



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

HABILITACIÓN DE LA RED DE CROSS PARA EL ESTUDIO DE PRESIONES Y VELOCIDADES EN TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

**LUIS FELIPE VALDEZ VILORIA
LUIS EDUARDO PADILLA SALAZAR.**

DIRECTOR. ING.: EDGAR QUIÑONES BOLAÑOS



**UNIVERSIDAD DE
CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS D. T y C.**



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

**HABILITACIÓN DE LA RED DE CROSS PARA EL ESTUDIO
DE PRESIONES Y VELOCIDADES EN TUBERÍAS DE
DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE.**

**LUIS FELIPE VALDEZ VILORIA
LUIS EDUARDO PADILLA SALAZAR**

**INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADO PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL.**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN
MODELACIÓN AMBIENTAL.**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:
MODELACIÓN AMBIENTAL.**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

CARTAGENA DE INDIAS D. T y C

ENERO 2016



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	7
ABSTRACT.	9
1. INTRODUCCIÓN	11
2. OBJETIVOS Y ALCANCE	14
2.1. OBJETIVO GENERAL	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2.3. ALCANCE	14
3. MARCO DE REFERENCIA	15
3.1. ANTECEDENTES	15
3.2. ESTADO DEL ARTE.....	18
3.3. MARCO TEÓRICO.....	21
3.3.1. ANÁLISIS DE REDES DE TUBERÍAS. REDES CERRADAS	21
3.3.2. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE ANÁLISIS DE REDES CERRADAS	22
3.3.3. MÉTODO DE HARDY-CROSS CON CORRECCIÓN DE CAUDALES	26
3.3.4. MÉTODO DE HARDY-CROSS CON CORRECCIÓN DE CABEZAS	30
3.3.5. COMPARACIÓN ENTRE LAS DOS FORMAS DEL MÉTODO DE HARDY-CROSS 35	
3.3.6. EPANET v2.....	36
3.4. MARCO LEGAL.....	39
4. METODOLOGÍA	41
4.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y LITERATURA	43
4.2. REVISIÓN DE LA RED	45
4.2.1. IDENTIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS.....	46
4.2.2. INSTRUMENTACIÓN Y MONTAJE DEL SISTEMA.....	47
4.2.3. MANÓMETRO DIFERENCIAL.	47
4.3. PRUEBAS INICIALES.	49
4.4. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO Y MODELACIÓN EPANET.	52
4.5. CALIBRACIÓN DEL SISTEMA.....	59



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

4.6.	GUÍA PARA REALIZAR LA PRÁCTICA.....	60
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
5.1.	REVISIÓN DE LA RED	61
5.1.1.	Identificación De Instrumentos.	63
5.1.2.	Instrumentación.	66
5.2.	PRUEBAS INICIALES	68
5.2.1.	Aforo de Caudales.	70
5.2.2.	Presiones En El Sistema Y Sentidos De Flujo	71
5.3.	SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO Y MODELACIÓN EPANET.	87
5.3.1.	Implementación de Hardy Cross.	88
5.3.2.	Modelación de la Red con EPANET.	94
5.4.	CALIBRACIÓN DEL SISTEMA.	97
5.4.1.	Verificación de las Presiones en el sistema.	97
5.4.2.	Verificación de los Caudales en el Sistema.....	99
5.5.	GUÍA PARA REALIZAR LA PRÁCTICA.....	101
6.	CONCLUSIONES	109
7.	RECOMENDACIONES	111
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
9.	ANEXOS	114



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1. Red cerrada. Caudales consumidos en los nodos y caudales de alimentación a la red.	22
Ilustración 2. Diagrama de Flujo. Metodología.....	42
Ilustración 3. Diseño de la red. Fotografía tomada en el laboratorio de hidráulica.....	46
Ilustración 4. Red de distribución mallada.	49
Ilustración 5. Válvulas para determinar presiones en nodos.	52
Ilustración 6. Red de Distribución Mallada para Modelar.	54
Ilustración 7. Modelo De Red En Epanet.....	56
Ilustración 8. Cuadro de Diálogo. Características Hidráulicas del Nodo 2.....	56
Ilustración 9. Cuadro de Dialogo. Características Hidráulicas de Elementos de la Red.	57
Ilustración 10. Cuadro de Dialogo. Opciones Hidráulicas.	58
Ilustración 11. Obtención de Tablas de Datos.....	58
Ilustración 12. Planos de red de Cross AutoCAD y Epanet.	62
Ilustración 13. Descripción del sistema de red.	63
Ilustración 14. Centro de Medición sin el Manómetro.....	65
Ilustración 15. Tanque de Almacenamiento Deteriorado.....	65
Ilustración 16. Adecuación de Manómetro de Mercurio e Implementación de Nuevo Manómetro.....	67
Ilustración 17. Tanque de Almacenamiento Implementado.....	68
Ilustración 18 Platina de orificio. Fuente de los autores.....	69
Ilustración 19 Nodo 8 desarmado luego de las pruebas iniciales. Fuente de los autores.	69
Ilustración 20 Nodo 4. Fuente: de los autores.	69
Ilustración 21 Nodo 11. Fuente: de los autores	69
Ilustración 22. Aforo del Caudal para las siete Combinaciones de Salida de Flujo.....	70
Ilustración 23. Presiones (MCA) en cada tramo de la red. Prueba 1.....	73
Ilustración 24. Diagrama de distribución de caudales en la red para prueba 1. (Qm ³ /s)	74
Ilustración 25. Presiones (MCA) en cada tramo de la red. Prueba 2.....	75
Ilustración 26. Diagrama de distribución de caudales en la red para prueba 2. (Qm ³ /s)	76
Ilustración 27. Presiones (MCA) en cada tramo de la red. Prueba 3.....	77



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

Ilustración 28. Diagrama de distribución de caudales en la red para prueba 2. (Qm ³ /s)	77
Ilustración 29. Presiones (MCA) en cada tramo de la red. Prueba 4.....	79
Ilustración 30. Diagrama de distribución de caudales en la red para prueba 4. (Qm ³ /s)	79
Ilustración 31. Presiones (MCA) en cada tramo de la red. Prueba 5.....	80
Ilustración 32. Diagrama de distribución de caudales en la red para prueba 5. (Qm ³ /s)	81
Ilustración 33. Presiones (MCA) en cada tramo de la red. Prueba 6.....	83
Ilustración 34. Diagrama de distribución de caudales en la red para prueba 6. (Qm ³ /s)	83
Ilustración 35. Presiones (MCA) en cada tramo de la red. Prueba 7.....	84
Ilustración 36. Diagrama de distribución de caudales en la red para prueba 7. (Qm ³ /s)	85
Ilustración 37. Esquema de la Red de Cross Epanet.	94
Ilustración 38. Estado de las Tuberías en la Red. Epanet.	95
Ilustración 39. Estado de los Nodos de la Red. Epanet	96
Ilustración 40. Comparación de Presiones. Hardy Cross - Epanet. Prueba 2.....	98
Ilustración 41. Tabla de caudales por Hardy Cross - Epanet.....	100
Ilustración 42. Red de Distribución Instalada en Laboratorio.....	105
Ilustración 43. Propiedades de Tubería 2A-3A	106
Ilustración 44. Diseño de la Red de Distribución (EPANET).....	106
Ilustración 45. Resultados de Epanet para Prueba 2. Salida de flujo en el nodo 4.....	126
Ilustración 46. Resultados de Epanet para Prueba 3. Salida de flujo en el nodo 11.....	126
Ilustración 47. Resultados de Epanet para Prueba 4. Salida de flujo en el nodo 11.....	127
Ilustración 48. Resultados de Epanet para Prueba 5. Salida de flujo en los nodos 4 y 11.	127
Ilustración 49. Resultados de Epanet para Prueba 6. Salida de flujo en los nodos 4 y 12.	128
Ilustración 50. Resultados de Epanet para Prueba 7. Salida de flujo en los nodos 11 y 12.	128
Ilustración 51. Diseño del tanque de aforo y almacenamiento. Autor Clemente Venencia	129



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

RESUMEN

Para la Universidad de Cartagena, en especial para la facultad de Ingeniería es de gran importancia la utilización de espacios de investigación y prácticas educativas para acrecentar conocimientos y poner al servicio de la comunidad. Por ende, en pro del funcionamiento de los laboratorios de la facultad, el objetivo del presente trabajo fue Habilitar la Red de Tubería de Agua Potable o Red de Cross instalada en el laboratorio de hidráulica para el estudio de distribución de presiones y velocidades.

La habilitación del laboratorio fue garantizada gracias a la identificación previa de las problemáticas que en su momento presentaba el sistema tales como el deterioro irreparable del tanque de aforo, fugas en accesorios, falta de mantenimiento, fallas eléctricas en la bomba centrífuga y el manómetro diferencial, entre otros, estas fallas fueron halladas gracias al levantamiento del inventario realizado al laboratorio, permitiendo luego entonces su posterior reparación y/o adecuación, mantenimientos y suministro de nuevos equipos. Estando el laboratorio con las mejoras necesarias para su funcionamiento, se realizaron las pruebas iniciales para la toma de datos. Los datos fueron recopilados y tabulados, utilizados para la calibración del sistema por medio de hojas de cálculo de Excel y modelación con EPANET. De esta manera se definieron Caudales, velocidades, presiones y sentidos de flujos en la red.

Las pruebas nos arrojaron presiones inferiores a 1,0 psi en los tramos comprendidos entre los nodos 4-5, 5-6, 7-9, 8-10, y 10-11, los resultados pueden ser apreciados a partir de la primera prueba, de ahí podemos observar el porqué de estas presiones bajas y la influencia que tiene el cambio de dirección del flujo, dependiendo de la salida de este (en los nodos 4, 11 y 12), en contexto fue necesario entonces utilizar un manómetro diferencial de 0 a 5 psi de caratula amplia para la identificación de estas presiones bajas puesto que el manómetro de mercurio en U no registraba dichas presiones, además, para la corroboración de la información se dispuso de otros dos manómetros puntuales con el fin de comparar los datos recopilados. Esta fue mejor forma de medir las presiones bajas, ya que se observó la



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

presión en cada nodo por tramo comprendido y la diferencia entre estos resultado ser la presión del tramo como lo mostraba el manómetro diferencial, luego se definía el sentido del flujo dependiendo cual nodo era el mayor.

Un buen mantenimiento periódico de los accesorios y equipos que componen la red y la implementación y/o utilización de la guía de laboratorio con pautas y seguimientos nos garantiza un buen funcionamiento del sistema y la durabilidad del mismo.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

ABSTRACT.

For the University of Cartagena, especially for the Faculty of Engineering it is of great importance Spaces research and educational practices to enhance knowledge and put at the service of the community. Thus, towards the operation of the laboratories of the faculty, the objective of this study was to Enable Network Pipe Water or Red Cross installed in the hydraulic laboratory for the study of distribution of pressures and speeds.

Enabling the laboratory was ensured by the prior identification of problem that once the system had irreparable damage such as tank gauging, leaking fittings, lack of maintenance, power failures in the centrifugal pump and a differential manometer among others, these faults were found thanks to rising inventory carried to the laboratory, then allowing then subsequent repair and / or adjustment, maintenance and supply of new equipment. While the laboratory with the necessary improvements to its operation, initial tests for data collection were performed. Data were collected and tabulated, used for calibrating the system using Excel spreadsheets and modeling with EPANET. Thus they flow, speeds, pressures and flows in the directions defined network.

The tests gave us less than 1.0 psi in the sections between nodes 4-5, 5-6, 7-9, 8-10, 10-11 and pressures, the results can be appreciated from the first test , hence we can see why these low pressures and the influence of the change of direction of flow, depending on the output of this (at nodes 4, 11 and 12), in context was then necessary to use a differential manometer 0-5 psi wide to identify these low pressures cover art because the mercury manometer U did not record these pressures, in addition to corroborating information was available two specific gauges in order to compare data collected . This was the best way of measuring low pressures, and the pressure was observed in each node comprised section and the difference between these turned out to be the pressure of the section as it showed the differential manometer, then the sense defined flow depending on which node he was the oldest.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

A good regular maintenance of the accessories and equipment that make up the network and the implementation and / or use of the guide laboratory guidelines and monitoring guarantees a smooth operation



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de las ciudades del mundo utilizan el sistema de conductos a presión para el transporte del agua, la buena operación de éstos y el resultado de buenos diseños determina el nivel de desarrollo de las sociedades, entonces, es aquí donde los sistemas de distribución de agua representan una parte importante de la inversión en infraestructura urbana y se considera un componente crítico de la obra pública.

La operación de estas redes de distribución constituye uno de los parámetros más críticos debido a que se debe garantizar el buen funcionamiento del sistema de distribución para que todas las personas tengan acceso a este recurso. Colombia es uno de los países que presenta grandes fallas en sus sistemas de distribución de agua potable y se encuentra trabajando para mejorar la calidad de este servicio.

A pesar de la importancia que tiene el sistema de distribución de agua potable, existen aún comunidades en el departamento de Bolívar que desconocen los criterios técnicos para la instalación de redes, que se hace a través de la planificación. Por ejemplo, uno de los casos más destacados en el país y en la región es la situación actual del municipio del Carmen de Bolívar (considerado el corazón de la región de los Montes de María), con poco más de 56.348 habitantes que vivían sin acueducto hasta hace un año su instalación avanzaba a un 90% pero aún se espera su funcionamiento y cobertura total, aun siendo éste el principal objetivo de los planes de gobierno de los últimos cinco (5) alcaldes del municipio. Esta situación refleja las grandes consecuencias que produce la mala planificación en cuanto a redes de acueducto, agravada por el hecho de que en ocasiones, el diseño de dichas redes (como sucede en el Carmen de Bolívar) ha sido realizado sin ningún tipo de consideraciones técnicas (Vergara, 2013).

El estado de las redes de distribución de agua potable es un factor importante en la prestación adecuada del servicio de acueducto. Si las redes están en mal estado, mal diseñadas o construidas con materiales inadecuados, es mucho más probable que se



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

presenten problemas de conducción, bombeo. Incrementando los niveles de agua no facturada y los costos de operación de los sistemas de acueducto. Además, es posible que por el mal estado de las redes el agua que reciben los habitantes sea de menor calidad, pues puede ser contaminada por filtraciones o residuos en las tuberías (Unicef, 2006).

El principal objetivo del Departamento de Hidráulica y Saneamiento de la Universidad de Cartagena es la enseñanza buscando formar al estudiante para que sea capaz de enfrentar y resolver todo tipo de problemas (como los mencionados anteriormente) que estén relacionados con el diseño de estructuras hidráulicas, tales como sistemas de aducción, sistemas de recolección de aguas negras, plantas de potabilización de agua dulce, entre otros. Igualmente, se pretende crear en el estudiante la conciencia de la magnitud del impacto ambiental que estas obras generan, y la responsabilidad social y profesional en plena competencia y honestidad, pues son precisamente los estudiantes los futuros encargados de los diseños, planeación, ejecución y control de este tipo de obras.

Para conseguir este fin es necesario construir espacios educativos que muestren o enseñen el funcionamiento de las tuberías de distribución de agua potable, no solamente a la comunidad estudiantil sino también a la sociedad. Uno de esos espacios es con el que cuenta la Universidad de Cartagena, específicamente en el laboratorio de hidráulica ubicado en su sede Piedra de Bolívar.

Con vistas al estudio de los mismos, entendemos un entorno de aprendizaje como aquel espacio o comunidad organizados con el propósito de lograr el aprendizaje y que para que éste tenga lugar requiere ciertos componentes (Salinas, 2004c): una función pedagógica (actividades de aprendizaje, situaciones de enseñanza, a materiales de aprendizaje,...), la tecnología apropiada a la misma (herramientas seleccionadas en conexión con el modelo pedagógico) y los aspectos organizativos (organización del espacio, del calendario, la gestión de la comunidad, etc..).

La Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cartagena cuenta con un conjunto de laboratorios de ámbito hidráulico y/o manejo de aguas con prácticas en canales y tuberías



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

que reúnen estudios de presiones, velocidades, entre otros muchos parámetros. Sin embargo, a pesar de que estos sistemas tienen gran tiempo de uso, todavía la práctica y la pedagogía no se han visto rezagadas y por el contrario se han destacado a través de los años por participar activamente en los planes de estudios.

Imaginemos ahora a corto plazo un espacio de laboratorio en buen estado y en pleno desarrollo de su funcionalidad, donde se diera una innovación tecnológica que disminuyera los prejuicios y mejorara los niveles de pedagogía y donde la investigación no fuera tan escasa. ¿Cómo sería? ¿Cuál sería el nuevo aporte de habilitar un laboratorio en la facultad de ingeniería? Este nuevo espacio imaginario y los interrogantes que surgieron de él revelaron la gran importancia que trae consigo el presente proyecto de investigación como tal.

Por tal razón, una forma de complementar los conocimientos teóricos sobre redes de conducción de agua potable se consigue a través de las prácticas de laboratorios relacionados con el tema, tal es el caso de la habilitación y recuperación del laboratorio de la Red de Cross.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

2. OBJETIVOS Y ALCANCE

2.1. OBJETIVO GENERAL

Habilitar el sistema construido a escala de laboratorio de la red de tubería de agua potable o red de Cross instalada en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Cartagena, de tal manera que permita estudiar la distribución de presiones y velocidades a través de hojas de cálculo de Excel y modelación con EPANET de los datos recopilados en la ejecución de la experiencia.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un diagnóstico del estado y funcionamiento actual de los elementos y herramientas que componen el laboratorio de redes.
- Seleccionar el método que permita el cálculo de presiones y velocidades mediante la simulación de modelos relacionados con el tema.
- Calibrar todos los elementos que determinan el funcionamiento del sistema garantizando la capacidad técnica - operativa.
- Elaborar una guía para la práctica en la cual se den pautas para el cálculo y el análisis de presiones y velocidades.

2.3. ALCANCE

En este proyecto se realizó la reconstrucción del laboratorio de redes ubicado en la Facultad de Ingeniería en su sede Piedra de Bolívar con el fin de ejecutar el estudio y análisis de presiones y velocidades en sistemas de distribución de agua a presión a escala. Durante este proceso se hizo la calibración de la red mediante la simulación de modelos matemáticos e implementación de métodos relacionados con el cálculo de estos parámetros. El proyecto se llevó a cabo durante el segundo periodo del año 2014 y primero del año 2015.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1. ANTECEDENTES

La facultad de Ingeniería de la Universidad de Cartagena ha sido fundamental en el desarrollo de la ciudad y ha contribuido de manera importante en la evolución científica, tecnológica y social de la misma. Es además pionera en la Costa Norte del país y ha formado y albergado a estudiantes desde el año 1950 cuando fue fundada. Los antecedentes de los estudios de Ingeniería en la Universidad de Cartagena datan de los años 30 cuando al fundarse la primera facultad de Ingeniería bajo la orientación del pensum de la Universidad Nacional de Bogotá. La idea de las autoridades universitarias al crear esta escuela generó la oposición de las comunidades profesionales antioqueña y bogotana, que desde finales del Siglo XIX eran las únicas que formaban ingenieros con énfasis en minas y en matemáticas, demostrando los regionalismos y la clara fragmentación del país ya no sólo en los ámbitos políticos, económicos y sociales sino en los académicos y de formación profesional. (Universidad de Cartagena. Historia de la facultad de Ingeniería.)

En medio de esta polémica y a pesar de la oposición de las facultades del interior la Gobernación del Dpto. de Bolívar reglamentó mediante decreto N° 75 del 31 de marzo de 1930 el funcionamiento de una facultad de ingeniería en la Universidad de Cartagena, la cual inició labores en el mes de abril con 4 estudiantes, siendo su director el ingeniero italiano Antonio Nordio, quien había venido en 1930 durante la rectoría del alemán Carlos Glockner a restaurar y ampliar el claustro de San Agustín en el que funcionaba la Universidad. (Universidad de Cartagena. Historia de la facultad de Ingeniería.)

La facultad de Ingeniería es creada y se va articulando en forma tal con el medio, con los contextos y la sociedad que aun hoy la conservamos más próspera que nunca, y esos 36 estudiantes que ingresaron en 1949 en el presente se ven aumentados en cantidades



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

superiores, pero no fue una tarea fácil a el Programa de Ingeniería Civil le toco autoabastecerse de sus futuros docentes, y abrirse paso en una ciudad que apenas despuntaba.

El programa de Ingeniería Civil empieza a denotar cambios en sus contenidos académicos en respuesta a las realidades cada vez más cambiantes de la sociedad y la economía colombiana, de una economía agro exportadora con un matiz liberal se pasa a un intento de fortalecer la economía interna a través de una convivencia de proteccionismo y libremercado donde no solo era clave fortalecer las relaciones comerciales externas sino también las internas y fue posible entre otras cosas estimulando la construcción de mejores vías de comunicación entre las diferentes regiones del país.(Universidad de Cartagena. Historia de la facultad de Ingeniería.)

Los pensum también nos ayudan a registrar la conexión cada vez más creciente de la facultad de ingeniería con el país y con la ciudad de Cartagena en lo relacionado con los desarrollos de la industria química, en los avances dentro del campo eléctrico, el aprovisionamiento de agua y todos esos adelantos científicos y tecnológicos que caracterizan la segunda mitad del siglo XX, a través de la adopción de cátedras como la química industrial, la electrotecnia y laboratorio, termodinámica e hidráulica, vías, maquinaria y costos.

En la década de los años 1970 se inicia el montaje del laboratorio de hidráulica para el desarrollo de las prácticas de las asignaturas del área de las aguas, que se venían realizando en los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia en la ciudad de Bogotá. La primera propuesta surgió del Ingeniero Ismael Güetee Burgos quien era el profesor de las asignaturas mencionadas, solicitando al Rector Juan C. Arango que la partida presupuestal para realizar las prácticas en Bogotá se destinara para la compra de equipos y montaje iniciales del laboratorio. Se logró con esfuerzo y se consiguió la dotación hasta completar la



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

instalación de todo el laboratorio con las gestiones realizadas por el Decano, en ese entonces el Ingeniero Antonio J. Paz Franco.

Con el fin de impulsar la investigación y fomentar la educación continuada y los estudios de postgrado, se creó el Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental mediante Acuerdo del Consejo Superior N° 17, del 23 de abril de 1990, bajo la rectoría de Carlos Villalba Bustillo y la decanatura del Ingeniero Manuel Eljaiek García, a través del cual se han realizado importantes convenios de cooperación técnica para facilitar la investigación y transferencia de tecnología con instituciones gubernamentales y privadas. (Universidad de Cartagena. Historia de la facultad de Ingeniería.)

La idea original de la red surgió como proyecto de grado luego de que se pusiera en marcha el laboratorio de hidráulica, diseñado y puesto en marcha un par de años después por alumnos de ingeniería civil en ese entonces Pedro Navarro, Daniel Nieves, Guido Peñaranda y José Rodríguez bajo la asesoría del ingeniero Álvaro Navarro y en compañía del instrumentista Clemente Venencia. Años más tarde se daría una mejora a la red también como proyecto de grado implementando Tetracloruro de Carbono para medir presiones demasiado bajas, esta vez bajo la dirección del ingeniero Ismael Güeteo Burgos y desarrollado por los alumnos Boris Mordecai Puello y Cira Bustillo Sierra. Estos también contaron con el acompañamiento del Instrumentista Clemente Venencia.

