^*q96^{\wedge}2)/(2^*(k93^*q93+k109^*q109+k95^*q95+k96^*q96))$
Satisfied	$\Delta 7 = -(k5^*q5^{\wedge}2-k94^*q94^{\wedge}2-k92^*q92^{\wedge}2-k96^*q96^{\wedge}2)/(2^*(k5^*q5+k94^*q94+k92^*q92+k96^*q96))$
Satisfied	$\Delta 8 = -(-k5^*q5^{\wedge}2+k8^*q8^{\wedge}2+k10^*q10^{\wedge}2+k12^*q12^{\wedge}2)/(2^*(k5^*q5+k8^*q8+k10^*q10+k12^*q12))$
Satisfied	$\Delta 9 = -(-k18^*q18^{\wedge}2-k8^*q8^{\wedge}2+k17^*q17^{\wedge}2+k14^*q14^{\wedge}2)/(2^*(k18^*q18+k8^*q8+k17^*q17+k14^*q14))$
Satisfied	$\Delta 10 = -(k32^*q32^{\wedge}2+k33^*q33^{\wedge}2+k22^*q22^{\wedge}2-k14^*q14^{\wedge}2-k31^*q31^{\wedge}2)/(2^*(k32^*q32+k33^*q33+k22^*q22+k14^*q14+k31^*q31))$
Satisfied	$\Delta 11 = -(k20^*q20^{\wedge}2+k23^*q23^{\wedge}2-k22^*q22^{\wedge}2+k24^*q24^{\wedge}2-k21^*q21^{\wedge}2)/(2^*(k20^*q20+k23^*q23+k22^*q22+k24^*q24+k21^*q21))$
Satisfied	$\Delta 12 = -(k27^*q27^{\wedge}2+k28^*q28^{\wedge}2-k26^*q26^{\wedge}2-k24^*q24^{\wedge}2)/(2^*(k27^*q27+k28^*q28+k26^*q26+k24^*q24))$
Satisfied	$\Delta 13 = -(k29^*q29^{\wedge}2-k30^*q30^{\wedge}2+k26^*q26^{\wedge}2-k33^*q33^{\wedge}2)/(2^*(k29^*q29+k30^*q30+k26^*q26+k33^*q33))$
Satisfied	$\Delta 14 = -(k25^*q25^{\wedge}2-k32^*q32^{\wedge}2+k30^*q30^{\wedge}2-k15^*q15^{\wedge}2)/(2^*(k25^*q25+k32^*q32+k30^*q30+k15^*q15))$
Satisfied	$\Delta 15 = -(-k9^*q9^{\wedge}2-k17^*q17^{\wedge}2+k16^*q16^{\wedge}2+k15^*q15^{\wedge}2)/(2^*(k9^*q9+k17^*q17+k16^*q16+k15^*q15))$
Satisfied	$\Delta 16 = -(k9^*q9^{\wedge}2-k10^*q10^{\wedge}2+k11^*q11^{\wedge}2-k6^*q6^{\wedge}2)/(2^*(k9^*q9+k10^*q10+k11^*q11+k6^*q6))$
Satisfied	$\Delta 17 = -(k6^*q6^{\wedge}2-k102^*q102^{\wedge}2+k94^*q94^{\wedge}2-k99^*q99^{\wedge}2)/(2^*(k6^*q6+k102^*q102+k94^*q94+k99^*q99))$

Status	Input	Name	Output	Unit	Comment
	,081	Q		l/s	caudal inicial que se suministra a la red de distribución
		q1	,05416	l/s	Caudal que circula por la rama 1
		q2	,04758	l/s	Caudal que circula por la rama 2
		q3	,04282	l/s	Caudal que circula por la rama 3
		q4	-,00401	l/s	Caudal que circula por la rama 4
		q5	,00991	l/s	Caudal que circula por la rama 5
		q6	,01968	l/s	Caudal que circula por la rama 6
		q8	,00758	l/s	Caudal que circula por la rama 8
		q9	,00506	l/s	Caudal que circula por la rama 9
		q10	,00616	l/s	Caudal que circula por la rama 10
		q11	,00493	l/s	Caudal que circula por la rama 11
		q12	,00032	l/s	Caudal que circula por la rama 12
		q13	,00592	l/s	Caudal que circula por la rama 13
		q14	,00653	l/s	Caudal que circula por la rama 14
		q15	,0049	l/s	Caudal que circula por la rama 15
		q16	,00355	l/s	Caudal que circula por la rama 16
		q17	,00364	l/s	Caudal que circula por la rama 17
		q18	,0025	l/s	Caudal que circula por la rama 18
		q19	,02684	l/s	Caudal que circula por la rama 19

## **Anexo 1**

Aval dado por el DrC. Yoalvy Retirado Mediaceja, Vicerrector Docente de la Universidad de Moa, Cuba, a favor del trabajo de diploma.