Anteriormente el laboratorio funcionaba en la sede Claustro San Agustín de la Universidad de Cartagena y servía de complemento en la formación académica de los estudiantes de pregrado, la causa del deterioro de este se debe a diferentes factores, uno de estos es la mala operación del sistema resultado del daño progresivo de los instrumentos que hacían parte de la red, es decir, datos incoherentes eran tomados producto del manómetro diferencial de mercurio, ya que era eficiente midiendo grandes presiones pero era deficiente cuando medía pequeñas presiones.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

3.2. ESTADO DEL ARTE

Es de vital importancia conocer cuáles son las investigaciones que se han realizado sobre las redes de conducción de agua, más específicamente ligadas a los estudios de presiones y velocidades, pues al conocerlos se podrán implementar o analizar mecanismos y herramientas los cuales ayudaran a escoger los pasos para alcanzar la habilitación del laboratorio de redes conocido actualmente como Red de Cross.

Como parte del estudio y análisis de los resultados que obtuvieron los investigadores o personas que realizaron las distintas investigaciones, se ha de resaltar de ahora en adelante los métodos, herramientas y resultados de los distintos documentos relacionándolos directamente con la Red de Cross; haciendo una relación de estos artículos con nuestra investigación podemos resaltar siguiendo en orden cronológico, desde los documentos más recientes, investigaciones realizadas por (Ayad, Awad, & Yassin, 2013) cuyo objetivo fue diseñar sistemas de distribución de agua para suministrar agua potable para todas las áreas que cumplan las exigencias de diseño y la presión, basándose en el Análisis de la red de tuberías que implica el proceso que busca la determinación del caudal y la presión asociada a cada nodo, esta investigación la realizaron mediante la simulación de modelos por medio de varios métodos, tales como el de Newton Raphson (NR), otros procesos de iteración en los nodos y el uso del programa EPANET, para llevar a cabo el proceso de recopilación de datos se usó la red de distribución de agua de Florida cuya simulación de la red de distribución de agua se hace para un día completo de 24 horas. La duración del paso de tiempo se toma igual a 4 horas mientras los factores de multiplicación se toman de código egipcio de la práctica para el diseño de redes de tuberías. El análisis de una red de tuberías puede ser uno de los más complejos problemas matemáticos que los ingenieros están llamados a resolver y se ha podido observar mediante los resultados obtenidos por las personas encargadas de realizar esta investigación que EPANET es una gran herramienta para el estudio de sistemas de redes de tuberías a presión desarrollado para redes de tuberías de agua con todos los parámetros y características que componen los modelos de simulación hidráulica



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

Mientras este primer artículo mencionado solo destaca la implementación del método de Newton Raphson (NR) y EPANET para el estudio de sistemas de redes de tuberías. Nuestro segundo documento de investigación desarrollado refleja de manera específica el diseño de la red y se complementa con una recopilación de métodos y programas respectivos al tema. El segundo artículo científico también se basa en el uso de programas para la simulación de modelos que optimicen las redes de distribución de agua potable (Bieupoude, Azoumah, & Neveu, 2012), destacándose en el diseño de la red dividido en tres partes. En primer lugar, el artículo presenta una breve revisión de los métodos y programas que han sido llevados a cabo en un número importante de los esfuerzos de diseño por computadora. En segundo lugar, se propone el enfoque de análisis geométrico de las redes de distribución como puntos complementarios de los anteriores métodos de optimización. Por último, se propone una aplicación ilustrativa original. La optimización geométrica y multi-escala conocida como el diseño constructivo se utiliza para optimizar analíticamente arquitecturas de red en forma de T sujetas a una restricción de la calidad del agua operacional. Se han podido observar en otros documentos los avances que ha tenido la ciencia y la tecnología desde el punto de vista cronológico en temas relacionados con el diseño de redes de conducción de agua haciendo énfasis en el estudio de presiones y velocidades, tal es el caso del presente artículo que se funda en métodos basados en computadoras para la optimización de las redes de distribución de agua potable, en donde gran cantidad de trabajos explica la diversidad de los programas de computadora que están disponibles en el tema, de los cuales EPANET es el pionero, desarrollado por la agencia de Protección Ambiental de EE.UU. Sus puntos comunes son los cálculos hidráulicos o minimización / maximización de una función objetivo (costo, potencia de bombeo, etc.) con sujeción a las limitaciones operacionales (presión, velocidad, calidad del agua, etc.).

Según los autores, un punto complementario a los métodos de diseño debe ser una atención completa en la variabilidad de las escalas de las redes y de la variación de la geometría (análisis geométrico), pues se deben tener en cuenta las expansiones producidas por el crecimiento normal de la población. Aunque la red es pequeña y siempre tendrá las mismas



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

características físicas cabe resaltar que también se estudiaran estas variaciones puesto que a medida que hay más demanda del servicio, es decir, se necesite más agua, se hará necesario aumentar el caudal en la red, punto clave para valorar la red desde esta perspectiva pues contara con este tipo de mecanismos de operación los cuales garantizaran el desarrollo de estas inquietudes.

Para nuestro caso de investigación, la red tampoco varia geométricamente y sus características físicas mucho menos. Por lo que se asemeja a nuestro caso y la metodología planteada y demás aspectos del artículo científico enriquecen nuestra investigación.

La ineficiencia y la insuficiente cobertura de los servicios de agua y saneamiento son las principales preocupaciones para la salud pública en las regiones urbanas de los países en desarrollo. Esto requiere un enfoque proactivo que se basa en la evaluación del riesgo y de una metodología de gestión para garantizar la seguridad y mantenimiento en los sistemas de distribución del agua. En este contexto, el artículo sobre las Estrategias de rehabilitación de redes de distribución de agua con una perspectiva del Reino Unido (Engelhardt, Skipworth, Savic, Saúl, & Walters, 2000), presenta varios modelos de estudio teniendo en cuenta criterios de desempeño de calidad económica, hidráulica y de fiabilidad del agua, pues deben ser optimizados como parte de una estrategia efectiva. Numerosos modelos de decisión de diferentes complejidades se han desarrollado para resolver el problema para la rehabilitación. El estudio describe una perspectiva técnica-económica viable para ayudar a los administradores del agua y los responsables políticos en el suministro de agua potable, compartiendo con la Red de Cross el interés por instruir a cierta parte de la población en específico.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

3.3. MARCO TEÓRICO

La presente investigación está condicionada al estudio de presiones y velocidades en un sistema de redes de acueducto a escala de laboratorio, por lo que a continuación se describen algunas definiciones ligadas al proyecto. Se deben conocer los distintos métodos que se pueden utilizar para calcular cada uno de los parámetros ligados a la red, como el método de Hardy Cross y Newton–Raphson, como los más reconocidos, enfocados a las redes de tuberías de conducción de agua, además de conocer el programa EPANET v2 que se encarga del cálculo de presiones, velocidades y calidad del agua a través de simulación de un sistema de redes de conductos a presión.

Para el estudio de presiones y velocidades se tuvo en cuenta el análisis de redes de tuberías más específicamente las redes cerradas (Saldarriaga V., 1998), esta información se presenta del siguiente modo:

3.3.1. ANÁLISIS DE REDES DE TUBERÍAS. REDES CERRADAS

A lo largo del capítulo se presentan los métodos más utilizados en el análisis y diseño. Esto obedece a dos hechos importantes. En primer lugar, los métodos más modernos están basados en los más antiguos, los cuales en términos matemáticos son más sencillos pero requieren un mayor número de iteraciones para llegar a un resultado final. La necesidad de disminuir los tiempos de análisis en computador, aspecto importante en las décadas de 1970 y 1980, impulsó el desarrollo de nuevos métodos. En segundo lugar, en el mercado existen programas comerciales basados en diferentes métodos de análisis. Por consiguiente, es importante que los ingenieros encargados del diseño, construcción y operación de redes de acueductos conozcan el programa EPANET como una de las mejores herramientas.

En orden cronológico se presentarán los siguientes métodos de análisis y diseño de redes cerradas.

- Método de Hardy-Cross con corrección de caudales en los circuitos
- Método de Hardy-Cross con corrección de cabezas en los nodos

- Método de Newton-Raphson

3.3.2. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE ANÁLISIS DE REDES CERRADAS

Si se considera la red cerrada mostrada en la Ilustración 1 y se tiene en cuenta que $Q_{D1}, Q_{D2}, Q_{D3}, Q_{D4}, \dots, Q_{DN_u}$ son los caudales consumidos en cada uno de los nodos, algunos de los cuales podrían tener un valor nulo en un momento dado, y que $Q_{e1}, Q_{e2}, Q_{e3}, \dots, Q_{em}$ son los caudales que alimentan la red de distribución, se puede establecer la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^m Q_e = \sum_{i=1}^{N_u} Q_D \quad \text{Ecuación 1}$$

donde N_u es el número de uniones (nodos) que existe en la red.

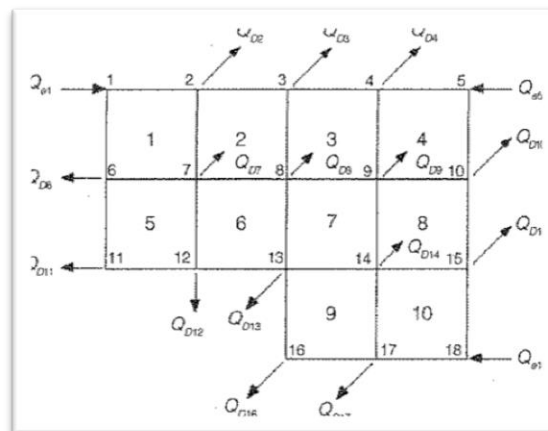


Ilustración 1. Red cerrada. Caudales consumidos en los nodos y caudales de alimentación a la red.

La Ecuación 1 es una ecuación de conservación de la masa. Por otro lado, para cada uno de los nodos se puede establecer una ecuación similar, debido a que localmente se debe cumplir el que la masa se conserve. (Saldarriaga V., 1998)

Dicha ecuación es:

$$\sum_{i=1}^{NTj} Q_{ij} - Q_{Di} = 0 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde NTj es el número de tubos que llegan al nodo i y Q_{ij} representa el caudal que pasa por la tubería ij hacia el nodo i desde el nodo j . Puede ser positivo (va hacia el nodo i) o negativo (sale de dicho nodo). (Saldarriaga V., 1998)

Para cada uno de los caudales Q_{ij} de la Ecuación 2 se puede plantear la siguiente ecuación de conservación de la energía entre los nodos i y j , incluyendo las pérdidas por fricción y las pérdidas menores:

$$H_j - H_i = \sum K_{mij} \frac{V_{ij}^2}{2g} + hf$$

$$H_j - H_i = \frac{V_{ij}^2}{2g} \left[\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right]$$

$$H_j - H_i = \frac{Q_{ij}^2}{2g A_{ij}^2} \left[\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right]$$

Si se despeja Q_{ij} de esta última ecuación se obtiene la siguiente expresión, la cual relaciona el caudal que pasa por la tubería ij con las cabezas en los nodos i y j .

$$Q_{ij} = \left[\frac{H_j - H_i}{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}} \right]^{\frac{1}{2}} \sqrt{2g} A_{ij} \quad \text{Ecuación 3}$$

Si se reemplaza este último resultado en la Ecuación 2 se obtiene:

$$\sum_{i=1}^{NTi} \left[\frac{H_j - H_i}{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}} \right]^{\frac{1}{2}} \sqrt{2g} A_{ij} - Q_{Di} = 0 \quad \text{Ecuación 4}$$

donde NTi representa el número de tuberías que llega a la unión (nodo) i . A fin de tener en cuenta en forma automática el signo del caudal ij la Ecuación 3 se puede cambiar por la siguiente expresión:

$$Q_{ij} = \sqrt{2g} * A_{ij} \frac{H_j - H_i}{\left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right)^{1/2}} (|H_j - H_i|)^{-1/2} \quad \text{Ecuación 5}$$

Este tipo de ecuaciones para el diseño y análisis de redes cerradas de tuberías se conocen como las *ecuaciones de cabeza*. En la red se tienen en total $(Nu-1)$ ecuaciones de este tipo, debiéndose conocer H , o cualquier otra cabeza en la red para poder solucionar dichas ecuaciones. En caso contrario se puede suponer alguna de las cabezas, ya que los valores absolutos de éstas no afectan la distribución de caudales, y además debe tenerse en cuenta que las ecuaciones de cabeza son ecuaciones no lineales. (Saldarriaga V., 1998)

Por otro lado, a partir de los circuitos de tubos que conforman la red, los cuales pueden ser adyacentes o superpuestos, se pueden plantear las siguientes ecuaciones:

Ecuación de continuidad en las uniones que conforman el circuito:

$$\sum_{i=1}^{NTj} Q_{ij} - Q_{Di} = 0 \quad \text{Ecuación 2}$$

Ecuación de conservación de la energía alrededor del circuito:

$$\sum_{i=1}^{NTi} h_{ij} + \sum_{i=1}^{NTi} h_{mij} = 0 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde NTi es el número de tubos del circuito i . Luego, si se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach en esta última ecuación, se obtiene la siguiente expresión:

$$\sum_{j=1}^{NTi} \frac{V_{ij}^2}{2g} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) = 0$$

$$\sum_{j=1}^{NTi} \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) = 0 \quad \text{Ecuación 7}$$

Las ecuaciones como la número 7 se conocen como las *ecuaciones de caudal* de la red. En total se tienen NC ecuaciones de caudal, donde NC es el número de circuitos que conforman la red. Nuevamente se puede observar que son ecuaciones no lineales. (Saldarriaga V., 1998)

Lo anterior implica que para el análisis de la red cerrada se tienen en total $NC + (NU - 1)$ ecuaciones que pueden ser utilizadas para encontrar las cabezas en cada nodo, una de las cuales debe ser conocida o supuesta, y los caudales en cada uno de los tubos que conforman la red. Sin embargo, este conjunto de ecuaciones no puede ser resuelto fácilmente debido a su naturaleza no lineal.

Una vez más debe establecerse una convención de signos para las ecuaciones de caudal Ecuación 7. Los caudales en el circuito se consideran positivos si giran en el sentido de las agujas del reloj y negativos si lo hacen en sentido contrario. Para asegurar una correcta asignación del signo, estas ecuaciones se pueden transformar tal como se indica a continuación:

$$\sum_{j=1}^{NTi} \frac{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}}{2gA_{ij}^2} Q_{ij} (|Q_{ij}|) = 0 \quad \text{Ecuación 8}$$

Los métodos de análisis de redes de tuberías utilizan conjuntos de ecuaciones de cabeza y de caudal para solucionar la red. En todos los casos se conocen los diámetros y rugosidades de las tuberías, lo cual implica que en realidad se trata de procesos de comprobación de diseño y no de diseños en sí. Sin embargo, en programas de diseño, con función objetivo de



tipo optimización de costos, estos métodos de análisis deben conformar alguna de las subrutinas del programa.

3.3.3. MÉTODO DE HARDY-CROSS CON CORRECCIÓN DE CAUDALES

El método de Hardy Cross es un método de tanteos controlados. Primero se suponen los gastos y luego se calculan ajustes consecutivos para corregir estos valores supuestos. En la mayoría de los casos, puede obtenerse suficiente exactitud con tres ajustes; no obstante, hay casos raros en los cuales los ajustes calculados no se aproximan a cero. (Nelson s. B., 1989)

Este método para resolver las ecuaciones Ecuación 4 y Ecuación 7 fue desarrollado por el ingeniero norteamericano H. Cross en 1936. El método original se basa en suponer los caudales en cada uno de los tubos de la red e ir corrigiendo esta suposición. Dado que todas las características de la tubería (d , K_s , $\sum K_m$, l) se conocen, el método es un proceso de comprobación de diseño.

La corrección de los caudales en cada uno de los ciclos de cálculo se hace de la siguiente manera:

Primero se supone un error ΔQ_i en el circuito i . Por consiguiente, para ese tubo las pérdidas reales son:

$$h_{lij} + \sum h_{mij} = \left(f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} + \sum K_{mij} \right) \frac{(Q_{ij} + \Delta Q_i)^2}{2gA_{ij}^2}$$

Si se define una cabeza que incluya la cabeza perdida por fricción y la cabeza perdida por accesorios, en la siguiente forma:

$$h_{ij} = h_{lij} + \sum h_{mij}$$

La anterior ecuación se convierte en:

$$h_{ij} = \left(f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} + \sum K_{mij} \right) \frac{Q_{ij}^2 + 2Q_{ij}\Delta Q_i + \Delta Q_i^2}{2gA_{ij}^2}$$

El término ΔQ_i^2 puede ser despreciado en el segundo paréntesis de la parte derecha de esta última ecuación, ya que su orden de magnitud es pequeño comparado con los demás sumandos; luego:

$$h_{ij} = \left(f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} + \sum K_{mij} \right) \frac{Q_{ij}^2 + 2Q_{ij}\Delta Q_i}{2gA_{ij}^2}$$

Ahora, utilizando la Ecuación 8 se tiene que:

$$\sum_{j=1}^{NTi} \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) + 2\Delta Q_i \sum_{j=1}^{NTi} \frac{Q_{ij}}{2gA_{ij}^2} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) = 0$$

Despejando ΔQ_i se obtiene la siguiente ecuación para el cálculo del factor de corrección de caudales en cada uno de los ciclos de cálculo:

$$\Delta Q_i = - \frac{\sum \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) Q_{ij}^2 / A_{ij}^2}{2 \sum \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) Q_{ij} / A_{ij}^2} \quad \text{Ecuación 9}$$

Esta última ecuación también puede ser escrita en la siguiente forma:

$$\Delta Q_i = - \frac{\sum (h_{lij} + \sum h_{mij})}{2 \sum \left(\frac{h_{lij} + \sum h_{mij}}{Q_{ij}} \right)} \quad \text{Ecuación 10}$$

3.3.3.1. Método de Hardy-Cross con corrección de caudales: pasos que se deben seguir en el análisis

El análisis de una red de distribución de agua según el método de Hardy-Cross con corrección de caudales en los circuitos propone los pasos siguientes:

1. Se define claramente la geometría de la red, identificando en forma coherente los nodos y los circuitos.
2. Si existe más de un nodo con cabeza constante (tanque en la red o embalse), es necesario conectarlos en pares por medio de tuberías hipotéticas que pueden ser representadas por líneas punteadas. En estas tuberías hipotéticas se deben suponer diámetros, longitudes y rugosidades absolutas, de tal manera que se pueda calcular el caudal correspondiente a las diferencias de nivel entre los diferentes pares de embalses o tanques. En las correcciones de caudales, los tubos hipotéticos *no* deben ser incluidos, lo cual sí debe hacerse en el cálculo de las pérdidas de cabeza (por fricción y por accesorios).
3. Se suponen todos los diámetros de la tubería que conforman la red. Tal paso convierte este método en un proceso de comprobación de diseño.
4. Se supone que la red está compuesta por circuitos cerrados en cualquier orden. Con el fin de acelerar la convergencia se puede suponer que los tubos de diámetros grandes forman circuitos independientes. Se deben utilizar tantos circuitos como sea necesario para asegurar que todos los tubos queden incluidos en por lo menos un circuito.
5. Se supone el caudal a partir de cualquiera de las tuberías de la red. Luego se procede alrededor del circuito que contiene esta tubería para calcular los caudales en las demás tuberías que conforman el circuito teniendo en cuenta los caudales que salen de las uniones (caudales negativos) y los que entran a ellas (caudales positivos). Si los flujos hacia o desde otro circuito son desconocidos, se deben suponer los caudales correspondientes. Esto significa que se deben hacer tantas suposiciones de caudales como circuitos existan en la red que se está analizando. Cuanto mejores sean estas suposiciones más rápidamente convergerá el método. La experiencia ayuda mucho en este aspecto.
6. Se calcula la pérdida de cabeza en cada tubería de la red utilizando la siguiente ecuación (de Darcy-Weisbach), si bien podría emplearse cualquier ecuación de resistencia fluida, tal como la de Hazen-Williams:

$$\sum_{j=1}^{NTi} \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) + 2\Delta Q_i \sum_{j=1}^{NTi} \frac{Q_{ij}}{2gA_{ij}^2} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) = 0$$

$$h_{lij} + \sum h_{mij} = \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

El factor de fricción se calcula utilizando la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{K_s}{3,7d} \right) \frac{2,51}{Re \sqrt{f}}$$

- Se calcula la pérdida neta de cabeza alrededor del circuito, es decir, se suman las pérdidas de cabeza y restando las "adiciones" de cabeza siempre medidas en el sentido de las agujas del reloj. Si la pérdida neta de cabeza no es cero, se procede a corregir los caudales de cada una de las tuberías del circuito mediante la Ecuación 10:

$$\Delta Q_{ij} = \frac{\sum (\sum h_{lij} + \sum h_{mij})}{2 \sum \left(\frac{h_{lij} + \sum h_{mij}}{Q_{ij}} \right)} \quad \text{Ecuación 12}$$

Si en alguna de las tuberías del circuito existe una bomba centrífuga se debe restar la cabeza generada por ésta de las pérdidas en la tubería antes de hacer el cálculo de la corrección de caudales ΔQ_{ij} :

$$\sum (\sum h_{lij} + \sum h_{mij})$$

- Los pasos 5 a 8 se repiten para todos los circuitos teniendo en cuenta los caudales corregidos en los circuitos calculados previamente.
- Los pasos 5 a 9 se repiten hasta que el balance de cabezas alrededor de todos los circuitos (ecuación de conservación de la energía) llegue a valores razonablemente cercanos a cero. Este criterio de convergencia es fijado por el diseñador de acuerdo con las características de la red que esté analizando.

3.3.4. MÉTODO DE HARDY-CROSS CON CORRECCIÓN DE CABEZAS

Ésta es una modificación al método de Hardy-Cross hecha por R. J. Cornish (1939-1940) la cual, en esencia, es muy similar al método de balance de cantidad utilizado para el diseño y la comprobación de diseño en el caso de redes abiertas, visto en el capítulo anterior.

El método de Hardy-Cross con corrección de cabezas se utiliza para resolver las ecuaciones de cabeza como las establecidas anteriormente. De nuevo se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach para el cálculo de las pérdidas por fricción, aunque se podría recurrir a cualquier ecuación de resistencia fluida. Las ecuaciones del método son, por consiguiente:

$$\sum_{j=1}^{NTi} \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) + 2\Delta Q_i \sum_{j=1}^{NTi} \frac{Q_{ij}}{2gA_{ij}^2} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) = 0$$

$$H_j - H_i = \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right)$$

$$Q_{ij} = \left[\frac{H_j - H_i}{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}} \right]^{\frac{1}{2}} \sqrt{2g} A_{ij} \quad \text{Ecuación 3}$$

En vez de suponer los caudales en cada uno de los tubos de la red, esta variación supone la cabeza en cada uno de los (Nu-1) nodos de ésta (la cabeza en uno de los nodos es conocida o en su defecto tiene que ser supuesta por el diseñador). Luego se ajustan las cabezas supuestas, nodo por nodo, hasta completar todos los nodos de la red. El proceso se repite hasta que la ecuación de continuidad llega a valores "10 suficientemente cercanos" a cero en todos los nodos. Esta cercanía es fijada por el diseñador de acuerdo con su criterio y con la red que se esté diseñando.

El factor que se utiliza para corregir las cabezas en cada uno de los nodos se calcula tal como se explica a continuación. Si se supone que la cabeza H_i del nodo está subestimada o sobrestimada, la Ecuación 3 se convierte en:

$$Q_{ij} = \left[\frac{((H_j - H_i) - \Delta H_i)}{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}} \right]^{\frac{1}{2}} \sqrt{2g} A_{ij} \quad \text{Ecuación 12}$$

De donde se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q_{ij} = \frac{\sqrt{2g} A_{ij}}{\left[\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right]^{\frac{1}{2}}} \left((H_j - H_i) - \Delta H_i \right)^2 \quad \text{Ecuación 13}$$

Si se toma el último término de la derecha de la Ecuación 13 y se utiliza el teorema del binomio se obtiene:

$$\begin{aligned} & \left| \left((H_j - H_i) - \Delta H_i \right) \right|^{1/2} \\ &= (H_j - H_i)^{1/2} - \frac{1}{2} (H_j - H_i)^{-1/2} \Delta H_i + \frac{1}{8} (H_j - H_i)^{-3/2} \Delta H_i^2 \\ & \quad - \frac{1}{16} (H_j - H_i)^{-5/2} \Delta H_i^3 + \frac{5}{128} (H_j - H_i)^{-7/2} \Delta H_i^4 + \dots \end{aligned}$$

Al eliminar los términos que involucran las potencias altas de ΔH_i , ya que son muy pequeños en comparación con los demás términos, se llega a:

$$\left| \left((H_j - H_i) - \Delta H_i \right) \right|^{1/2} = (H_j - H_i)^{1/2} - \frac{1}{2} (H_j - H_i)^{-1/2} \Delta H_i \quad \text{Ecuación 14}$$

Luego, al remplazar esta última ecuación en la Ecuación 13 se obtiene:

$$Q_{ij} = \frac{\sqrt{2g} A_{ij}}{\left[\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right]^{\frac{1}{2}}} (H_j - H_i)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} (H_j - H_i)^{-\frac{1}{2}} \Delta H_i$$

Para todas las tuberías que llegan al nodo i se puede plantear la siguiente ecuación:

$$\sum_{j=1}^{NTi} Q_{ij} - Q_{Di} = 0$$

Si se reemplaza los Q_{ij} se llega a:

$$\sum_{i=1}^{NTi} \left[\frac{H_j - H_i}{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}} \right]^{\frac{1}{2}} \sqrt{2g} A_{ij} - Q_{Di} = 0 \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\sum_{j=1}^{NTi} \left[\left[\frac{H_j - H_i}{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}} \right]^{\frac{1}{2}} \sqrt{2g} A_{ij} - \frac{(H_j - H_i)^{-\frac{1}{2}} \Delta H_i}{2 \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right)^{1/2}} \sqrt{2g} A_{ij} - Q_{Di} \right] = 0$$

En esta última ecuación se pueden identificar con facilidad los caudales Q_{ij} en cada una de las tuberías.

Luego:

$$\sum_{j=1}^{NTi} Q_{ij} - Q_{Di} - \frac{\Delta H_i}{2} \sum_{j=1}^{NTi} \frac{Q_{Di}}{H_j - H_i} = 0$$

Finalmente, al despejar el factor de corrección para las cabezas en los nodos de la red se obtiene:

$$\Delta H_i = \frac{\Delta H_i \left(\sum Q_{ij} - Q_{Di} (+Q_{ei}) \right)}{\sum \frac{Q_{ij}}{(H_j - H_i)}} \quad \text{Ecuación 15}$$

En esta última ecuación, cada uno de los caudales Q_{ij} se calcula teniendo en cuenta las cabezas estimadas o las ya corregidas en uniones anteriores. Por supuesto, estas últimas se calculan de acuerdo con:

$$H_{ik} = H_{jk-1} + \Delta H_i \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde los subíndices k y $(k-1)$ indican la iteración que se está haciendo y la iteración anterior. Ahora, la ecuación que se utiliza para el cálculo de los caudales sigue siendo la Ecuación 3:

$$Q_{ij} = \left[\frac{H_j - H_i}{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}} \right]^{\frac{1}{2}} \sqrt{2g} A_{ij} \quad \text{Ecuación 3}$$

En caso de que en alguna de las tuberías que conforman la red exista una bomba roto dinámica, la cabeza adicional introducida por ésta afecta el caudal respectivo. Si la ecuación de la bomba es de la forma:

$$H_B = AQ_{ij}^2 + BQ_{ij} + C$$

Entonces, para la tubería ij se debe cumplir la siguiente ecuación:

$$H_j - H_i = f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} + \left(\sum K_{mij} \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} - (AQ_{ij}^2 + BQ_{ij} + C) \right) \quad \text{Ecuación 17}$$

Dado que esta ecuación es de la forma:

$$aQ_{ij}^2 + bQ_{ij} + c$$

Q_{ij} podrá calcularse fácilmente.

3.3.4.1. Método de Hardy-Cross con corrección de cabezas: pasos que se deben seguir en el análisis

El análisis de una red de distribución de agua según el método de Hardy-Cross con corrección de cabezas en los nodos de la red propone los pasos siguientes:

1. Se define claramente la geometría de la red identificando en forma coherente los nodos y los circuitos.
2. Se supone la cabeza piezométrica en cada uno de los nodos de la red, excepto en aquellos en los que la cabeza sea fija (debe existir al menos un nodo con esta característica). Cuanto mejor sea -la estimación inicial de estas cabezas más rápidamente convergerá el método.

3. Se calcula el caudal en cada una de las tuberías mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{ij} = \left[\frac{H_j - H_i}{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}} \right]^{\frac{1}{2}} \sqrt{2g} A_{ij} \quad \text{Ecuación 3}$$

El factor de fricción f de Darcy se calcula utilizando la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{K_s}{3,7d} \right) \frac{2,51}{Re \sqrt{f}}$$

Y algún método numérico, ya que el número de Reynolds Re es función del caudal

4. Se calcula la ecuación de continuidad para alguno de los nodos. Si ésta no arroja un resultado razonablemente similar a cero, se debe corregir la cabeza en este nodo utilizando la Ecuación 15:

$$\Delta H_i = \frac{\Delta H_i (\sum Q_{ij} - Q_{Di} (+Q_{ei}))}{\sum \frac{Q_{ij}}{(H_j - H_i)}} \quad \text{Ecuación 15}$$

Los caudales Q_{ij} y las cabezas $(H_j - H_i)$ se consideran positivos si se dirigen hacia el nodo respectivo, es decir, si el caudal entra al nodo y si H_j es mayor que H_i .

5. Se corrige la cabeza en cada uno de los nodos de cabeza variable de la red, es decir, repetir los pasos 3 y 4 para cada nodo.
6. El proceso se detiene en el momento en que la suma de caudales en cada nodo sea razonablemente similar a cero. El margen de error en esta aproximación debe ser fijado por el diseñador de acuerdo con su experiencia y con la red que se esté analizando. En caso de que alguno de los nodos no cumpla con esta condición se deben repetir los pasos 3, 4 y 5.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

3.3.5. COMPARACIÓN ENTRE LAS DOS FORMAS DEL MÉTODO DE HARDY-CROSS

La principal ventaja del método de Hardy-Cross con corrección de caudales estriba en que requiere menos iteraciones para llegar al mismo grado de convergencia, especialmente si el sistema se encuentra muy desbalanceado por las condiciones iniciales supuestas.

El análisis con corrección de cabezas converge más lentamente debido a que las correcciones de caudales se hacen en una tubería cada vez, mientras que en el otro método se corrigen todos los caudales del circuito en forma simultánea. Sin embargo, el análisis con corrección de cabezas tiene una gran ventaja: la preparación de los datos iniciales. Es muy fácil suponer las cabezas inicialmente; en cambio suponer los caudales en cada tubería y que éstos cumplan con la ecuación de conservación de la masa (continuidad) en cada nodo puede ser un proceso complicado, además de lento. El esfuerzo requerido en la preparación de los datos y su interpretación inicial acaba pronto con la ventaja de convergencia rápida del método con corrección de caudales, lo cual es especialmente cierto cuando el análisis se realiza con ayuda del computador; unas cuantas iteraciones extra hoy en día significan unos pocos segundos adicionales de proceso.

Por otro lado, el diseño de redes de acueducto utilizando los métodos de análisis de redes cerradas es un proceso, en esencia, de prueba y error, ya que no se conocen los diámetros. En ocasiones es necesario cambiar varias veces los diámetros para llegar a un buen diseño. Este hecho hace que el cálculo de los caudales iniciales sea un proceso tedioso. Por esta razón es más útil el método de Hardy-Cross con corrección de cabezas.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

3.3.6. EPANET v2

Al objeto de satisfacer los requerimientos de las normativas, así como los deseos de los usuarios, las compañías que gestionan los servicios de agua han manifestado una necesidad creciente por comprender mejor el avance y las transformaciones que experimenta el agua tratada, cuando se introduce en las redes de distribución. EPANET es un modelo de simulación por computador que ayuda a cumplir este objetivo. Predice el comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en un sistema de distribución de agua durante periodos de operación prolongados (Rossman, 2000).

EPANET es un programa orientado al análisis del comportamiento de los sistemas de distribución de agua y el seguimiento de la calidad del agua en los mismos, que ha tenido una gran aceptación en España, y en todos los países de habla hispana, desde su lanzamiento en Europa en Septiembre de 1993. Ello se debe principalmente al excelente trabajo realizado por su autor L. Rossman, quien ha sabido conjugar los algoritmos de cálculo más avanzados con una interfaz gráfica potente y amigable. También han influido en su difusión otros factores, como la posibilidad de integrar el módulo de cálculo en otras aplicaciones, el soporte dado por la EPA para su distribución gratuita, y la existencia de una lista abierta de usuarios para realización de todo tipo de consultas y puesta al día. Además, su difusión en los países de habla hispana ha estado potenciada por las sucesivas traducciones realizadas por quien suscribe, desde la versión 1.1b lanzada en Noviembre de 1994, hasta la más reciente.

Ahora bien, es posible obtener el manual y la información necesaria del programa EPANET a través de la red, ya que está en forma gratuita lo cual facilita el acceso a la información. Este es un software desarrollado por la División de Recursos y Suministro de Agua EPA en los Estados Unidos, desarrolla los modelos de los sistemas de tuberías de distribución de agua y realiza un prolongado período de simulación del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de tuberías a presión (Ni-Bin, Natthaphon, & Andrew, 2012).



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

Entre la multitud de aplicaciones de EPANET cabe destacar la planificación de mejoras en las redes, el trazado y selección de nuevos elementos, la detección de los 'cuellos de botella' de la red, la evaluación de la calidad y tiempo de vida de los materiales, la regulación de las presiones en la red, la reducción de los costes de operación, la regulación del uso de los depósitos para reducir los tiempos de retención del agua, la previsión de la respuesta de la red ante la clausura de un punto de alimentación o la incorporación de nuevas urbanizaciones, la planificación de actuaciones en casos de emergencia, como la entrada de un contaminante no controlado, la localización de estaciones de re cloración, la sectorización de la red para el control de fugas, etc.

La necesidad de mejorar la calidad del agua suministrada y de optimizar las operaciones implicadas en ello, ha ido incorporando el uso de nuevas técnicas como la informática y la automática en la gestión y control de los sistemas hidráulicos. Debido a esto, el uso de modelos matemáticos se ha generalizado y actualmente abarca todos los sistemas del ciclo del agua. Los modelos se utilizan en el estudio y desarrollo de proyectos de mejora o revisión de las instalaciones (modelos de análisis y diseño) o de su explotación diaria (modelos operacionales).

Para la confección de estos modelos se necesita un programa de cómputo que permita simular los diferentes elementos de la red y un algoritmo de cálculo rápido y confiable a fin de que puedan generar y ajustar los balances hídricos en el menor tiempo posible con la mayor confiabilidad. Existen en el mercado, diversos software que cumplen estas características entre los que están el PICCOLO de la Safege (Francia), EPANET de la USEPA (EUA), KYPIPE de la Universidad de Kentucky (EUA), el STONER de *Stoner Workstation Services* (EUA) y el WaterCAD de *HaestadMethods* (EUA). En Cuba se han creado el DYSCAD y el RED de la EIPHH, el ROKO del ISPJAE y el ADOSA del CEDICO. (Alfonso Fleites, 2002)

EPANET es una aplicación que realiza simulaciones en periodo extendido (o cuasi estático) del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes y tuberías a presión;



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

permitiendo seguir la evolución del flujo del agua en las tuberías, la presión en los nudos de demanda, el nivel del agua en los depósitos y la concentración de cualquier sustancia a través del sistema de distribución durante un período prolongado de simulación. Además de las concentraciones, permite determinar el tiempo de permanencia del agua en la red y su procedencia desde los distintos puntos de alimentación.

En EPANET se coordina la modelación del comportamiento hidráulico de la red y la calidad del agua, el programa se ha concebido para obtener simultáneamente la solución de ambos problemas. Sin embargo, como alternativa, puede también calcular solamente la parte hidráulica y almacenar los resultados en un fichero, o utilizar un fichero hidráulico previamente almacenado para llevar a cabo una simulación de la calidad del agua.

EPANET ha sido desarrollado por la Agencia de protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos de América (USEPA por sus siglas en inglés), y es utilizado por diversas compañías del sector del agua como programa de cómputo para la simulación y modelo de redes hidráulicas. Entre sus principales ventajas está un módulo de cálculo confiable y facilidades para simular elementos de la red como son válvulas, bombas, tanques, etc. permitiendo que estos elementos trabajen siguiendo normas fijadas por el usuario y vinculadas al comportamiento de la red en cada momento, como puede ser el ejemplo de bombas que arrancan y paran de acuerdo al nivel en un tanque, o válvulas que operan a horas predeterminadas. Por otra parte, permite trabajar con el sistema de unidades internacionales o inglesas, además, está diseñado para utilizar cualquiera de las tres principales ecuaciones de cálculo (Hazen-Williams, Darcy-Weisbach y Chezy-Manning para tubería llena).

Otra ventaja significativa es que EPANET permite el intercambio de ficheros con aplicaciones GIS (Sistemas de Información Geográfica), estas aplicaciones vinculan información gráfica con bases de datos de los componentes de la red y los usuarios, así como otros parámetros importantes, que son utilizados para realizar análisis hidráulicos.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

Entre los inconvenientes de este software está el poco amigable sistema de entrada de datos, que en una primera versión difundida en Cuba requiere la creación de un complejo fichero de texto con formato específico. En la versión 2 del 2000 esta dificultad trata de ser mejorada sin que sea definitivamente resuelta. Otro aspecto es que EPANET realiza análisis hidráulicos pero no permite el diseño automático de tramos o sectores de la misma, lo que limita su utilización en el área de proyectos e investigaciones. (Alfonso Fleites, 2002)

3.4. MARCO LEGAL

Las normas a las que se aferra la habilitación de la red de Cross son las ilustradas en el RAS 2000 en la sección II título B que trata sobre los sistemas de acueducto, y cuyo alcance es fijar los criterios básicos y requisitos mínimos que deben cumplir las redes de distribución de agua en los diferentes procesos involucrados en su desarrollo, tales como la conceptualización, el diseño, la construcción, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento en cuanto a los sistemas de acueducto, alcantarillado y saneamiento básico, con el fin de garantizar seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad, eficiencia, sostenibilidad y redundancia en las captaciones dentro de un nivel de complejidad determinado (RAS, 2000).

El RAS 2000 es un reglamento en el cual se definen los límites entre lo que está permitido y lo que no, es un punto de referencia para la adopción de buenas prácticas. El infringir alguno de estos lineamientos pactados en este código trae consecuencias de tipo socio-económico, permitiendo sobrecostos y mayor costo que se adjuntan al valor de los contratos, de aquí su importancia y su uso, que es de carácter general. Al inicio de cada uno de los títulos que componen el reglamento se presenta un listado con el código y la descripción breve del contenido de las Normas Técnicas Colombianas e internacionales tanto expedidas por el ICONTEC, por la AWWA y por la ASTM. Son varias las normas que componen el reglamento, de las cuales se encuentran directamente relacionadas a la habilitación del laboratorio las Normas NTC 3358 y ASTM D 2122 que tratan sobre el



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

dimensionamiento de las tuberías, además de la NTC 1063 que abarca la Medición de agua en conductos cerrados y se encuentra dividida en tres partes. Parte 1: Especificaciones. Parte 2: Requisitos para su instalación. Parte 3: Equipos y métodos de ensayo. De estas normas se pueden observar cuales son los procedimientos y recomendaciones a seguir cuando se proceda a instalar los equipos, además de analizar el estado general del sistema, proporcionando los parámetros respectivos a seguir en el caso del manómetro diferencial, las válvulas, tuberías y demás instrumentos instalados en todo el sistema que ayudaran con el cálculo de los parámetros característicos de la práctica.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

4. METODOLOGÍA

La presente investigación se caracteriza por llevarse a cabo con la combinación de enfoques investigativos (cualitativo y cuantitativo) surgiendo así una investigación mixta. Señalamos entonces que de la combinación de los enfoques utilizamos faces similares y relacionadas entre sí:

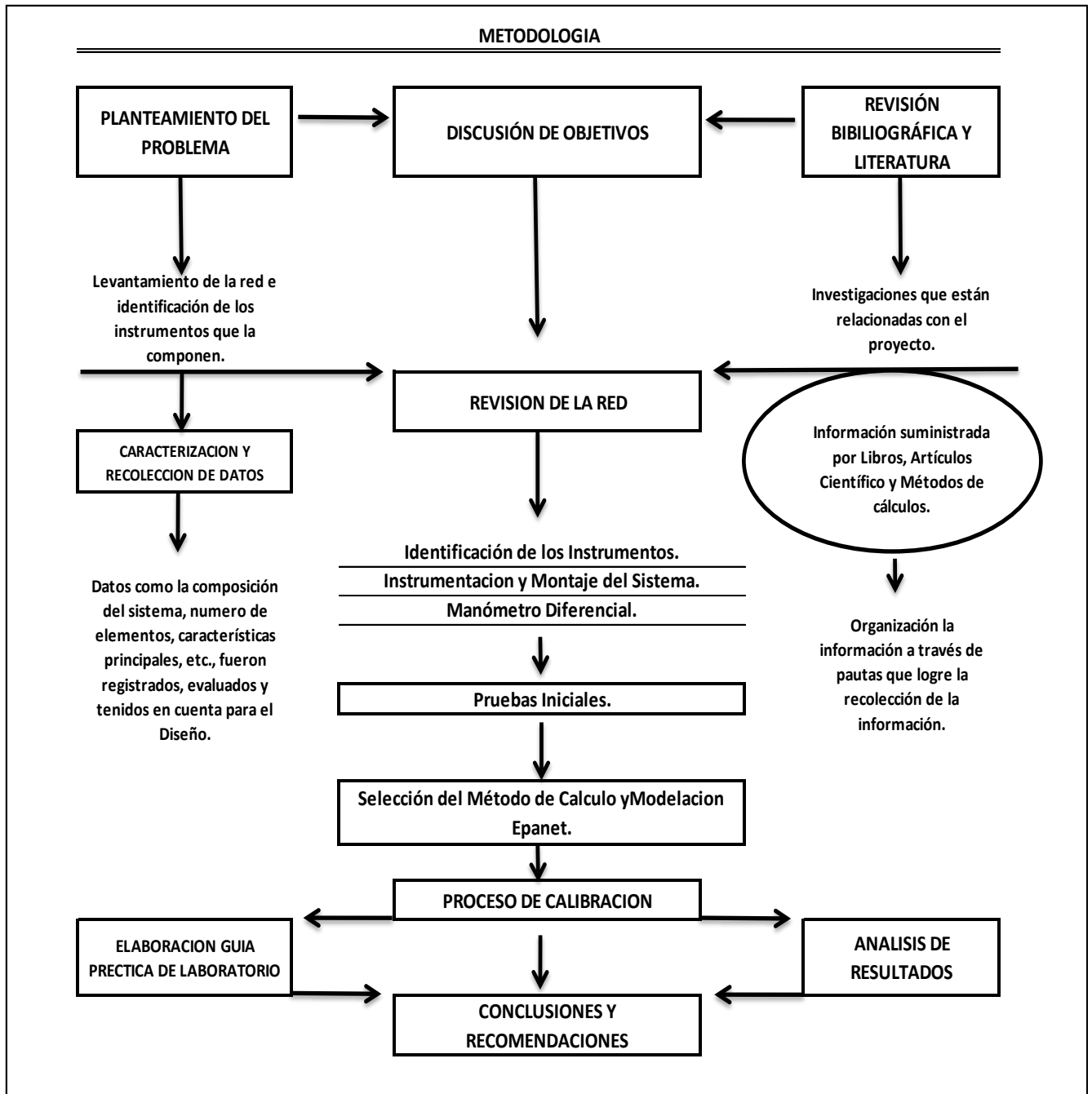
- a) Llevar acabo observaciones y evaluación de fenómenos.
- b) Establecer suposiciones o ideas como consecuencia de la observación y evaluación realizadas.
- c) Probar y demostrar el grado en que las suposiciones o ideas tienen fundamento.
- d) Revisar tales suposiciones o ideas sobre las bases de las pruebas o del análisis.
- e) Proponer nuevas observaciones y evaluaciones para establecer, modificar, cimentar y/o fundamentar las suposiciones o ideas.

Visitas al laboratorio, inventario de materiales que hacen parte de la práctica, investigaciones afines, toma de datos (en total se realizaron siete pruebas para las tres salidas de flujos según el número de combinaciones posibles evaluando Caudales, Velocidades y Presiones) y sus respectivas tabulaciones, también la implementación de EPANET V2 para modelación de los datos y sobre todo el análisis de los resultados que fueron obtenidos en el transcurso de la experiencia en el laboratorio son algunas de las actividades que encierra esta investigación.

Es importante aclarar que gran parte de los puntos objetivos alcanzados fueron realizados dentro del Laboratorio de Hidráulica de la universidad de Cartagena en el Campus Piedra de Bolívar y llevadas a cabo dentro el segundo periodo del 2014 y primero del 2015.

Para alcanzar la habilitación del laboratorio de redes, se realizaron en forma cronológica actividades como se muestran en la Ilustración 2 y se describen cada uno de estas actividades.

Ilustración 2. Diagrama de Flujo. Metodología.





PROGRAMA DE ING. CIVIL.

4.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y LITERATURA

Dentro de este análisis nos dedicamos a conocer no solamente los componentes que posee el laboratorio sino también los estudios que se realizaron sobre este, además de indagar que investigaciones están relacionadas con el proyecto, de esta forma se planteó como primera medida el estudio de los temas relacionados con el sistema, y la información obtenida o suministrada por libros como el de Hidráulica de tuberías (Saldarriaga V., 1998), a través de la internet haciendo uso de enciclopedias multimedia y artículos científicos, ubicados en las diferentes bases de datos a las cuales se tienen acceso por medio del sitio web de la Universidad de Cartagena.

Se hizo el estudio del programa EPANET v2.0 para el diseño de redes de tuberías y como la habilitación de la red pretende el estudio de presiones y velocidades, esta herramienta nos permitió calcular en forma eficiente la medición de estos parámetros.

También se realizó una revisión de los distintos métodos ligados al cálculo de redes (tuberías a presión).

En la Tabla 1 que a continuación se ilustra, observamos los diferentes temas tratados dentro del documento y tenidos en cuenta para enriquecer la investigación.

Tabla 1. Revisión Bibliográfica y Literatura.