Universidad de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez (UMoa)  
Vicerrectoría de Formación: Oficina del Vicerrector

**AVAL PARA TRABAJO DE DIPLOMA**

**DATOS DE LA TESIS:**

**Título:** Propuesta metodológica para el cálculo de sistemas de tuberías y su aplicación al análisis de la red hidráulica del municipio Unión de Reyes.

**Diplomante:** Arnoldo Lores Marrero

**Tutor:** Dr. C. Yanán Camaraza Medina

**Curso académico:** 2019-2020

**Institución de Educación Superior:** Universidad de Matanzas. Facultad de Ciencias Técnicas. Departamento de Mecánica.

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 que generalmente emplean la electricidad obtenida en plantas termoeléctricas convencionales.

Por tal razón, suministrar agua 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 ahorro de los recursos energéticos no renovables. Estos aspectos están claramente delineados en las políticas y planes de desarrollo del Estado y Gobierno cubanos. Su génesis data de la década del 60, con la conocida voluntad hidráulica de Cuba, concebida e impulsada por el Comandante en Jefe de la Revolución cubana. No obstante, en la actualidad existen en el país múltiples redes de distribución hidráulica que presentan dificultades para garantizar el abasto de agua a los clientes más alejados, tal es el caso de la red perteneciente al municipio Unión de Reyes, en Matanzas.

Para eliminar esta problemática, de vital trascendencia social, energética y económica, se desarrolló el trabajo de diploma de referencia, el cual posee una adecuada estructura y posibilita la selección de un equipo de flujo para el bombeo intermedio del caudal de agua a suministrar a la red hidráulica del poblado Unión de Reyes, lo que contribuye al correcto funcionamiento de la instalación con un mínimo de inversión.

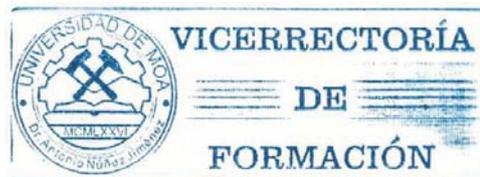
La investigación desarrollada por el diplomante tiene un incuestionable rigor científico, incluso superior al nivel exigido para este tipo de ejercicio de culminación de estudio. Por consiguiente, satisface totalmente las ideas rectoras establecidas en el artículo 146 del Reglamento de Trabajo Docente y Metodológico de la Educación Superior (Resolución No. 2/2018, dictada por el Ministro de Educación Superior), en el cual se plantea: *“el trabajo de diploma es el tipo de trabajo investigativo que pueden realizar los estudiantes y que les permite adquirir un mayor dominio y actualización de los métodos científicos y técnicas característicos de la profesión, [...] En el desarrollo de los trabajos de diploma, los profesores deben promover la iniciativa, la independencia y la creatividad de los estudiantes, garantizando el trabajo individual y estimulando el análisis interdisciplinario en la resolución del problema objeto de la investigación”*.

Por otra parte, quien suscribe considera que el trabajo presentado en opción al título de Ingeniero Mecánico presenta las siguientes **fortalezas:**

- ✓ Posibilitó la selección y puesta en marcha de una bomba que garantiza el abasto de agua potable a un total de 1676 personas, contribuyendo a la satisfacción del cliente y al ingreso de divisas por concepto de reducción de los costos de producción.
- ✓ Concibió el establecimiento de un procedimiento en la herramienta computacional *TKsolver* para futuras evaluaciones de la red, con el objetivo de garantizar el correcto funcionamiento del sistema y su fiabilidad operacional.
- ✓ Generó resultados confiables y de alto valor científico que pueden constituir la base para futuras investigaciones de Maestría y publicaciones en Revistas científicas pertenecientes a los grupos I y II, según los estándares del Ministerio de Educación Superior.

Pudieran resaltarse otros logros igualmente relevantes sobre la Tesis. Sin embargo, los expuestos le confieren méritos suficientes y denotan su vital importancia, pertinencia y actualidad científico-técnica. Teniendo en cuenta lo anterior, considero que el informe satisface las exigencias establecidas para este tipo de ejercicio de culminación de estudio y que el diplomante se ha apropiado de los conocimientos, las habilidades y las competencias necesarias para ser acreedor del título de Ingeniero Mecánico. Igualmente, resulta significativa la labor realizada por el tutor para lograr la formación investigativa del estudiante y concretar el objetivo de una investigación tan compleja, en relativamente poco tiempo.

Para que así coste, se firma el presente documento en Moa, provincia Holguín, el día 1ro de junio de 2020. “Año 62 de la Revolución”



**Prof. Tit., Ing. Yoalbys Retirado Mediceja, Dr. C.**

Vicerrector de Formación. Doctor en Ciencias Técnicas.

Miembro del Tribunal Permanente de Termotecnia para las Defensas de Doctorados.

Profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica. Disciplina Tecnología Energética.

Colaborador del Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa (CEETAM).