N°	TEMA	DESCRIPCION	RELACION E IMPORTANCIA
1	ANÁLISIS DE REDES DE TUBERÍAS. REDES CERRADAS	A lo largo del capítulo se presentan los métodos más utilizados en el análisis y diseño. En orden cronológico se presentarán los siguientes métodos de análisis y diseño de redes cerradas. <ul style="list-style-type: none"> • Método de Hardy-Cross con corrección de caudales en los circuitos • Método de Hardy-Cross con corrección de cabezas en los nodos • Método de Newton-Raphson 	Esto obedece a dos hechos importantes. El primero es que los métodos más modernos están basados en los más antiguos, los cuales en términos matemáticos son más sencillos pero requieren un mayor número de iteraciones para llegar a un resultado final. Y segundo es que en el mercado existen programas comerciales basados en diferentes métodos de análisis. Por ende es de importancia conocer todos y cada uno de estos métodos.
2	PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE ANÁLISIS DE REDES CERRADAS	Aquí se desglosan todas las consideraciones para diseñar sistemas de distribución de agua para suministrar agua potable, basándose en el Análisis de la red de tuberías que implica el proceso que busca la determinación del caudal asociada a cada nodo.	Mas de 12 ecuaciones y alrededor de 15 pasos para el análisis de una red cerrada fundamentan y relacionan por completo este tema con la investigación. Nos ayuda comprender y a profundizar en el análisis de lo que concierne a la habilitación de la Red de Cross.
3	MÉTODO DE HARDY-CROSS CON CORRECCIÓN DE CAUDALES	El método es para resolver las ecuaciones principales desarrollado por el ingeniero norteamericano H. Cross en 1936. El método original se basa en suponer los caudales en cada uno de los tubos de la red e ir corrigiendo esta suposición. Dado que todas las características de la tubería (d, Ks, ΣKm , l) se conocen, el método es un proceso de comprobación de diseño.	Siendo el laboratorio una red de Cross, este método nos enseña en este parte del documento todo lo relacionan al calculo y correcciones de caudales dentro una red, no solo eso si no guías para un mejor análisis de la red.
4	MÉTODO DE HARDY-CROSS CON CORRECCIÓN DE CABEZAS	Ésta es una modificación al método de Hardy-Cross hecha por R. J. Cornish (1939-1940) la cual, en esencia, es muy similar al método de balance de cantidad utilizado para el diseño y la comprobación de diseño en el caso de redes abiertas, visto en el capítulo anterior.	El método de Hardy-Cross con corrección de cabezas se utiliza para resolver las ecuaciones de cabeza como las establecidas por el mismo método. He aquí la importancia de este con la investigación, ya que acrecienta y complementa para un mejor análisis de la red.
5	COMPARACIÓN ENTRE LAS DOS FORMAS DEL MÉTODO DE HARDY-CROSS	Se muestra una comparación entre los métodos antes mencionados y donde se dan a conocer ventajas y desventajas de cada uno de ellos.	Poder conocer a ciencia cierta que método es mas favorable para la investigación y su posible aprovechamiento ahondando su investigación sobre si. La elección de un método mas favorable para las condiciones que presenta la red del laboratorio.
6	MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON	El método de Newton-Raphson es un método numérico que permite la solución de ecuaciones no lineales o cálculo de raíces de ecuaciones, en forma rápida y segura; las ecuaciones pueden ser explícitas o no explícitas: $f(x) = 0$ explícita $g(x) = x$ no explícita Es decir $f(x) = g(x) - x$	Aquí el objetivo es diseñar sistemas de distribución de agua para suministrar agua potable, basándose en el Análisis de la red de tuberías que implica el proceso que busca la determinación del caudal y la presión asociada a cada nodo, esta investigación la realizaron mediante la simulación de modelos por medio de métodos, tales como el de Newton Raphson (NR)
7	EPANET v2	EPANET es un programa orientado al análisis del comportamiento de los sistemas de distribución de agua y el seguimiento de la calidad del agua en los mismos. Es una gran herramienta para el estudio de sistemas de redes de tuberías a presión desarrollado para redes de tuberías de agua con todos los parámetros y características que componen los modelos de simulación hidráulica.	Entre la multitud de aplicaciones de EPANET cabe destacar primordialmente la recopilación de datos, la planificación de mejoras en las redes, el trazado y selección de nuevos elementos, la detección de los cuellos de botella de la red, la evaluación de la calidad y tiempo de vida de los materiales, la regulación de las presiones en la red, la reducción de los costes de operación, la regulación del uso de los depósitos para reducir los tiempos de retención del agua, la previsión de la respuesta de la red ante la clausura de un punto de alimentación o la incorporación de nuevas urbanizaciones, la planificación de actuaciones en casos de emergencia, como la entrada de un contaminante no controlado, la localización de estaciones de re cloración, la sectorización de la red para el control de fugas, etc.
8	CONCEPTOS BÁSICOS	En esta parte del documento se darán a conocer varios conceptos ligados a al estudio de tuberías de distribución de agua potable propios del tema de investigación. Definiciones tales como: Presión, Manómetros, Bombas, Válvulas, tanques, etc.,.	Siendo conceptos propios del tema de investigación, es de mucha importancia mencionarlos y tenerlos siempre presente para no tener confusiones ni duda alguna al respecto dentro de lo concerniente a la investigación.



4.2. REVISIÓN DE LA RED

El montaje de la red estaba sujeto a los elementos ubicados en el laboratorio y del estado en el que se encontraban, por tal razón las dos actividades que se realizaron en esta etapa fueron el levantamiento de la red de Cross e identificación del estado de los instrumentos que la componían.

El diseño final de la red es el mismo que el anterior. No se tocaron los parámetros de diseño originales.

Dentro de esta revisión se llevaron a cabo dos actividades principales; la identificación de los instrumentos, que por medio de un inventario dimos con la totalidad de los elementos que componen el laboratorio pero sobre todo el estado en que se encontraban. También se elaboró una instrumentación o equipamiento partiendo del paso anterior.

En esta etapa se examinaron el estado de operación del tanque de almacenamiento en el cual se realizaran pruebas experimentales para medir el caudal que entra y sale de la red, la bomba centrífuga que se encarga de bombear el agua proveniente del tanque de almacenamiento hacia la red, se le realizaron 5 pruebas iniciales en distintos puntos de la Red con el fin de determinar el estado y el caudal que puede bombear esta, y las tuberías de P.V.C. unidas por los accesorios del mismo material (codo o tee), también cobijados en el análisis. Para el estudio de presiones y velocidades se encuentran instalados en los nodos ductos dirigidos al manómetro, estos ductos son controlados por válvulas las cuales garantizan que los datos obtenidos en el manómetro sean los indicados, a estos equipos complementarios también se les enumeró y se tuvieron en cuenta en el estudio que permitió saber el estado en el que se encontraron dichos instrumentos; la finalidad de esta actividad fue analizar todos los materiales que hacen parte de la Red de Cross.

La Ilustración 3 nos muestra una panorámica del laboratorio y las condiciones en las que se observa.



Ilustración 3. Diseño de la red. Fotografía tomada en el laboratorio de hidráulica.

4.2.1. IDENTIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS.

Para la puesta en marcha del laboratorio era de vital importancia la identificación de los elementos y/o instrumentos que lo componían, para esto dentro de las muchas visitas realizadas al laboratorio de Hidráulica fue elaborado un inventario detallado de todos y cada una de estos elementos. Para esto se implementó un cuadro con el cual se realizó el registro de todos los materiales y equipos, registrando de este modo cinco datos característicos que nos ayudan a la identificación clara de los elementos. Nombre de elemento, unidad de medida, cantidad, características y observaciones. En este último mencionado se registró el estado en que fue encontrado el elemento al momento de realizado el levantamiento.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

4.2.2. INSTRUMENTACIÓN Y MONTAJE DEL SISTEMA.

Para la instrumentación se tuvo siempre presente los puntos de mal funcionamiento que se identificaron con el levantamiento e inventario y se trabajó directamente sobre estos.

Según requerimientos del sistema se realizó entonces la reparación de equipos existentes y la consecución e instalación de equipos nuevos para reemplazar aquellos en mal estado y sin opción de arreglo.

Luego entonces, para llevar a cabo esta operación se realizaron pasos descritos a continuación que ayudaron a la dotación ideal del sistema:

- La limpieza de equipos del laboratorio.
- Adecuación de espacio para los trabajos.
- Cambio de accesorios dañados por nuevos adquiridos.
- Mejora de equipos usados.
- Implementación de nuevos equipos.

4.2.3. MANÓMETRO DIFERENCIAL.

El manómetro diferencial tomó un papel importante en esta etapa del proyecto, este elemento o equipo que desde un principio por ser parte esencial del laboratorio, necesitaba ser tratado de manera especial.

Por este mismo hecho se realizaron las investigaciones concernientes para identificar el manómetro a usar en el sistema que garantizar el funcionamiento de manera óptima. Detectar presiones muy bajas, caratula amplia, máxima presión resistida, entre otras, fueron las características determinadas para la consecución del equipo. Muchas de estas características fueron consideradas por el instrumentista Clemente Venencia ya que las requería el sistema.

Como no se encontró información acerca de este laboratorio realizado en el pasado (perdida de memorias o documentos relacionados con la tesis Redes de tuberías en P.V.C. para el

cálculo del método de Hardy Cross), no fue posible saber cuáles realmente fueron las presiones medidas en esta práctica de laboratorio, sin embargo se realizaron suposiciones referentes a este tema a través de la información suministrada por las personas encargadas del laboratorio y profesores de la facultad, quienes informaron los inconvenientes que este había tenido en el pasado, como es el caso del manómetro diferencial utilizado para registrar las presiones bajas y cuyo líquido manométrico era el tetracloruro de carbono levemente soluble en agua, situación desfavorable para la recopilación de los datos ya que a medida que pasaban los días y se realizaban los ensayos pertinentes, este líquido perdía sus propiedades físico químicas. Con el fin de establecer las presiones de trabajo, se estableció la siguiente suposición

- Se analizó el manómetro diferencial con líquido manométrico de mercurio antes utilizado y ahora deteriorado, el cual presenta una regla con una longitud máxima de 50 cm y que en estado de reposo o de no uso de la Red, presentaba un nivel de mercurio en ambas partes del tubo en U a una altura de 25 cm (de lado y lado), por lo cual fue posible establecer la presión máxima de trabajo de la red suponiendo la situación más crítica o de máxima presión con una diferencia marcada en el manómetro de 50 cm. De acuerdo a esta suposición se tiene lo siguiente:

50cm de mercurio (máxima diferencia registrada en el manómetro en U)

$$50\text{cm} \cdot \frac{1\text{pulg}}{2,54\text{cm}} = 19,69 \text{ pulg Hg}$$

$$19,69 \text{ pulg Hg} \cdot \frac{1 \text{ psi}}{2,036 \text{ pulg Hg}} = 9,67 \text{ psi}$$

$$\rightarrow 50\text{cm de Hg} \approx 10 \text{ psi}$$

Demostrando así que 0,50mca equivalen aproximadamente 10 psi. De esta manera se obtuvo un primer dato para la utilización de un manómetro analógico para comparación y/o verificación de dichas presiones bajas difíciles de registrar por el manómetro de mercurio.

4.3. PRUEBAS INICIALES.

Equipado el laboratorio y listo para poner a prueba, se procedió a realizar la corrida inicial de la Red en periodos de 5 minutos, haciendo las 7 combinaciones posibles de salidas de flujo en la red, controlando la apertura y cierres de válvulas para la variación, válvulas ubicadas en las tuberías que salen de los nodos 4, 11 y 12.

La Ilustración 4 muestra el diseño de la red y la composición de mallas que se forman, también las tres válvulas ubicadas en las tuberías que salen de los nodos 4, 11 y 12 para regular y combinar las salidas de flujo de la red. Teniendo así el número de pruebas según las combinaciones señaladas en la Tabla 2.

Ilustración 4. Red de distribución mallada.

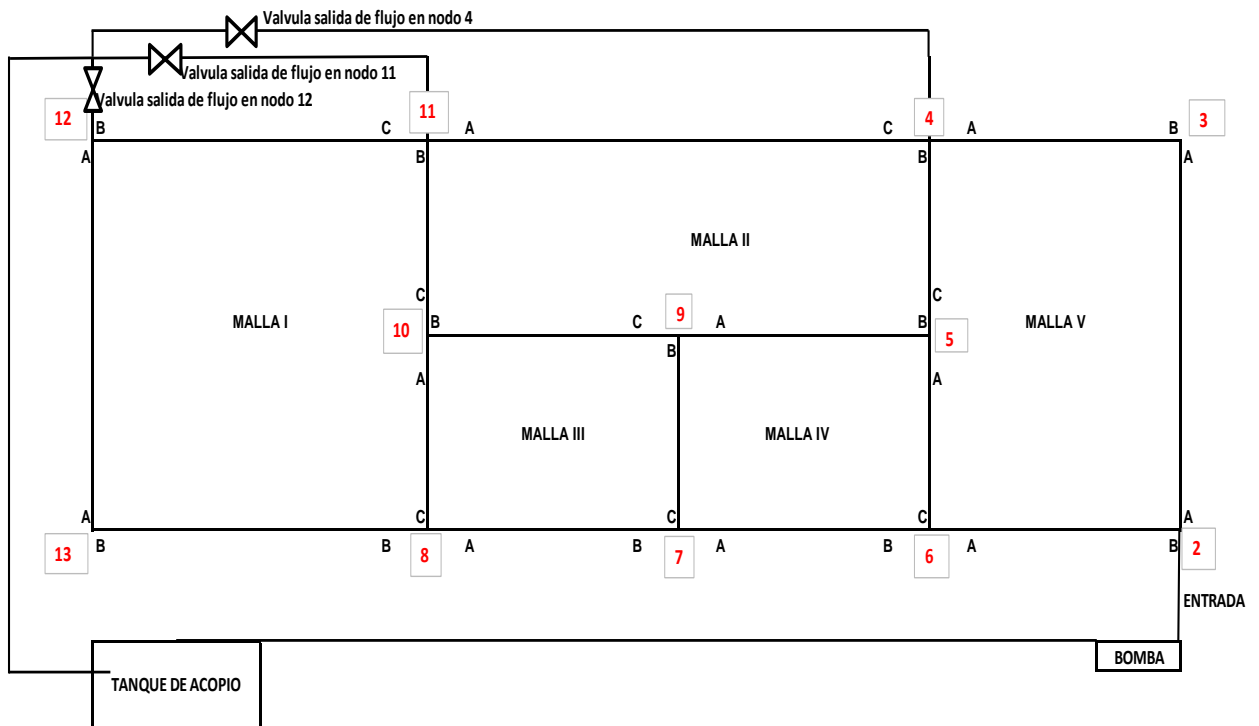


Tabla 2. Número de Pruebas Según Combinación de Salida de Flujo

PRUEBA N°	SALIDA DE FLUJO EN NODO 4		SALIDA DE FLUJO EN NODO 11		SALIDA DE FLUJO EN NODO 12	
	ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA
1	■		■		■	
2	■			■		■
3	■		■			■
4		■		■	■	
5	■		■			■
6	■			■	■	
7		■	■		■	

Como primera medida se midieron los caudales con un tanque de aforo. Con cronometro en mano se midió el volumen del tanque de aforo al ser llenado en un periodo de cinco (5) segundos aproximadamente. Con las características del tanque (Área de la sección transversal), la altura de lámina de agua y con el tiempo cronometrado se obtiene el caudal. Se realizaron seis aforos de caudales para cada una de las siete combinaciones de salidas de flujo y se obtuvo un promedio de caudales para el estudio de la red. En total para este procedimiento se tomaron 42 datos que fueron tabulados y utilizados para cálculos y análisis.

Todo esto con el fin de determinar el caudal de salida para realizar los cálculos concernientes para el estudio de la red en cuanto a presiones y velocidades.

En la Tabla 3 se muestra el aforo de caudales donde se registró tiempos, altura de lámina de agua, volumen y caudal para una combinación específica. Para este caso la salida de flujo por los nodos 4, 11 y 12. De igual manera se realizó para el resto de combinaciones.

Tabla 3. Aforo de Caudales Prueba 1.

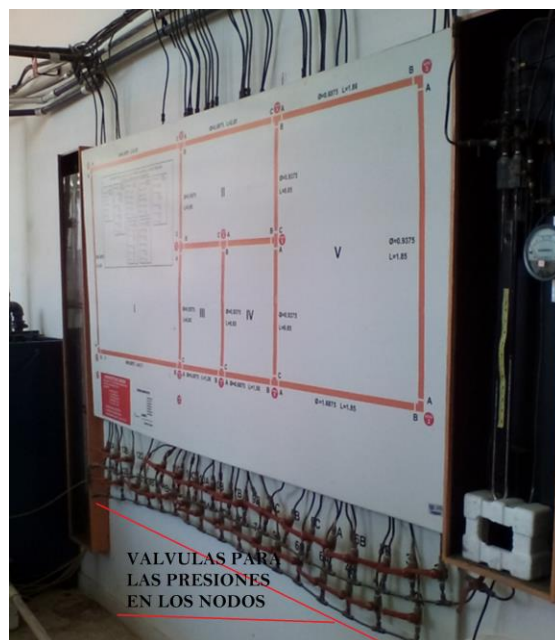
PRUEBA #1/7					
FLUJO EN NODO 4		FLUJO EN NODO 11		FLUJO EN NODO 12	
ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA
CARACTERISTICAS DEL TANQUE DE AFORO		PRESION EN PLATINA DE ORIFICIO		M. C. A. :	0,060
DIAMETRO (m)=	0,32			PSI:	1,10
AREA (m2)=	0,08042477				
CAUDAL CON EL TANQUE DE AFORO					
PRUEBA	TIEMPO (s)	ALTURA TANQUE	VOLUMEN TANQUE	CAUDAL (m3/s)	CAUDAL (L/s)
1	5,10	0,073	0,0058710	0,0011512	1,1511781
2	5,03	0,071	0,0057102	0,0011352	1,1352204
3	5,12	0,067	0,0053885	0,0010524	1,0524335
4	5,28	0,072	0,0057906	0,0010967	1,0967014
5	5,08	0,069	0,0055493	0,0010924	1,0923837
6	5,20	0,077	0,0061927	0,0011909	1,1909053
PROMEDIO	5,14	0,07	0,0057504	0,0011198	1,1198038

Para recopilar los datos de presión en los nodos, estos fueron medidos por medio de los ductos metálicos de 1/4 NPT que se encuentran colocados en cada nodo dirigidos al manómetro diferencial y el conjunto de válvulas debidamente identificadas ubicadas debajo del tablero ilustrativo (tal como se observa en la Ilustración 5), fue posible realizar un análisis de la distribución de presiones a través de la Red para cada tramo compuesto de la tubería, pudiendo identificar los puntos a evaluar en las mallas que componen el sistema.

Se hizo el registro de los datos por medio de una tabla que nos permitía identificar el mallado de la red, los tramos en los que está compuesta la tubería, registrar las presiones tanto del manómetro de mercurio como el manómetro analógico diferencial y el sentido del flujo según las presiones. También se implementó un diagrama del diseño de la red para indicar los sentidos del flujo en la tubería en la medida en que se tomaban las presiones.

Al igual que el procedimiento de los caudales, en este paso también se realizaron las siete pruebas para las combinaciones de salidas de flujo de la red.

Ilustración 5. Válvulas para determinar presiones en nodos.



4.4. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO Y MODELACIÓN EPANET.

Para estudiar la distribución de presiones y velocidades a través de la red se realizó un análisis de redes de tuberías cerradas con el método de Hardy Cross puesto que dicho método es uno de los más reconocidos, enfocados a las redes de tuberías de conducción de agua, también se implementó la modelación con EPANET para garantizar el funcionamiento óptimo del sistema como parámetro comparativo.

El modo en que fueron introducidos los datos y ecuaciones implementando una hoja de cálculo de Excel fue la siguiente:

1. En la primera columna se describen las mallas que componen la Red para el análisis.
2. En la segunda columna los tramos o líneas que componen esas mallas.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

3. En la columna siguiente se tomaron los datos de caudales. La distribución del caudal depende de las hipótesis hechas sobre la distribución del flujo a través de la Red,
4. Las columnas 4 y 5 muestran el diámetro de cada tramo.
5. En las columnas siguientes se emplearon formulas, dependiendo de la celda que las representen. La celda donde se calcula el área de la sección transversal de cada tubería es “Área (m²)”, la velocidad para la celda siguiente, el cálculo del número de Reynolds por “Re”, el coeficiente de fricción de Darcy por la celda “f”, la longitud de la tubería (parámetro a ingresar), está representado por la celda “l (m)” y los coeficientes de pérdidas de cargas lineales y el de rugosidad de Hazen Williams, se representan por las celdas “k”.

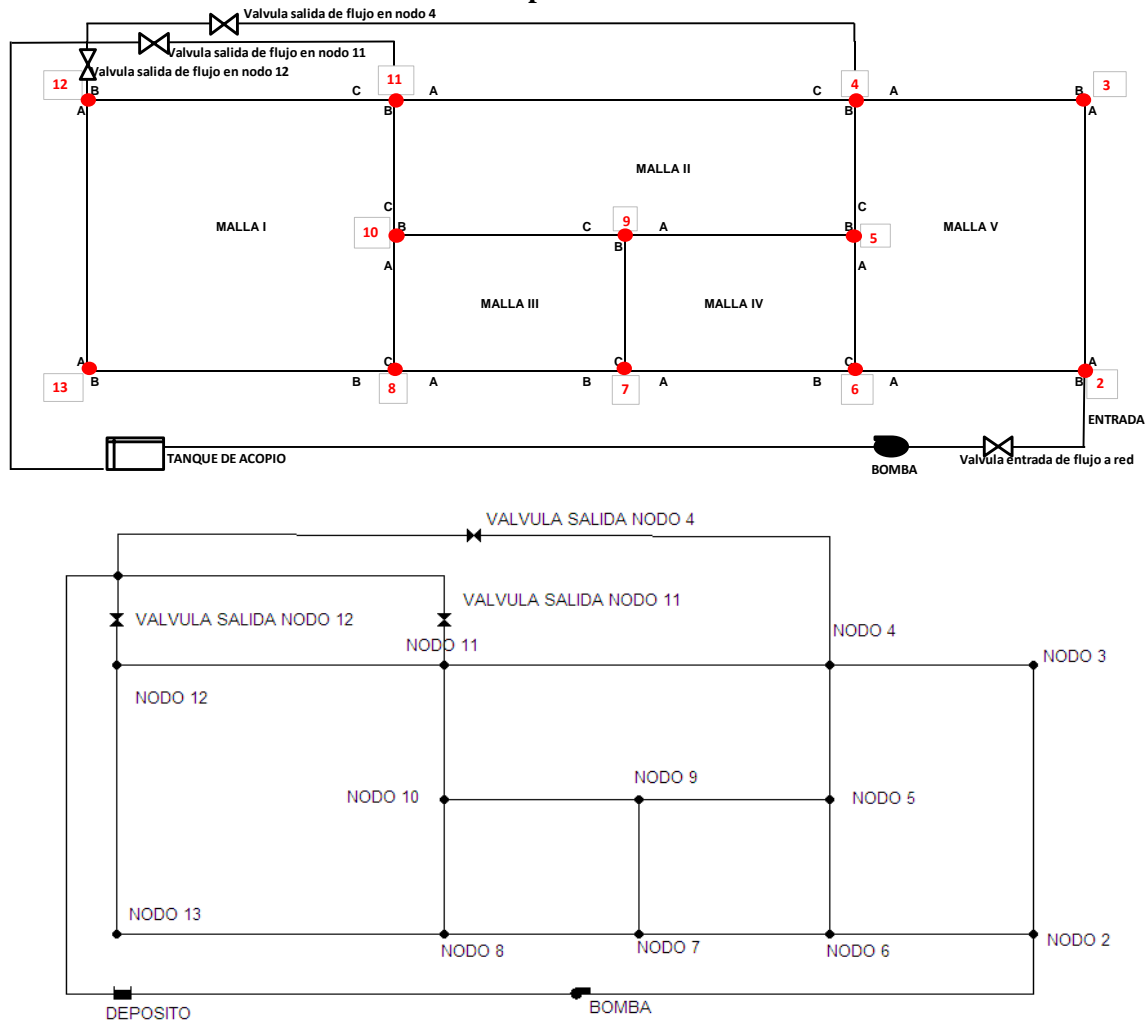
Cada uno de estos pasos se repite siete veces en total, según el número de combinaciones posibles para la salida de flujo por los nodos 4, 11 y 12.

Para digitalizar la información a través de Epanet se llevó a cabo paso a paso el procedimiento de creación del proyecto de red propuestos por los manuales de Epanet de la siguiente manera:

Se modeló la red mallada de la Ilustración 6 (la red superior corresponde a diseño creado en AutoCAD, mientras que la red inferior fue recreada por medio de Epanet.), las tuberías en PVC como material en la red tiene una rugosidad de 0.0015 (Staff, 2002) para la ecuación de pérdidas de Darcy-Weisbach, D-W en el software.

Para ejecutar el programa, insertamos en primer lugar los componentes no lineales del sistema (depósito y nudos) y a continuación, añadimos las tuberías uniendo estos elementos, pero a cada uno de estos elementos se le da una ubicación en el plano cartesiano, asignado de forma arbitraria las coordenadas iniciales de cualquiera de los objetos.

Ilustración 6. Red de Distribución Mallada para Modelar.



Posteriormente se introdujeron las características particulares de los elementos tales como longitud y diámetro de tuberías, cotas, cota del tanque (o embalse), entre otras. Algunas de estas características se observan en la Tabla 4 donde se describen las mallas compuestas en la red, los tramos y sus respectivos diámetros y longitudes en las unidades que trabaja el programa (por eso se hacen las conversiones). De esta forma los datos fueron introducidos en el programa en base a esta tabla, siguiendo los lineamientos explicados en el manual del software (Rossman, 2000).

Tabla 4. Características de la red y tramos de tuberías.

MALLA	Línea	D (pulg)	D (cm)	D (mm)	L (m)
MALLA V	2B - 6A	0,68750	1,74625	17,46250	1,860
	2A - 3A	0,93750	2,38125	23,81250	1,860
	3B - 4A	0,68750	1,74625	17,46250	1,860
	6C - 5A	0,93750	2,38125	23,81250	0,930
	5C - 4B	0,93750	2,38125	23,81250	0,930
MALLA IV	6C - 5A	0,93750	2,38125	23,81250	0,930
	6B - 7A	0,68750	1,74625	17,46250	1,400
	7C - 9B	0,93750	2,38125	23,81250	0,930
	5B - 9A	0,68750	1,74625	17,46250	1,400
MALLA III	7C - 9B	0,93750	2,38125	23,81250	0,930
	7B - 8A	0,68750	1,74625	17,46250	1,400
	8C - 10A	0,93750	2,38125	23,81250	0,930
	9C - 10B	0,68750	1,74625	17,46250	1,400
MALLA II	5C - 4B	0,93750	2,38125	23,81250	0,930
	5B - 9A	0,68750	1,74625	17,46250	1,400
	9C - 10B	0,68750	1,74625	17,46250	1,400
	10C - 11B	0,93750	2,38125	23,81250	0,930
	4C - 11A	0,68750	1,74625	17,46250	2,800
MALLA I	8C - 10A	0,93750	2,38125	23,81250	0,930
	10C - 11B	0,93750	2,38125	23,81250	0,930
	8B - 13B	0,68750	1,74625	17,46250	2,870
	13A - 12A	0,68750	1,74625	17,46250	1,860
	11C - 12B	0,68750	1,74625	17,46250	2,870

En la Ilustración 7 se observa la red lista para correr en el programa, la modelación corresponde a las salidas del flujo en todos los nodos 4, 11 y 12. En la Ilustración 8 se muestra el cuadro de dialogo de características hidráulicas del nodo 2, así, se fueron modificando las características para cada uno de los nodos y demás elementos que componen la Red, tales como el nombre del nodo en “ID Nudo de Caudal”, la elevación con respecto al suelo en “Cota” y las coordenadas en X y en Y.

Ilustración 7. Modelo De Red En Epanet

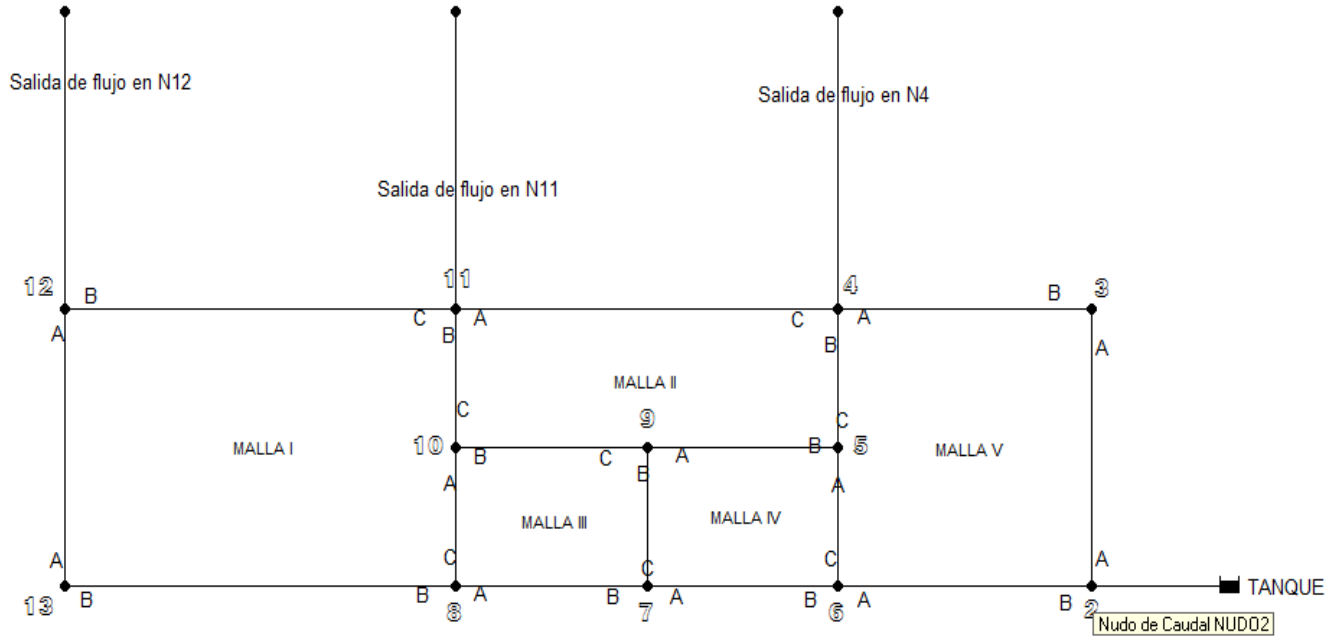


Ilustración 8. Cuadro de Diálogo. Características Hidráulicas del Nodo 2.

Propiedad	Valor
*ID Nudo de Caudal	NUDO2
Coordenada X	4700,00
Coordenada Y	4700,00
Descripción	
Etiqueta	
*Cota	1,8
Demanda Base	0
Curva Modul. Demanda	
Tipos de Demanda	1
Coefficiente del Emisor	
Calidad Inicial	
Intensidad de la Fuente	
Demanda Actual	Sin Valor

Para las tuberías se siguió el procedimiento similar a los nodos, tal como se observa en la Ilustración 9 con las características hidráulicas de uno de los tramos de la red y el embalse.

Ilustración 9. Cuadro de Dialogo. Características Hidráulicas de Elementos de la Red.

Embalse 1		Tubería 2A-3A	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
*ID Embalse	1	*ID Tubería	2A-3A
Coordenada X	4701,00	*Nudo Inicial	NUD02
Coordenada Y	4700,00	*Nudo Final	NUD03
Descripción		Descripción	
Etiqueta		Etiqueta	
*Altura Total	31,8	*Longitud	1,86
Curva Modulac. de la Altura		*Diámetro	23,8125
Calidad Inicial		*Rugosidad	0,0015
Intensidad de la Fuente		Coef. Pérdidas Menores	0
Caudal Neto Entrante	Sin Valor	Estado Inicial	Abierta
Altura	Sin Valor	Coef. Reacción en el Medio	
Presión	Sin Valor	Coef. Reacción en la Pared	
Calidad	Sin Valor		

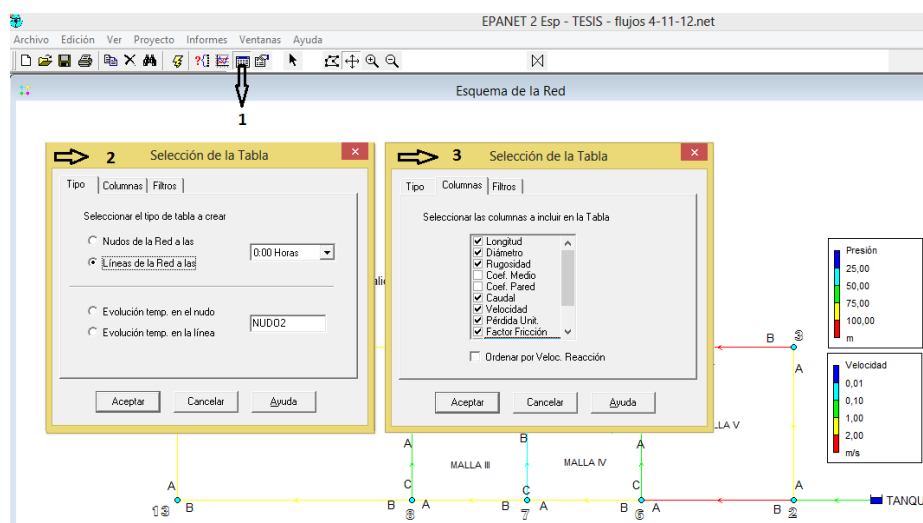
Para realizar la primera iteración fue necesario especificar las unidades con las cuales el programa realizaría los cálculos correspondientes, así como lo muestra la Ilustración10 con las unidades de caudal en LPS (litros por segundo), para la fórmula de pérdidas D-W (Darcy-Weisbach) y un máximo de iteraciones de 10, siendo este el mismo número de iteraciones realizadas también en las tablas de Excel para la corrección de caudales.

Ilustración10. Cuadro de Dialogo. Opciones Hidráulicas.

Propiedad	Valor
Unidades de Caudal	LPS
Fórmula de Pérdidas	D-W
Peso Específico Relat.	1
Viscosidad Relativa	1
Máximo Iteraciones	10
Precisión	0,001
Caso de No Equilibrio	Continuar
Curva Modulac. por Defecto	1
Factor de Demanda	1,0
Exponente Emisores	0,5
Informe de Estado	No

Con la corrida del programa se obtuvieron resultados que fueron extraídos desde el mismo programa, resultados que fueron arrojados tanto como tablas como por gráfico. Tal como se observa en la Ilustración 11.

Ilustración 11. Obtención de Tablas de Datos.





PROGRAMA DE ING. CIVIL.

4.5. CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

Luego de todo el conjunto de actividades que se encargaron de habilitar el sistema, logrando que la Red funcionara sin fugas, se procedió a realizar la calibración de todos los elementos que componen el sistema con el fin de descartar cualquier posible falla que evitara realizar la experiencia de manera satisfactoria, para tal fin se desarrollaron patrones comparativos tales como simulaciones de la Red a través del software EPANET y hojas de cálculo en Excel, estos permitieron ajustar varios instrumentos de medición hasta que la medida que se obtuvo fue confiable y correspondiente con los patrones de comparación, finalizando así la fase de calibración.

4.5.1. Proceso de calibración

Durante este proceso de calibración se realizaron las actividades de comparación de los datos recopilados a través de los instrumentos de medición y, resultados calculados en hojas de cálculo y el programa EPANET, es decir, se alcanzaron patrones de referencia para garantizar que los datos obtenidos fueran confiables y utilizables para futuras pruebas en la Red.

La primera actividad comparativa fue la utilización de los manómetros para obtener el valor de las presiones y sentidos del flujo. Cuando se procedía a la toma de datos, para cada tramo de la Red, era posible observar la presión puntual (con los dos manómetros individuales analógicos de 0-15 Psi) y la diferencial ya sea con el de mercurio o con el analógico (manómetro calibrado de 0-5 Psi), de esta forma era posible ver en tres formas el dato de la presión y el sentido del flujo, de ahí la convicción en el dato recopilado.

Posteriormente a esto se realizó la corrección de los caudales haciendo el análisis a través del método de Hardy Cross utilizando los datos recopilados. La Tabla 5 ilustra la manera en que se tabularon los datos. Este paso se repitió hasta 10 veces (10 iteraciones) donde no se presentaban variaciones significativas de los caudales.



Otra comparación realizada fue con las modelaciones del programa EPANET y las hojas de cálculo de Excel, en cuyas tablas se observan las correcciones de caudales y las variaciones del flujo reales que circulan a través de la Red, luego de hacer las respectivas suposiciones. Por último se analizó la semejanza entre el método de Hardy Cross (con corrección de caudales) y las modelaciones de EPANET.

Tabla 5. Formato de Corrección de Caudales.

Cuadro de corrección de caudales, método de Hardy Cross										
Malla	Tramo	Longitud	Diámetro	Caudal Q	Área	Velocidad	Reynolds	Coefficiente de fricción f	coeficiente de rugosidad k	Corrección

4.6. GUÍA PARA REALIZAR LA PRÁCTICA

La metodología a emplear para el estudio de presiones y velocidades conlleva a organizar la información a través de una serie de pautas las cuales fueron utilizadas de tal forma que por medio de esta serie de pasos se logró la recolección de la información. Los pasos para operar el sistema o procedimiento para llevar a cabo la práctica del laboratorio dependió del método que se utilizó. (Resultado de la etapa de calibración). Este diseño se mostró a través de una guía de laboratorio en cuyo interior se aprecian el procedimiento experimental en el cual se explican los pasos a seguir para la operación de la Red y la toma de datos, además de la teoría que abarca dicha práctica.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

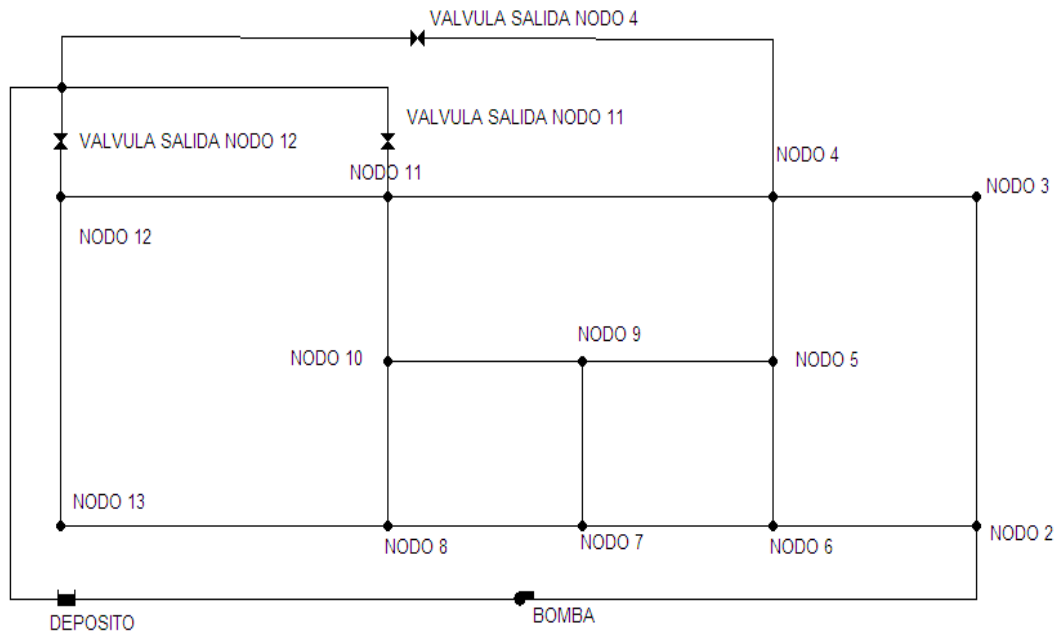
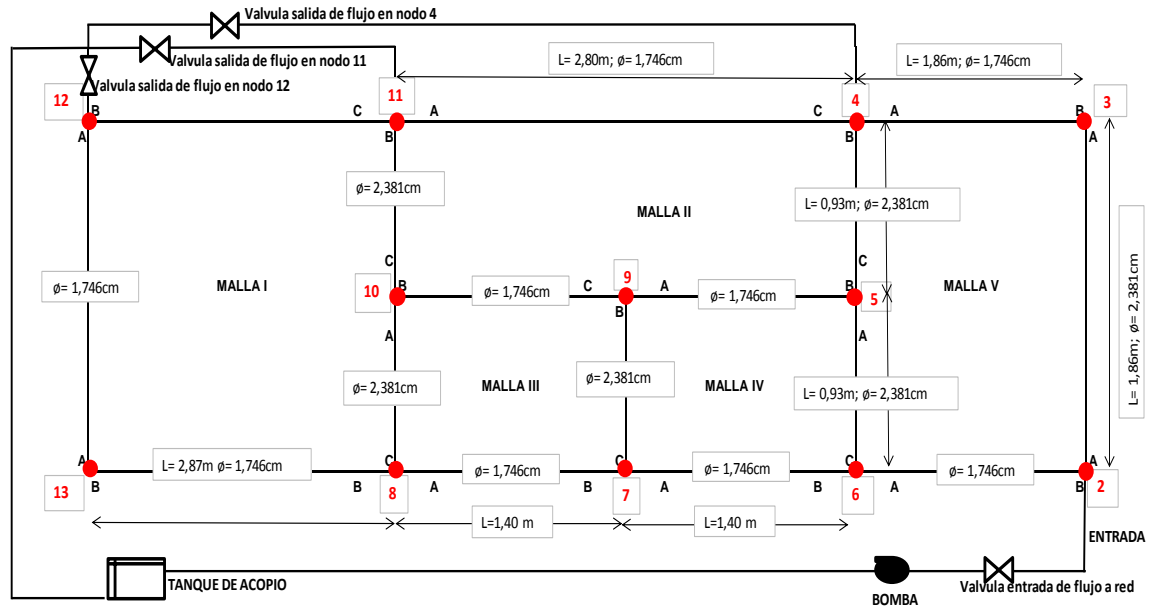
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. REVISIÓN DE LA RED

Se realizó en campo el levantamiento de la Red de Cross, las características físicas (diseño de la Red) de esta se ilustraron a través de dos planos como se observa en la Ilustración 12. En estos planos realizados en los programas AutoCAD y EPANET (software que realiza el cálculo de presiones y velocidades a través de la simulación de la Red) se puede apreciar el diseño de la Red con sus respectivos accesorios que ayudan a la recolección de la información.

Los elementos contemplados en el levantamiento inicial de la Red, son un conjunto de accesorios (codos, uniones, tees y bujes) y tuberías en PVC por donde circula el agua, además a la red se le conectan con reducciones y adaptadores una serie de ductos en cobre, en los nodos, que se encargan de direccionar el flujo hacia el centro de medición o lugar de los manómetros. El agua que circula a través de esta es impulsada por una bomba, cuyo tanque de descarga es el mismo que alimenta la bomba (el agua se circula por la red).

Ilustración 12. Planos de red de Cross AutoCAD y Epanet.



La Ilustración 13 refleja la ubicación de los elementos que componen el laboratorio y complementa el enunciado anterior.

Ilustración 13. Descripción del sistema de red.











5.1.1. Identificación De Instrumentos.

La Tabla 6 muestra en forma organizada los elementos que componían el sistema, haciendo alusión a las actividades de levantamiento de la Red y de identificación del estado de los instrumentos que la componen.

Con el inventario de la red no se pudo hacer comparación con inventarios anteriores puesto que no existía documento alguno que nos diera a conocer los materiales que componían el sistema.

Tampoco fue posible considerar si en algún momento se implementó un equipo nuevo dentro del sistema o la baja de otros por el mismo hecho de no contar con documentación que señalara la entrada o salida de equipos al sistema.

Inventario de la Red					
N°	Elemento	UND	Cant	Características	Observaciones
1	 Bomba	UND	1	Tiene una potencia de 1/2 Hp, bombeando a una presión de 30 psi.	No está en uso desde hace varios años, aunque cuando fue trasladado el laboratorio a la sede Piedra de Bolívar se comprobó que aun sirve y que estaba apta para usarla
2	 Tanque de almacenamiento	UND	1	Esta hecho en material metálico, con unas dimensiones de 1.20m*1.20m*0.50m	Posee dos compartimientos (superior e inferior) los cuales están unidos de tal forma que no se pueden separar, presenta fugas en la parte inferior de este, el tanque de aforo tiene una tubería en la mitad de 4" de diámetro permitiendo el paso directo hacia el tanque inferior, la altura de este es de 40cm, también cuenta con una palanca la cual permite el paso del agua al tanque inferior luego del aforo, en este compartimiento es donde se almacena el agua para luego ser bombeada al sistema a través de la Bomba.
3	 Llaves de Paso	UND	27	Ubicadas estratégicamente para el calculo de las presiones en cada uno de los nodos en el sistema.	Gran parte de estos accesorios estan en buen estado. Solo se hace necesario un aseo o limpieza profunda para retirar sucio, manchas y demas.
4	 Valvulas	UND	6	Ubicadas estratégicamente para habilitar o desabilitat la salida de flujo en los tres punto, tambien para evacuar el tanque y poener en marcha el sistema.	
5	 Manometro de mercurio en U	UND	1	El manometro con altura aproximada de 50cm está en una caja de madera que sirve como soporte y protección tanto para el manometro como para los accesorios que lo componen.	Presenta material particulado en su interior, oxidado. Proveniente seguramente de del que era anteriormente el tanque de almacenamiento y de aforo. Necesario hacer depuración para limpieza de lastuberías.
6	 Tablero Grafico	UND	1	Ilustración Grafica que nos muestra el diseño de la red junto con sus características, dimensiones, diámetros, etc.	Este se encuentra en muy buen estado y seguira siendo parde fundamental del laboratorio.
7	 Tuberia en PVC	ML	32	Toda la tuberí instalada en la red, tanto la que componen las mallas como la de suministro de agua y descarga.	Solo es necesario un limpieza del conjunto de tubos que compone la red.
8	 Tuberia de cobre	ML	130	Tubería para el calculo de presiones. Conectadas en cada nodo y llevado al manometro.	Solo es necesario un limpieza del conjunto de tubos que compone la red.

El manómetro diferencial (con mercurio como líquido manométrico) utilizado para medir presiones a través de la Red fue retirado como consecuencia de la inactividad del laboratorio, además éste no era capaz de medir presiones bajas. La Ilustración 14 muestra el estado en que fue encontrado el centro de medición de presiones sin el manómetro de mercurio.

Ilustración 14. Centro de Medición sin el Manómetro.



En cuanto al tanque de almacenamiento como se muestra en la Ilustración 15, éste se encontró deteriorado, debido a que fue diseñado y construido en material inadecuado. Múltiples perforaciones en el fondo, y corrosión en su base. Por lo que era necesario buscar un remplazo.

Ilustración 15. Tanque de Almacenamiento Deteriorado.



5.1.2. Instrumentación.

Limpieza de equipos de laboratorio: Fue un punto importante dentro de todo este proceso puesto que se garantizó una buena estética, armonía e higiene de los equipos, sobre todo evitando problemas de funcionamiento más adelante.

Adecuación de espacio para los trabajos: Se dispuso del espacio necesario para la ejecución de la práctica, los sitios adecuados para los equipos y zonas de desplazamientos.

Cambio de accesorios dañados por nuevos adquiridos: Luego de establecer cuáles fueron los accesorios deteriorados a través del levantamiento (análisis primario), se realizó una lista de los instrumentos necesarios para realizar las pruebas iniciales de la Red. Fue posible detectar las fugas en cuatro puntos (nodos 1, 4, 8 11), a través de la corrida de la Red o prueba inicial, para este caso se realizó el reemplazo de los elementos que componen cada uno de estos puntos, de esta forma las fugas y posibles fallas en el sistema fueron corregidas. La

Tabla 7 muestra los elementos adquiridos que hicieron posible la habilitación de la Red de Cross.

Tabla 7. Elementos adquiridos para reparaciones.

ELEMENTOS	UNIDAD	CANTIDAD
Codo de 90° 1 1/4" PVC	UND	3
Adaptador HEMBRA de PVC 1"	UND	1
Adaptador macho de PVC 1 1/2"	UND	1
Codo de 90° 1 1/2" PVC	UND	1
Codo de 90° 1/2" PVC	UND	1
Tubo de PVC 1 1/2"	UND	1
Tubo de PVC 1 1/4"	UND	1
Accesorios Nodos averiados	GLB	1
Pegante de PVC (1/16)	UND	1
Teflon	UND	1

Mejora de equipos usados: El manómetro de mercurio presentaba fallas en la medida. Tanto tiempo sin uso dejó residuos de óxido dentro de las tuberías haciendo el agua turbia y con residuos dentro del manómetro de mercurio en U. En la Ilustración 16 observamos un antes y un después de las mejoras hechas en el manómetro, en donde se realizó un drenado de toda la tubería y limpieza del manómetro dejando este sin partículas ni residuos.

Ilustración 16. Adecuación de Manómetro de Mercurio e Implementación de Nuevo Manómetro.



Implementación de nuevos equipos: Por las presiones bajas que presenta el sistema fue necesario la utilización de un manómetro diferencial de caratula amplia de 0 a 5 PSI.

La Ilustración 16 nos muestra la mejora hecha en el manómetro de mercurio pero también la implementación de un nuevo equipo de medición de presiones.

El tanque también fue reemplazado por uno nuevo al no tener arreglo. Este nuevo elemento sigue cumpliendo con los requerimientos iniciales para el funcionamiento ideal del laboratorio. En la Ilustración 17 se observa el cambio de los elementos. El tanque de almacenamiento fue reemplazado e instalado por uno que tiene capacidad de 500 litros, éste fue dispuesto por el grupo de investigación GIMA.

Ilustración 17. Tanque de Almacenamiento Implementado.



Es importante aclarar que para cada uno de estos pasos descritos anteriormente fue indispensable la ayuda del señor instrumentista Clemente Venencia.

5.2. PRUEBAS INICIALES

Cuando se instaló el tanque de almacenamiento de la Red, se procedió a realizar una prueba inicial de la Red en periodos de 5 minutos, haciendo 7 pruebas, variando en cada una de estas pruebas la abertura de las válvulas reguladoras del flujo de salida de la Red, válvulas ubicadas en las tuberías que salen de los nodos 4, 11 y 12.

Durante esta etapa se observaron fugas en varios puntos de la Red, en los nodos 1, 4, 8 y 11. Donde se encuentra ubicada la platina de orificio en el nodo 1 (Ilustración 18) se observaron fugas en los accesorios que la conforman, situación que se repitió en el nodo 8 como lo muestra la Ilustración 19 que se observan las tuberías en P.V.C. que llegan al nodo y los ductos que salen de este hacia la ubicación del manómetro, la fotografía fue tomada cuando el nodo fue bajado para realizar el reemplazo de los nuevos elementos que la conforman.



Ilustración 18 Platina de orificio. Fuente de los autores.



Ilustración 19 Nodo 8 desarmado luego de las pruebas iniciales. Fuente de los autores.

Para las fugas que se presentaron en las salidas de los nodos 4 y 11, se cambiaron los accesorios que conforman estos puntos de referencia. En el nodo 4 la fuga ocurrió en la unión de la Red con la tubería de salida, es decir, entre la tee de $\frac{1}{2}$ " que se encuentra unida al codo de 1" a través de una reducción de $\frac{1}{2}$ " a 1" como lo muestra la Ilustración 20. Para el nodo 11, la avería ocurrió de igual forma que en el nodo 4, ya que la fuga se produjo a través de la unión de los codos de 1" como se ve en la Ilustración 21, es decir, en los accesorios ubicados en la salida de la red, tubería dirigida a la válvula de control del flujo hacia el tanque de almacenamiento.



Ilustración 20 Nodo 4. Fuente: de los autores.

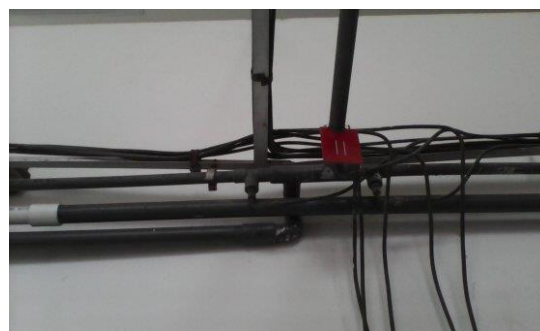


Ilustración 21 Nodo 11. Fuente: de los autores

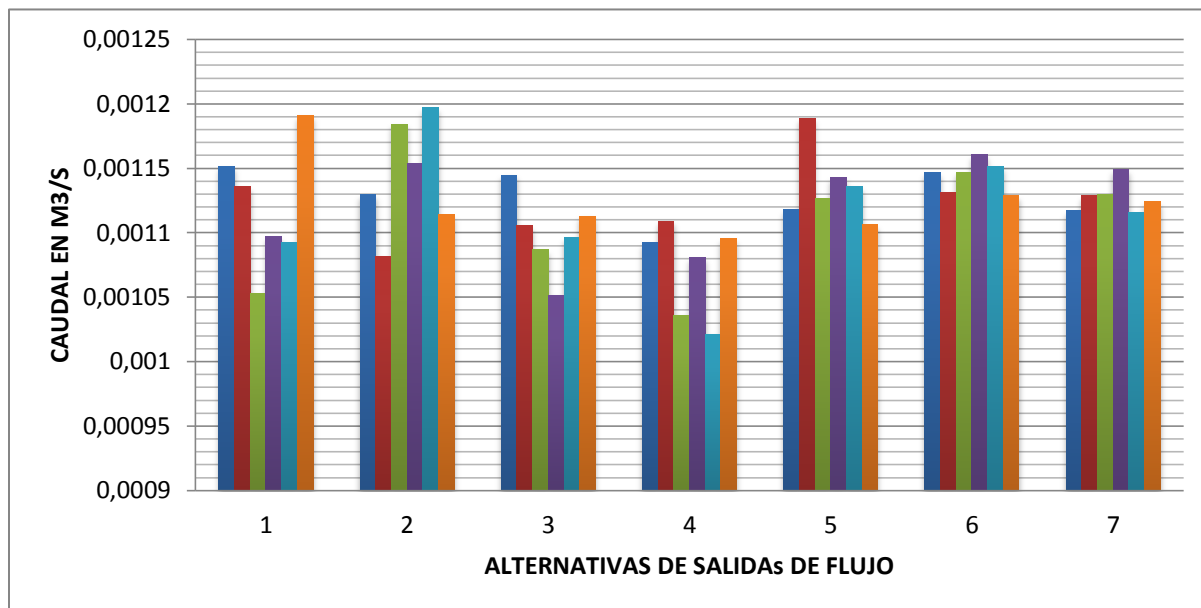
5.2.1. Aforo de Caudales.

Con el fin de determinar el caudal de salida para realizar los cálculos concernientes para el estudio de la red en cuanto a presiones y velocidades, se realiza el aforo de caudales (seis caudales por cada alternativa de salida de flujo).

Son siete alternativas de salidas de flujo en total como se describen:

1. Salida de Flujo por los nodos 4, 11 y 12. Válvulas abiertas.
2. Salida de Flujo por el nodo 4. Válvulas en 11 y 12 cerradas.
3. Salida de Flujo por el nodo 11. Válvulas en 4 y 12 cerradas.
4. Salida de Flujo por el nodo 12. Válvulas en 4 y 11 cerradas.
5. Salida de Flujos por los nodos 4 y 11. Válvula en 12 cerrada.
6. Salida de Flujos por los nodos 4 y 12. Válvula en 11 cerrada.
7. Salida de Flujos por los nodos 11 y 12. Válvula en 4 cerrada.

Ilustración 22. Aforo del Caudal para las siete Combinaciones de Salida de Flujo



La Ilustración 22 muestra los seis caudales (m^3/S) tomados para cada combinación de salida de flujo variando desde $0,001021 m^3/s$ ($1.021 l/s$) como mínimo hasta $0,001196 m^3/s$ ($1.196 l/s$) como mayor de los caudales de salida que se hayan registrado.

La Tabla 8 muestra los promedios de las pruebas realizadas para aforo de caudales registrando así tiempos, altura de lámina de agua, volumen y caudal. Como para cada una de las combinaciones realizadas se tomaron seis caudales, la tabla nos muestra los promedios de cada una de las combinaciones.

Tabla 8. Promedios de Caudales Aforados Medidos en Laboratorio

PRUEBA/SALIDA DE FLUJO EN NODO	TIEMPO (s)	ALTURA TANQUE (m)	VOLUMEN TANQUE (m^3)	CAUDAL (m^3/s)	CAUDAL (L/s)
1 4, 11 y 12	5,14	0,0715	0,00575	0,00112	1,1198
2 4	5,22	0,07417	0,00596	0,00114	1,14311
3 11	5,15	0,07033	0,00566	0,0011	1,09934
4 12	5,09	0,06783	0,00546	0,00107	1,07233
5 4 y 11	5,11	0,07217	0,0058	0,00114	1,13595
6 4 y 12	5,1	0,0725	0,00583	0,00114	1,14406
7 11 y 12	5,13	0,07183	0,00578	0,00113	1,12713

Aquí tenemos que el máximo caudal de salida obtenido es de $0,001144m^3/s$ ($1,14406 l/s$) correspondiente al tener salida de flujo en los nodos 4 y 12 mientras la salida en el nodo 11 permanece cerrada (Prueba 6). Y el menor caudal saliente es de $0,001072m^3/s$ ($1,072 l/s$) corresponde al tener la salida de flujo solo en el nodo 12, con las salidas en los nodos 4 y 11 cerradas (Prueba 4).

5.2.2. Presiones En El Sistema Y Sentidos De Flujo

Las presiones tomadas en cada tramo nos dan los sentidos del flujo en la red. Luego entonces, las distribuciones del caudal dentro de la tubería dependen directamente de las salidas de flujo, en este caso, las siete posibles salidas de flujo con las que cuenta la red.

5.2.2.1. Presiones En La Red Para Cuando El Flujo Sale Por Los Nodos 4, 11 Y 12 (Prueba 1):

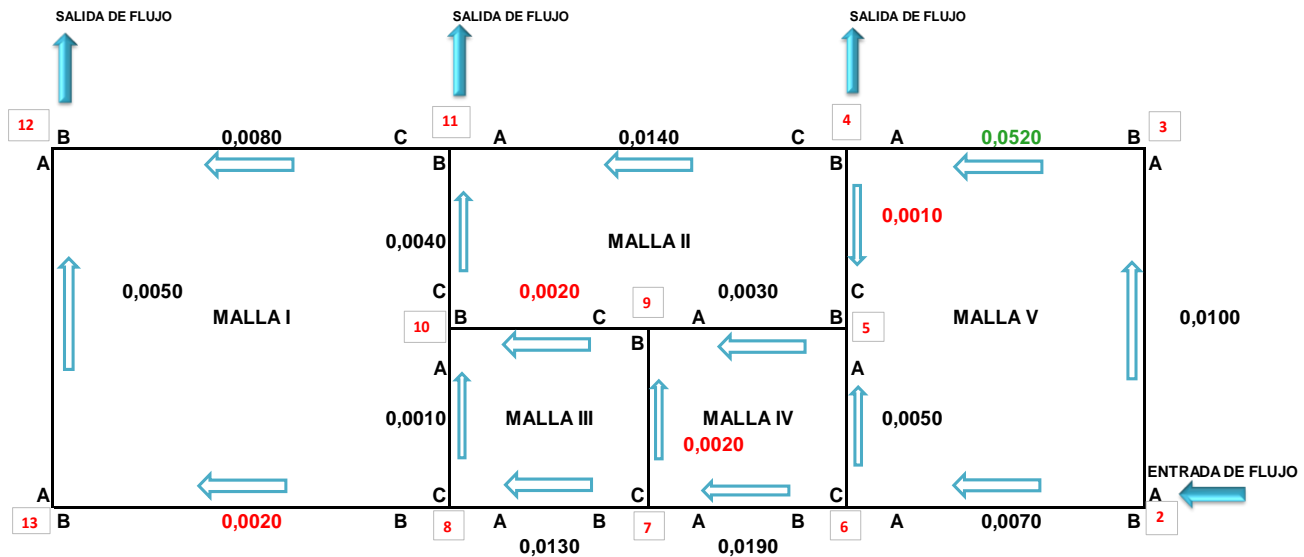
Las presiones en la red como se ven en la Tabla 9 para la prueba 1 con salida de flujo en los nodos 4, 11 y 12 dan la dirección del caudal dentro de la red para cada malla, teniendo en cuenta que se consideró el sentido positivo a quienes vanen el mismo sentido a las manecillas del reloj y negativas en sentido contrario.

Las presiones más bajas se presentan en los tramos 5C-4B de la malla V y malla II, 7C-9B de la malla IV y malla III, 8C-10A en malla III y malla I, 10B-9C de la malla III Y malla II y el tramo 8B-13B de la malla I. Tal como se observa en la Ilustración 23 en color rojo las presiones mínimas registradas en la red. Las presiones en estos tramos son mínimas, valores de 0,001mca(0,10psi) puesto que tienden a contrarrestarse por la distribución de los caudales.

Tabla 9. Presiones en la Red para Prueba 1.

PRUEBA #1. SALIDA DE FLUJO EN NODOS 4, 11 Y 12					
MALLA	TRAMO	MANOMETRO DE MERCURIO (M)	MANOMETRO ANALOGICO (PSI)	MAYOR NODO	SENTIDO EN MALLA
MALLA V	2B - 6A	0,0070	0,20	2B	POS.
	2A - 3A	0,0100	0,25	2A	NEG.
	3B - 4A	0,0520	1,00	3B	NEG.
	6C - 5A	0,0050	0,10	6C	POS.
	5C - 4B	0,0010	0,10	4B	NEG.
MALLA IV	6C - 5A	0,0050	1,00	6C	NEG.
	6B - 7A	0,0190	0,40	6B	POS.
	7C - 9B	0,0020	0,10	7C	POS.
	9A - 5B	0,0030	0,10	5B	NEG.
MALLA III	7C - 9B	0,0020	0,10	7C	NEG.
	7B - 8A	0,0130	0,30	7B	POS.
	8C - 10A	0,0010	0,10	8C	POS.
	10B - 9C	0,0020	0,10	9C	NEG.
MALLA II	5C - 4B	0,0010	0,10	4B	POS.
	9A - 5B	0,0030	0,10	5B	POS.
	10B - 9C	0,0020	0,10	9C	NEG.
	10C - 11B	0,0040	0,20	10C	POS.
	11A - 4C	0,0140	0,40	4C	NEG.
MALLA I	8C - 10A	0,0020	0,10	8C	NEG.
	10C - 11B	0,0040	0,20	10C	NEG.
	8B - 13B	0,0020	0,10	8B	POS.
	13A - 12A	0,0050	0,20	13A	POS.
	12B - 11C	0,0080	0,20	11C	NEG.

Ilustración 23. Presiones (MCA) en cada tramo de la red. Prueba 1.

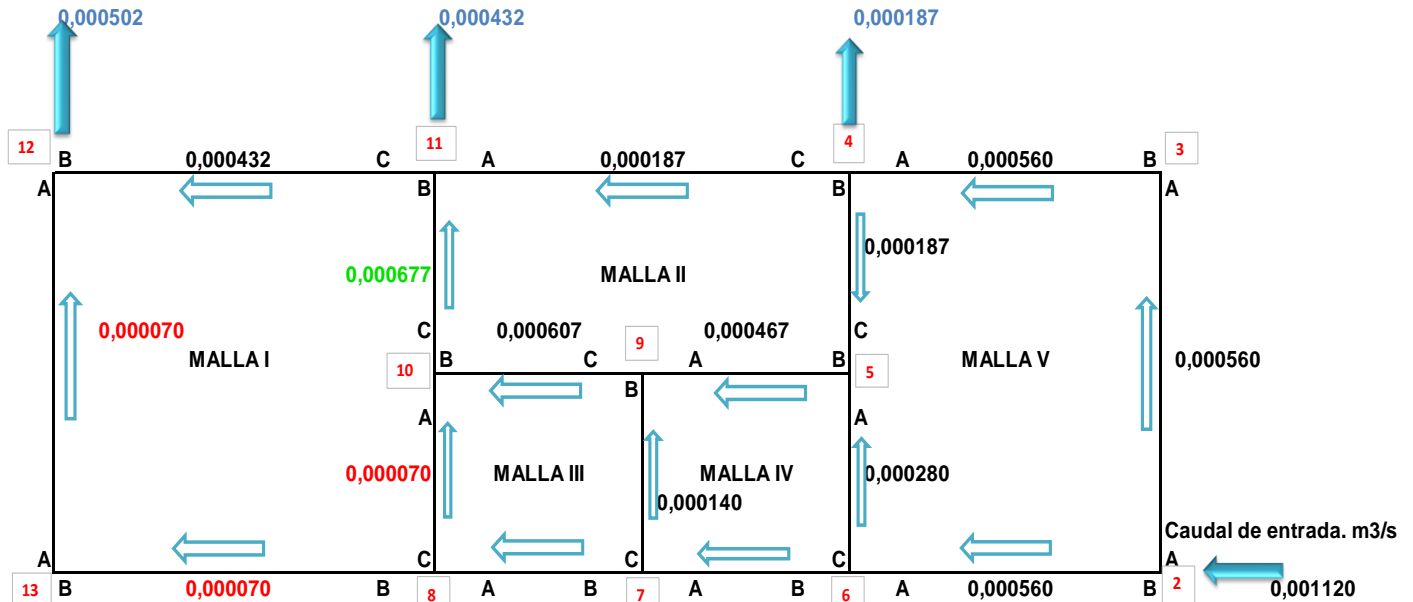


Como por ejemplo, en la Malla V de la Ilustración 23, el flujo va del nodo 2 a los nodos 3 y 6 con caudales iguales, pero al llegar a los nodos 3 y 6 el comportamiento es diferente por el número de tramos que componen a dichos nodos, por ende las presiones disminuyen en estos tramos.

En este primer caso estudiado donde la salida de flujo se da manteniendo abierta las válvulas de las tuberías salientes de los nodos 4, 11 y 12, el caudal aforado promediado fue de **0,001120 m³/s (1,120 l/s)**, este caudal entra a la red y se reparte desde el nodo 2 y se distribuye hasta salir.

En la Ilustración 24 se observan las distribuciones del caudal por tramos y los caudales salientes por los nodos 4, 11 y 12. El mayor caudal se presentó en la salida del nodo 12 con **0,000502 m³/s (0,5015 l/s)** correspondiente al 44,79% del caudal total, mientras que el caudal saliente por el nodo 11 corresponde a un 38,57% del caudal total (**0,000432 m³/s-0,432 l/s**) y en el nodo 4, fue donde se dio el menor caudal saliente representando tan solo un 16,67% correspondiente a **0,000187 m³/s (0,187 l/s)**

Ilustración 24. Diagrama de distribución de caudales en la red para prueba 1. (Qm³/s)



La suma de estos tres caudales salientes termina siendo igual al entrante por el nodo 2, teniendo coherencia en la distribución de flujos y cumpliéndose así la teoría de continuidad del flujo.

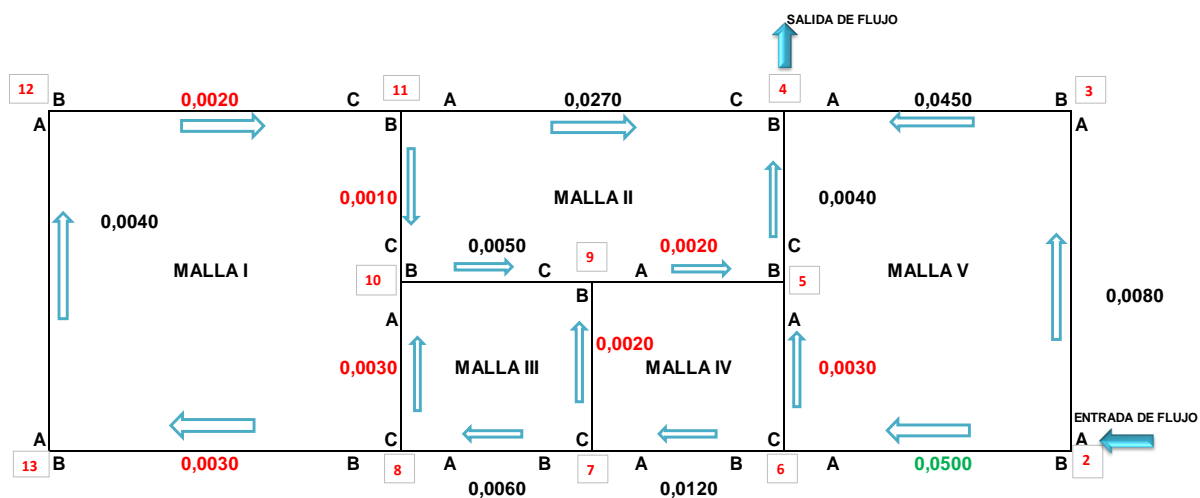
El mayor caudal que se presenta en la salida del nodo 12 se da porque en este solo convergen los dos últimos tramos de la red los cuales se suman para dar como caudal saliente el mencionado anteriormente. Situación que no pasa con la salida del flujo en los nodos 11 y 4 de la red. Al nodo 4 lo alimenta un caudal de $0,000560\text{m}^3/\text{s}$, este se divide en tres partes, dos para los tramos que componen al nodo y la tercera al ducto de salida, por este motivo es el nodo con menor caudal en esta situación. Al nodo 11 lo alimentan dos de los tres tramos que componen, por eso, la suma de estos dos caudales solo se divide en dos partes, una hacia el ducto de salida en este nodo y la otra hacia la salida en 12.

5.2.2.2. Presiones En La Red Para Cuando El Flujo Sale Solo Por El Nodo 4

(Prueba 2):

En la prueba 2 con salida de flujo solo en el nudo 4 dan direcciones de flujo dentro de la red muy diferentes a la anterior sobre todo en las mallas que comparten los nodos 11 y 12, puesto que ahora están cerradas las válvulas de salidas. El direccionamiento en la malla V se mantiene igual que la prueba pasada puesto que la entrada de flujo siempre se da por el nodo 2.

Ilustración 25. Presiones (MCA) en cada tramo de la red. Prueba 2.

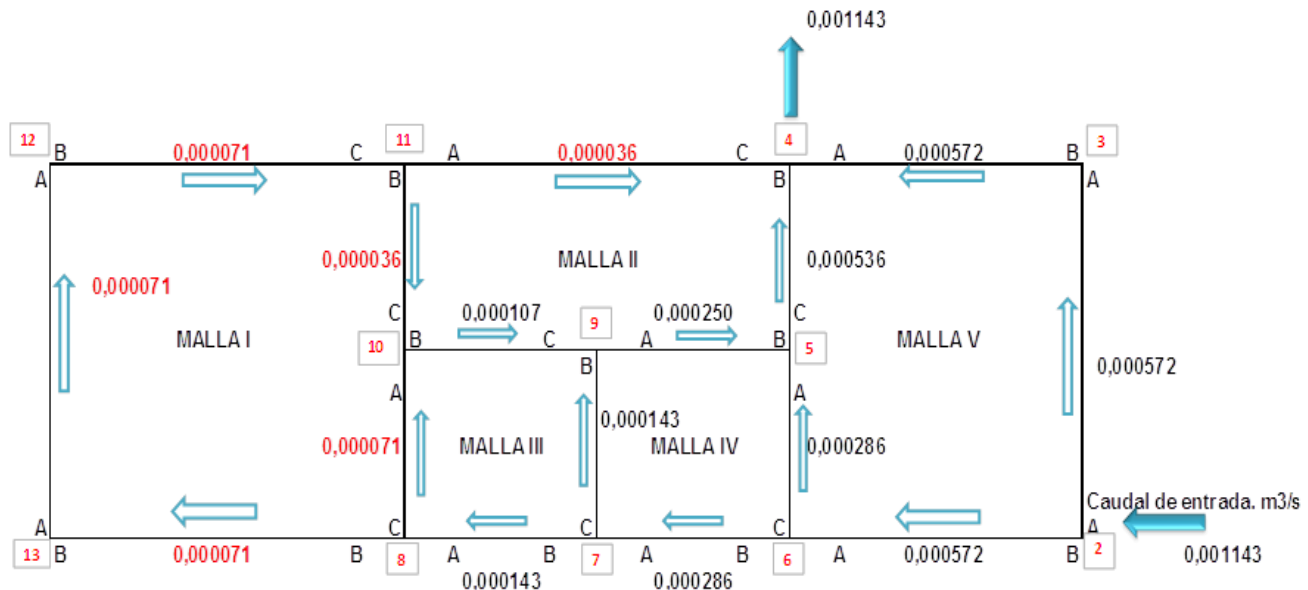


Para esta prueba las presiones más bajas se presentan en los tramos 7C-9B y 9A-5B de la malla IV, III y II, 10C-11B de la malla II y I, también el tramo 12B-11C de la malla I. Las presiones en estos tramos son mínimas, así como se muestra en la Ilustración 25, valores de 0,001 y 0,002 mca (0,10psi) puesto que tienden a contrarrestarse por la distribución de los caudales. Las mayores presiones se dan en los tramos de entrada y los que alimentan la salida de flujo en el nodo 4, tramos como el 2B-6A con presiones de 0,05 mca (0,9psi) y el tramo 3B-4A con presión 0,045 mca (0,80psi).

Al mantener solo una salida de flujo, tenemos que el caudal aforado fue de **0,001143 m³/s (1,143 l/s)**, como se observa en la Ilustración 26, donde las distribuciones del caudal por tramos y los caudales salientes por el nodo 4 se dan de tal manera que también para este

caso se cumple con la teoría de conservación de flujo. Los caudales que alimentan la salida en el nodo 4 son de $0,00572\text{m}^3/\text{s}$ ($0,0572$ l/s) en el tramo 3B-4A, $0,000536\text{m}^3/\text{s}$ ($0,0536$ l/s) para el tramo 5C-4B y de $0,000036\text{m}^3/\text{s}$ ($0,0036$ l/s) en el tramo 11A-4C.

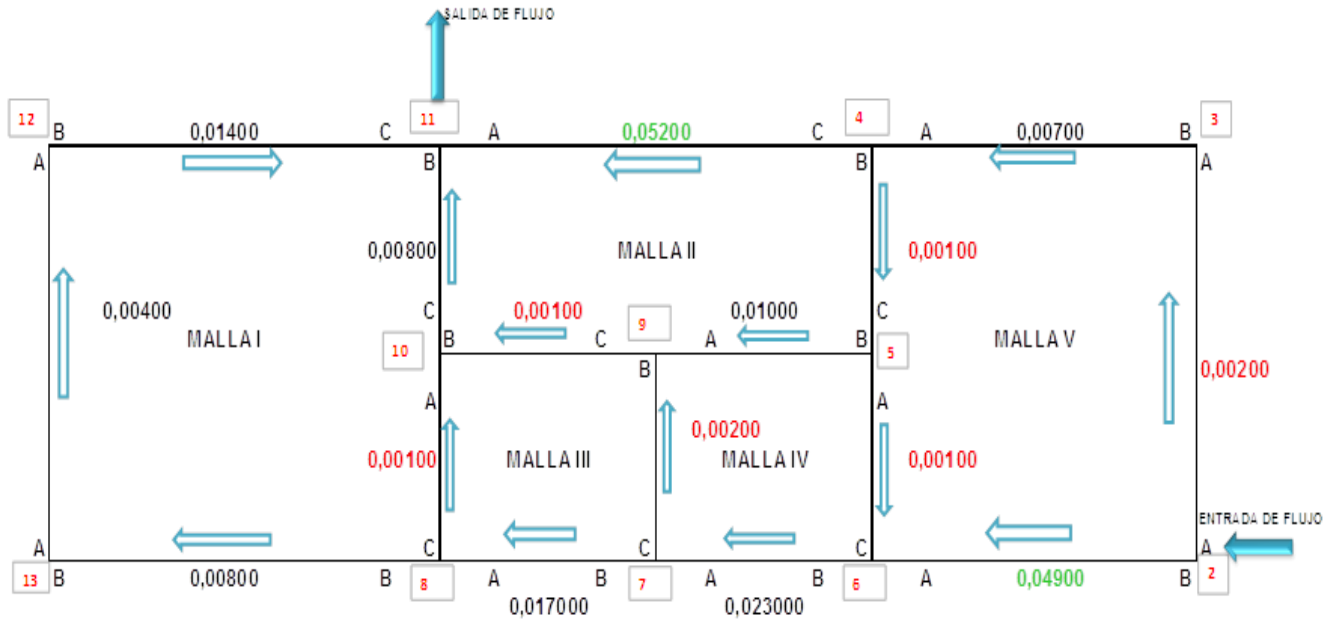
Ilustración 26. Diagrama de distribución de caudales en la red para prueba 2. (Qm^3/s)



5.2.2.3. Presiones En La Red Para Cuando El Flujo Sale Solo Por El Nodo 11 (Prueba 3):

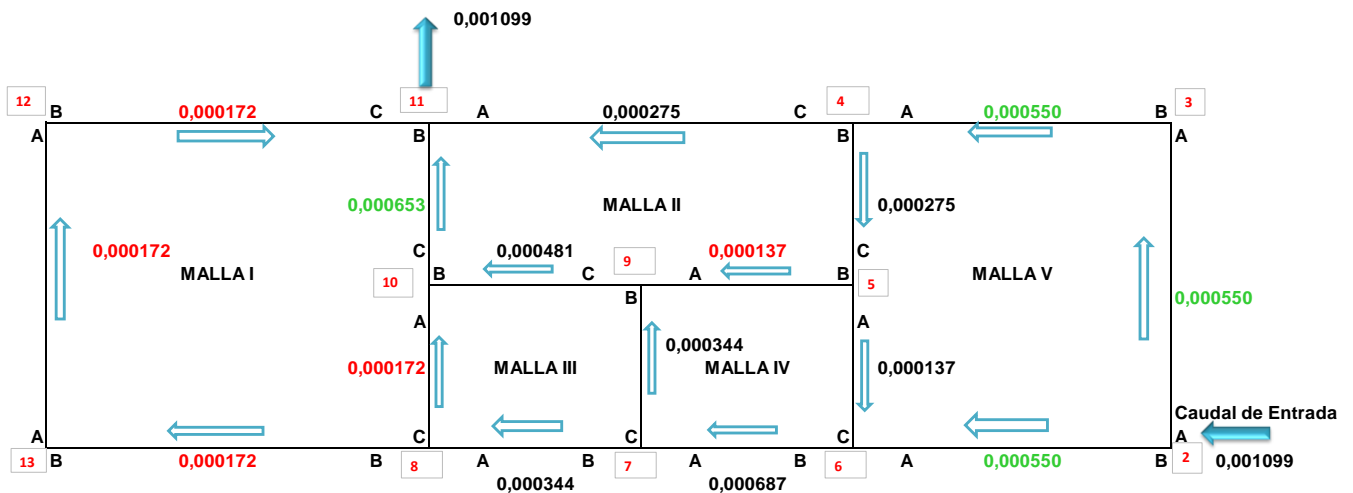
Las presiones en esta prueba distribuyen el flujo de tal manera que este se dirija directamente al nodo 11. Las mayores presiones se encuentran una a la entrada y otra en uno de los tramos que alimenta la salida, al igual que las dos pruebas pasadas. También se siguen presentando las presiones mínimas en tramos alejados del nodo de salida. Tal cual como se observa en la Ilustración 27.

Ilustración 27. Presiones (MCA) en cada tramo de la red. Prueba 3.



En la Ilustración 28 de distribución de caudales que se muestra a continuación se observan los caudales desde el nodo de entrada (nodo 2) hasta la salida en nodo 11. Nuevamente se cumple con la teoría y leyes de la continuidad de flujo, puesto que la suma de los caudales de los tramos que alimentan la salida en 11 es igual al caudal aforado.

Ilustración 28. Diagrama de distribución de caudales en la red para prueba 2. (Qm³/s)



5.2.2.4. Presiones En La Red Para Cuando El Flujo Solo Sale Por El Nodo 12 (Prueba 4):

Las presiones tienen el mismo comportamiento que las pruebas pasadas en donde el flujo solo tiene un ducto de salida. Las presiones mayores también están en los tramos de entrada y los tramos que alimentan la salida en el nodo. Se presentan presiones similares siempre y cuando solo esté habilitada una salida de flujo. En la Ilustración 29 se resaltan las presiones bajas en color rojo mientras que la presión en verde es para la presión más alta registrada.

La Tabla 10 muestra las presiones dadas en sistema para cuando el flujo solo sale por el nodo 12.

Los caudales dentro de la red se direccionan hacia el nodo 12, distribuyéndose desde su entrada en el nodo 2 pasando por cada tramo.

El esquema que se muestra en la Ilustración 30 de distribución de caudales demuestra que se cumple también para este caso la continuidad del flujo. El caudal saliente por 12 corresponde al aforado y que los caudales distribuidos en la red tienen el sentido correcto. Por ende los sentidos dados por las presiones están correctos.

Tabla 10. Presiones en la Red para Prueba 4.

PRUEBA #4. FLUJO EN NODO 12					
MALLA	TRAMO	MANOMETRO DE MERCURIO (CM)	MANOMETRO ANALOGICO (PSI)	MAYOR NODO	SENTIDO EN MALLA
MALLA V	2B - 6A	0,047	0,90	2B	POS.
	2A - 3A	0,007	0,10	2A	NEG.
	3B - 4A	0,038	0,75	3B	NEG.
	6C - 5A	0,002	0,10	6C	POS.
	5C - 4B	0,001	0,10	4B	NEG.
MALLA IV	6C - 5A	0,002	0,10	6C	POS.
	6B - 7A	0,024	0,50	6B	POS.
	7C - 9B	0,001	0,10	9B	NEG.
	9A - 5B	0,013	0,25	5B	NEG.
MALLA III	7C - 9B	0,001	0,10	9B	POS.
	7B - 8A	0,022	0,40	7B	POS.
	8C - 10A	0,003	0,10	10A	NEG.
	10B - 9C	0,001	0,10	9C	NEG.
MALLA II	5C - 4B	0,001	0,10	4B	NEG.
	9A - 5B	0,013	0,25	5B	POS.
	10B - 9C	0,001	0,10	9C	POS.
	10C - 11B	0,001	0,10	10C	POS.
	11A - 4C	0,047	0,90	4C	NEG.
MALLA I	8C - 10A	0,003	0,10	10A	POS.
	10C - 11B	0,001	0,10	10C	NEG.
	8B - 13B	0,012	0,25	8B	POS.
	13A - 12A	0,028	0,26	13A	POS.
	12B - 11C	0,078	1,40	11C	NEG.

Ilustración 29. Presiones (MCA) en cada tramo de la red. Prueba 4.

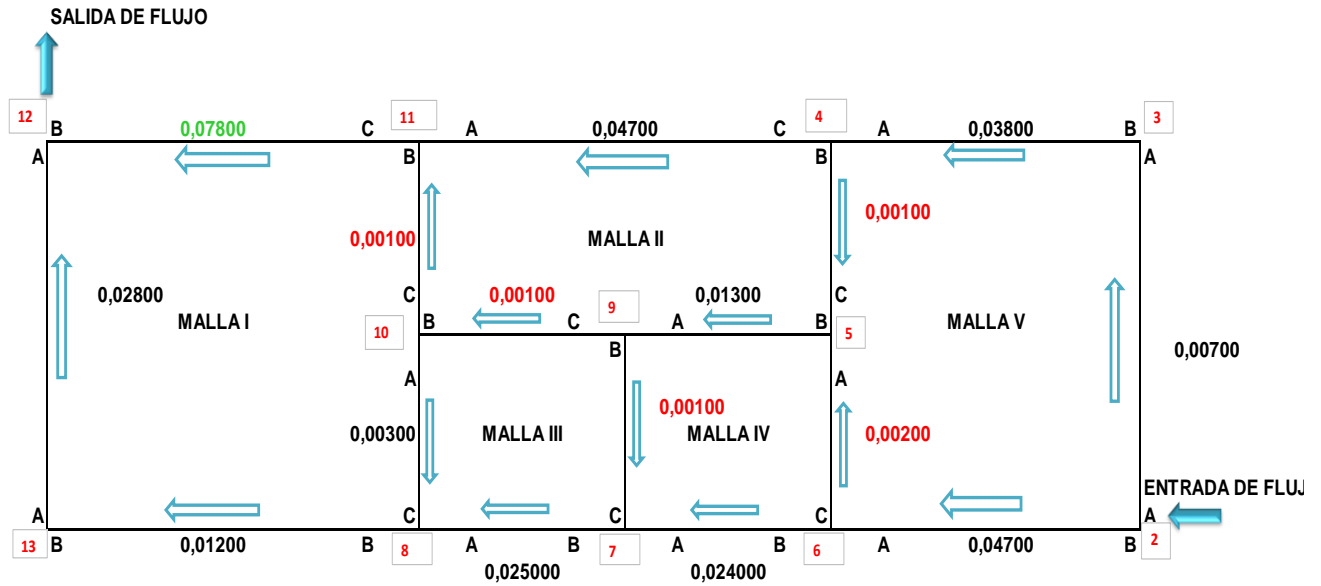
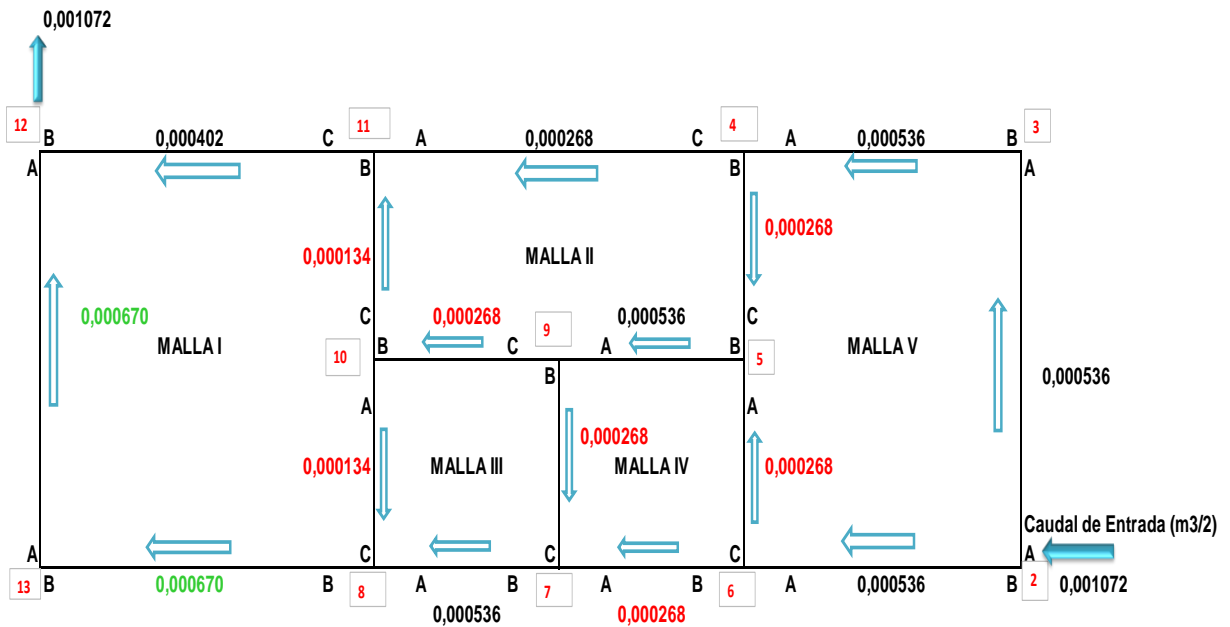


Ilustración 30. Diagrama de distribución de caudales en la red para prueba 4. (Qm³/s)



5.2.2.5. Presiones En La Red Para Cuando El Flujo Sale Por Los Nodos 4 Y 11 (Prueba 5):

Con dos salidas de flujos habilitadas en los nodos 4 y 11, las presiones no tienen cambio significativo alguno, se mantienen las presiones altas en los tramos iniciales de la red en el nodo 2 y se siguen dando presiones mínimas como en las cuatro pruebas pasadas, tal como lo muestra la Ilustración 31 y los datos de presión en la Tabla 11.

El caudal saliente por el nodo 11 corresponde a un 68,75% del caudal aforado mientras que el caudal en el nodo 4 es tan solo del 31,25% para **0,000781m³/s (0,781 l/s)** y **0,000355m³/s (0,355 l/s)** respectivamente. Esto porque al nodo 11 lo alimentan tres de los tres caudales en los tramos que componen al nodo, mientras que al nodo 4 solo lo alimentan dos de los tres caudales de los tramos que lo componen. En la Ilustración 32 de distribución de caudales se observa esta situación. Nuevamente se cumple con la teoría y leyes de la continuidad de flujo, puesto que la suma de los caudales salientes en los nodos 4 y 11 es igual al caudal aforado.

Ilustración 31. Presiones (MCA) en cada tramo de la red. Prueba 5.

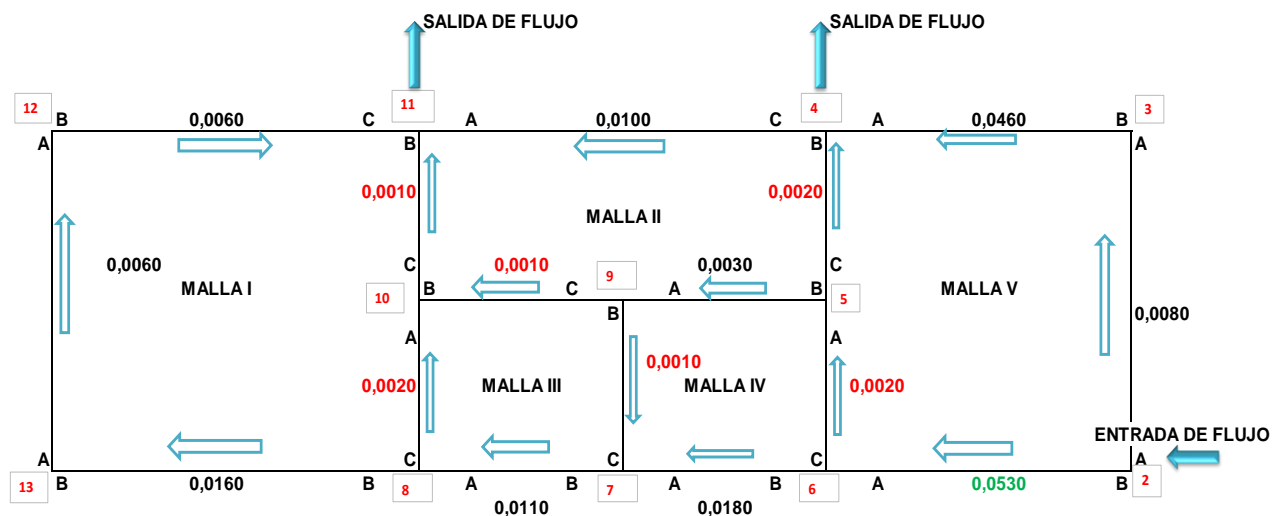
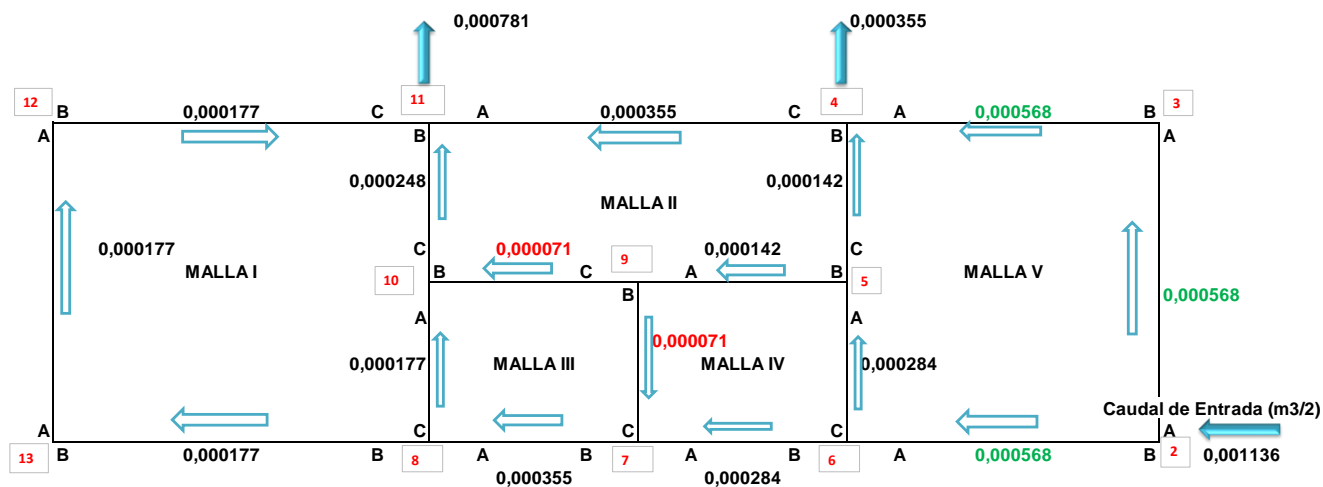


Tabla 11. Presiones en la Red para Prueba 5

PRUEBA #5. FLUJO EN NODOS 4 Y 11					
MALLA	TRAMO	MANOMETRO DE MERCURIO (CM)	MANOMETRO ANALOGICO (PSI)	MAYOR NODO	SENTIDO EN MALLA
MALLA V	2B - 6A	0,053	1,00	2B	POS.
	2A - 3A	0,008	0,20	2A	NEG.
	3B - 4A	0,046	0,80	3B	NEG.
	6C - 5A	0,002	0,10	6C	POS.
	5C - 4B	0,002	0,10	5C	POS.
MALLA IV	6C - 5A	0,002	0,10	6C	NEG.
	6B - 7A	0,018	0,35	6B	POS.
	7C - 9B	0,001	0,10	9B	NEG.
	9A - 5B	0,003	0,10	5B	NEG.
MALLA III	7C - 9B	0,001	0,10	9B	POS.
	7B - 8A	0,011	0,20	7B	POS.
	8C - 10A	0,002	0,10	8C	NEG.
	10B - 9C	0,001	0,10	9C	NEG.
MALLA II	5C - 4B	0,002	0,10	5C	NEG.
	9A - 5B	0,003	0,10	5B	POS.
	10B - 9C	0,001	0,10	9C	POS.
	10C - 11B	0,003	0,10	10C	POS.
MALLA I	11A - 4C	0,010	0,20	4C	NEG.
	8C - 10A	0,002	0,10	8C	POS.
	10C - 11B	0,003	0,10	10C	NEG.
	8B - 13B	0,016	0,25	8B	POS.
	13A - 12A	0,006	0,10	13A	POS.
	12B - 11C	0,006	0,25	12B	POS.

Ilustración 32. Diagrama de distribución de caudales en la red para prueba 5. (Qm3/s)



5.2.2.6. Presiones En La Red Para Cuando El Flujo Sale Por Los Nodos 4 y 12. (Prueba 6):

Al igual que la prueba 5, esta prueba cuenta con la salida del flujo por dos de las tres salidas posibles. Pero a diferencia que la anterior, las presiones varían un poco más. La mayor presión solo se presentó en tres tramos importantes en la red, el 2B-6A con 0,055mca (1,00psi), 3B-4A con una presión de 0,045mca y en el tramo 12B-11C de 0,025mca correspondiente los dos primero tramos ala entrada de la red y el tercer tramo que alimenta la salida por el nodo 12. Así lo reflejan los datos en la Tabla 12 para cada malla y tramo de la red y en la Ilustración 33 de diagrama de presiones en la red.

Con las presiones arrojadas en esta prueba, la distribución del caudal en la red se dio de tal manera que el flujo recorre los tramos en dirección a las salidas en los nodos 4 y 12.

Tabla 12. Presiones en la Red para Prueba 6.

PRUEBA #6. FLUJO EN NODOS 4 Y 12					
MALLA	TRAMO	MANOMETRO DE MERCURIO (CM)	MANOMETRO ANALOGICO (PSI)	MAYOR NODO	SENTIDO EN MALLA
MALLA V	2B - 6A	0,055	1,00	2B	POS.
	2A - 3A	0,008	0,20	2A	NEG.
	3B - 4A	0,045	1,30	3B	NEG.
	6C - 5A	0,001	0,10	6C	POS.
	5C - 4B	0,001	0,10	5C	POS.
MALLA IV	6C - 5A	0,001	0,10	6C	NEG.
	6B - 7A	0,018	0,32	6B	POS.
	7C - 9B	0,001	0,10	9B	NEG.
	9A - 5B	0,002	0,10	5B	NEG.
MALLA III	7C - 9B	0,001	0,10	9B	POS.
	7B - 8A	0,011	0,20	7B	POS.
	8C - 10A	0,002	0,10	8C	POS.
	10B - 9C	0,001	0,10	9C	NEG.
MALLA II	5C - 4B	0,001	0,10	5C	NEG.
	9A - 5B	0,002	0,10	5B	POS.
	10B - 9C	0,001	0,10	9C	POS.
	10C - 11B	0,002	0,10	10C	POS.
	11A - 4C	0,009	0,15	4C	NEG.
MALLA I	8C - 10A	0,002	0,10	8C	NEG.
	10C - 11B	0,002	0,10	10C	NEG.
	8B - 13B	0,003	0,10	8B	POS.
	13A - 12A	0,006	0,15	13A	POS.
	12B - 11C	0,025	0,50	11C	NEG.

Estas presiones hacen que el caudal que sale por el nodo 12 sea mucho mayor que aquel que sale por el nodo 4, teniendo en cuenta también que al nodo 12 lo alimentan dos de los dos tramos que lo componen, saliendo por este un caudal de $0,000787 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente

al 68,75% del caudal aforado. Mientras que en el nodo 4 solo se registra un caudal del $0,000358 \text{ m}^3/\text{s}$ (31,25% del caudal aforado). La Ilustración 34 muestra de manera gráfica la distribución de caudales demostrando que en esta prueba también se cumple la teoría de la continuidad de flujo en la red.

Ilustración 33. Presiones (MCA) en cada tramo de la red. Prueba 6.

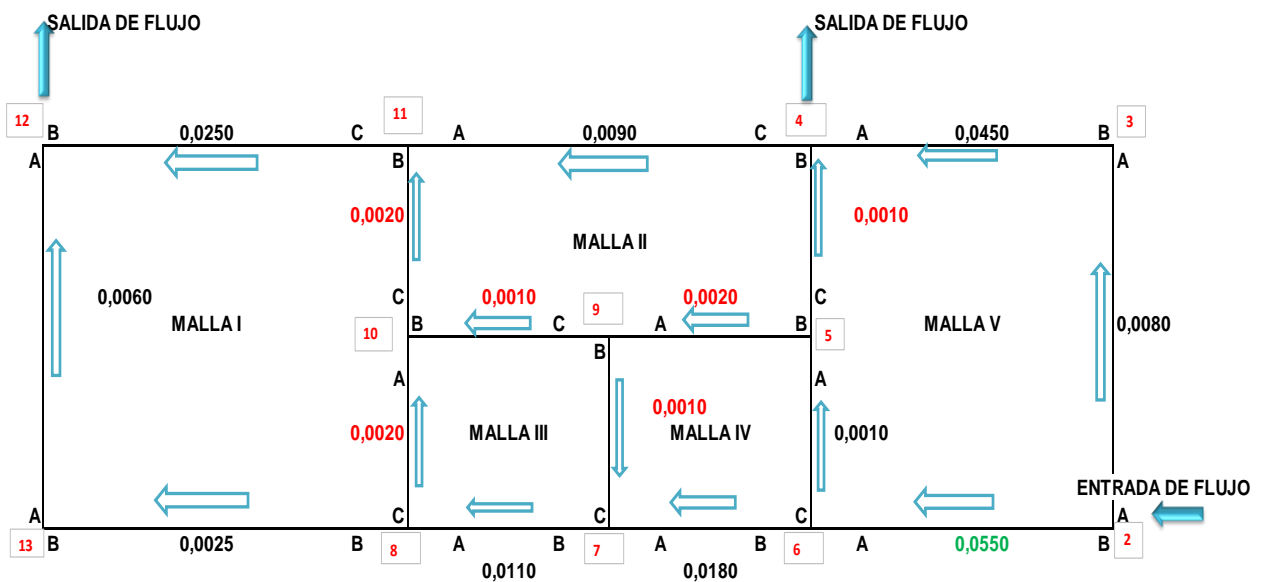
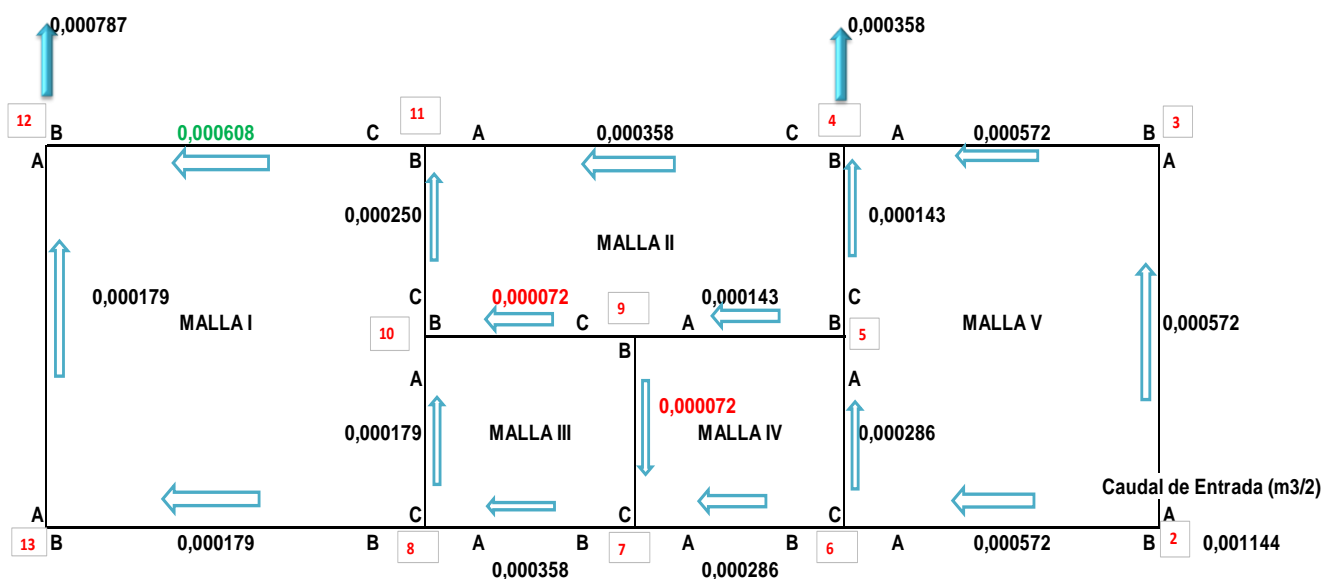


Ilustración 34. Diagrama de distribución de caudales en la red para prueba 6. (Qm^3/s)

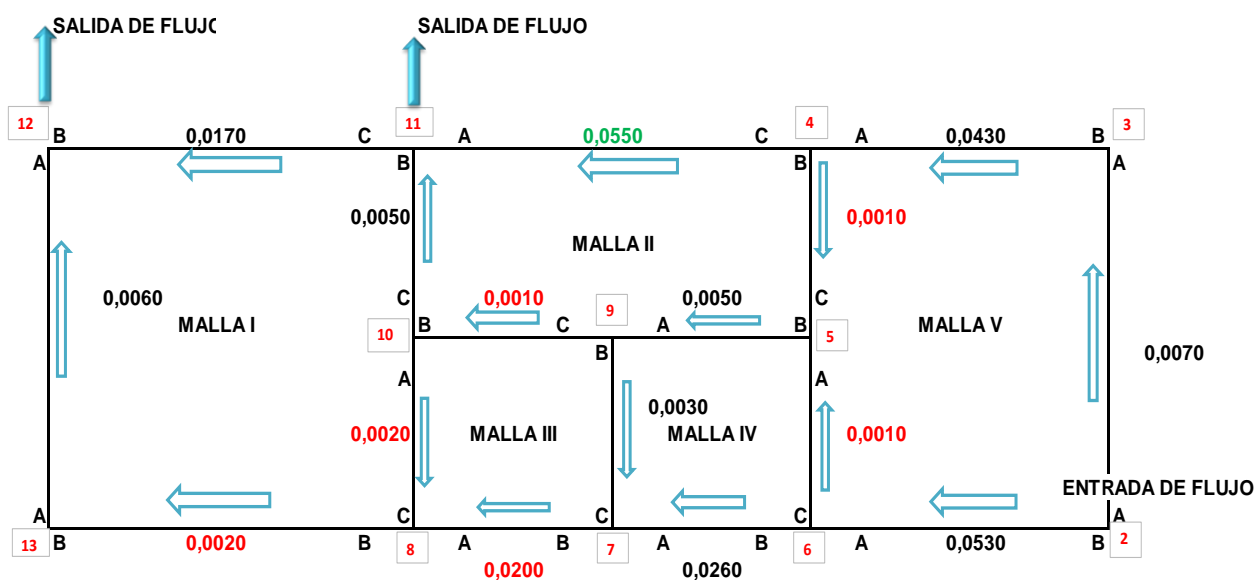


5.2.2.7. Presiones En La Red Para Cuando El Flujo Salga Por Los Nodos 11 Y 12. (Prueba 7):

La salida del flujo en este caso está dada en los nodos 11 y 12, las mayores presiones al igual que el resto de pruebas se refleja en los tramos que componen al nodo de entrada y aquellos que alimentan la salida de flujo en 11 y 12.

Las presiones más bajas se dan en los tramos verticales más cortos de la red. En la Ilustración 35 se ven todas las presiones al tener salidas de flujo en los nodos 11 y 12. Con el mismo comportamiento al de las pruebas con dos de las tres válvulas abiertas. (Dos de las tres posibles salidas de flujo habilitadas)

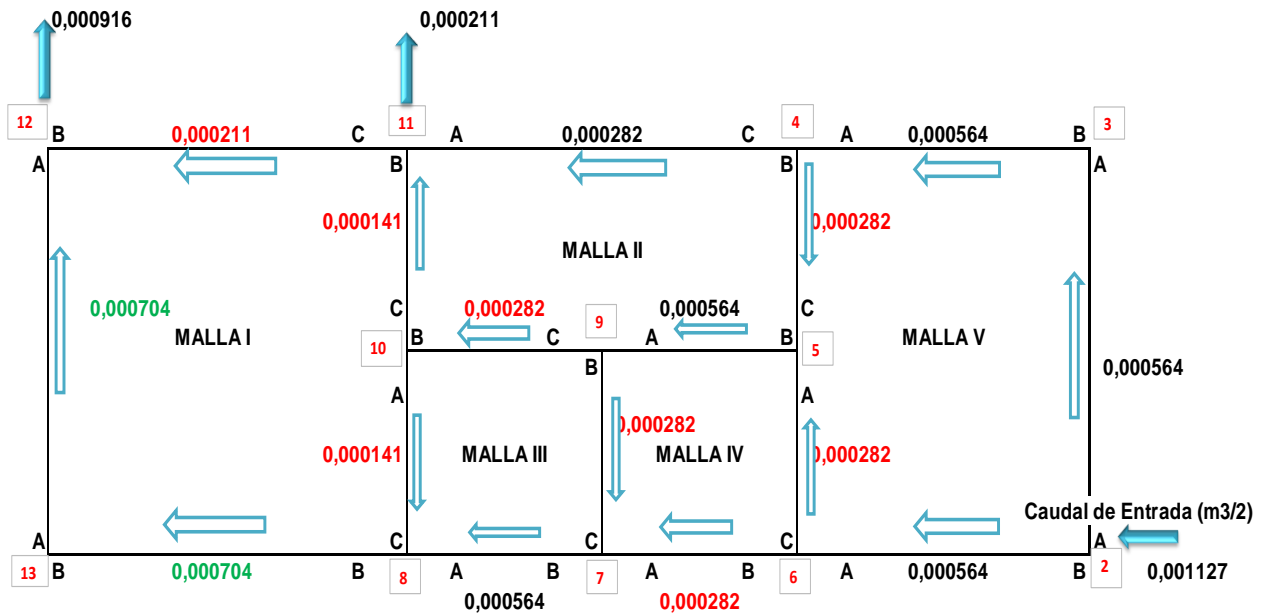
Ilustración 35. Presiones (MCA) en cada tramo de la red. Prueba 7.



Los caudales distribuidos en la red por las presiones registradas se muestran en la ilustración 31, aquí se tiene que la suma de los caudales salientes por los nodos 11 y 12 es igual al caudal aforado. El caudal que sale por el nodo 11 es de $0,000211\text{m}^3/\text{s}$ que representa tan solo un 18,75% del caudal aforado, mientras que el caudal en 12 que es de $0,000916\text{m}^3/\text{s}$ representa un 81,25% del caudal aforado. Esto puesto que al nodo 12 lo

alimentas dodo de los dos tramos que lo componen, mientras que al nodo 11, solo dos de los tres tramos alimentan el punto tal como se observa en la Ilustración 36.

Ilustración 36. Diagrama de distribución de caudales en la red para prueba 7. (Qm³/s)



Las presiones para cada una de las alternativas de salida de flujo reflejan en general que no sobrepasan 0,055mca (1,5 psi) y que se registran presiones mínimas como 0,010mca (0,10psi.). Gran parte de las presiones altas se presentan en la malla V (cinco de siete pruebas presentan este fenómeno) de la red específicamente en los tramos iniciales como el 2B-6A y el 3B-4A. Mientras que las presiones más bajas se dan en los tramos más cortos de la red como lo son 6C-5A, 5C-4B, 7C-9B, 9A-5B, 10B-9C, etc. Dichos tramos correspondientes a las mallas centrales de la red. Con la Tabla 13 mostramos todas las presiones de todas las pruebas resaltando en amarillo las mayores y en rojo aquellas presiones mínimas.

También que el direccionamiento de los caudales dentro de la red se da de manera ideal para el cumplimiento de la ley de la continuidad de flujo.

Tabla 13. Presiones para cada una de las pruebas realizadas.

PRUEBA	1		2		3		4		5		6		7		
	M.C.A	P.S.I	M.C.A	P.S.I	M.C.A	P.S.I	M.C.A	P.S.I	M.C.A	P.S.I	M.C.A	P.S.I	M.C.A	P.S.I	
MALLA V	2B - 6A	0.0070	0.20	0.050	0.90	0.049	0.60	0.047	0.90	0.053	1.00	0.055	1.00	0.053	1.00
	2A - 3A	0.0100	0.25	0.008	0.20	0.002	0.10	0.007	0.10	0.008	0.20	0.008	0.20	0.007	0.20
	3B - 4A	0.0520	1.00	0.045	0.80	0.007	0.10	0.038	0.75	0.046	0.80	0.045	1.30	0.043	0.80
	6C - 5A	0.0050	0.10	0.003	0.10	0.001	0.10	0.002	0.10	0.002	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10
	5C - 4B	0.0010	0.10	0.004	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10	0.002	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10
MALLA IV	6C - 5A	0.0050	1.00	0.003	0.10	0.001	0.10	0.002	0.10	0.002	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10
	6B - 7A	0.0190	0.40	0.012	0.30	0.023	0.50	0.024	0.50	0.018	0.35	0.018	0.32	0.026	0.50
	7C - 9B	0.0020	0.10	0.002	0.10	0.002	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10	0.003	0.10
	9A - 5B	0.0030	0.10	0.002	0.10	0.010	0.25	0.013	0.25	0.003	0.10	0.002	0.10	0.005	0.20
	7C - 9B	0.0020	0.10	0.002	0.10	0.002	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10	0.003	0.10
MALLA III	7B - 8A	0.0130	0.30	0.006	0.15	0.017	0.40	0.022	0.40	0.011	0.20	0.011	0.20	0.020	0.40
	8C - 10A	0.0010	0.10	0.003	0.10	0.001	0.10	0.003	0.10	0.002	0.10	0.002	0.10	0.002	0.10
	10B - 9C	0.0020	0.10	0.005	0.20	0.001	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10
	5C - 4B	0.0010	0.10	0.004	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10	0.002	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10
	9A - 5B	0.0030	0.10	0.002	0.10	0.001	0.25	0.013	0.25	0.003	0.10	0.002	0.10	0.005	0.20
MALLA II	10B - 9C	0.0020	0.10	0.005	0.20	0.001	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10	0.001	0.10
	10C - 11B	0.0040	0.20	0.001	0.10	0.008	0.20	0.001	0.10	0.003	0.10	0.002	0.10	0.005	0.10
	11A - 4C	0.0140	0.40	0.027	0.60	0.052	1.00	0.047	0.90	0.010	0.20	0.009	0.15	0.055	1.00
	8C - 10A	0.0020	0.10	0.003	0.10	0.001	0.10	0.003	0.10	0.002	0.10	0.002	0.10	0.002	0.10
	10C - 11B	0.0040	0.20	0.001	0.10	0.008	0.20	0.001	0.10	0.003	0.10	0.002	0.10	0.005	0.10
MALLA I	8B - 13B	0.0020	0.10	0.003	0.20	0.008	0.20	0.012	0.25	0.016	0.25	0.003	0.10	0.002	0.10
	13A - 12A	0.0050	0.20	0.004	0.20	0.004	0.15	0.028	0.26	0.006	0.10	0.006	0.15	0.006	0.20
	12B - 11C	0.0090	0.20	0.002	0.10	0.014	0.30	0.078	1.40	0.006	0.25	0.025	0.50	0.017	0.35



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

5.3. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO Y MODELACIÓN EPANET.

Como método de cálculo para el estudio de la red, se eligió el método de aproximaciones sucesivas, de Hardy Cross, puesto que éste está basado en el cumplimiento de dos principios o leyes muy importantes; Ley de continuidad de masa en los nudos y Ley de conservación de la energía en los circuitos.

El planteamiento de esta última ley implica el uso de una ecuación de pérdida de carga o de "pérdida" de energía, bien sea la ecuación de Hazen& Williams o, bien, la ecuación de Darcy&Weisbach.

La ecuación de Hazen& Williams, de naturaleza empírica, limitada a tuberías de diámetro mayor de 2", ha sido, por muchos años, empleada para calcular las pérdidas de carga en los tramos de tuberías, en la aplicación del Método de Cross. Ello obedece a que supone un valor constante para el coeficiente de rugosidad, C , de la superficie interna de la tubería, lo cual hace más simple el cálculo de las "pérdidas" de energía.

La ecuación de Darcy&Weisbach, de naturaleza racional y de uso universal, casi nunca se ha empleado acoplada al método de Hardy Cross, porque involucra el coeficiente de fricción, f , el cual es función de la rugosidad, k , de la superficie interna del conducto, y el número de Reynolds, R , de flujo, el que, a su vez depende de la temperatura y viscosidad del agua, y del caudal del flujo en las tuberías.

Como quiera que el Método de Hardy Cross es un método iterativo que parte de la suposición de los caudales iniciales en los tramos, satisfaciendo la Ley de Continuidad de Masa en los nudos, los cuales corrige sucesivamente con un valor particular ΔQ , en cada iteración se deben calcular los caudales actuales o corregidos en los tramos de la red. Ello implica el cálculo de los valores de R y f de todos y cada uno de los tramos de tuberías de la red, lo cual sería inacabable y agotador si hubiese que "hacerlo a mano" con una calculadora sencilla. Más aún, sabiendo que el cálculo del coeficiente de fricción, f , es

también iterativo, por aproximaciones sucesiva. Pero para este caso los cálculos son hechos con hojas de cálculo de Excel facilitando así operaciones extensas y reduciendo tiempos. La ejecución con la ayuda del programa que aquí se presenta (EPANET), permitió hacer modificaciones en los caudales concentrados en los nudos y tramos, y re calcular la red completamente cuantas veces fue necesario y conveniente.

5.3.1. Implementación de Hardy Cross.

Implementando una hoja de cálculo de Excel donde identificamos los tramos de la red y las características propias de las tuberías como longitudes, diámetros, los caudales iniciales, entre otras. Se calcularon entonces todas las correcciones de caudales en 10 iteraciones hasta alcanzar una convergencia en el método.

Para una primera verificación de caudales, en este caso para la prueba 1 donde el flujo sale por los nodos 4, 11 y 12, los caudales son sometidos a una corrección inicial tal cual se ve en la Tabla 14, aunque muy pequeña, necesitarías para lograr la convergencia del método.

Tabla 14. Corrección de Caudales en Prueba 1.

CORRECIÓN DE CAUDALES PARA SALIDA DE FLUJO EN LOS NODOS 4 - 11 - 12												
MALLA	Línea	Q(M3/S)	D (cm)	D (m)	A (m2)	v (m/s)	Re	f	L (m)	K	C	Corrección
MALLA V	2B - 6A	0,00056	1,74625	0,01746	2E-04	2,33781	40824,01	0,022	1,860	2,380	2,07E+10	0,00003
	2A - 3A	-0,00056	2,38125	0,02381	4E-04	1,25722	29937,60	0,024	1,860	1,879	4,74E+09	
	3B - 4A	-0,00056	1,74625	0,01746	2E-04	2,33781	40824,01	0,022	1,860	2,380	2,07E+10	
	6C - 5A	0,00028	2,38125	0,02381	4E-04	0,62861	14968,80	0,029	0,930	1,118	2,82E+09	
	5C - 4B	-0,00019	2,38125	0,02381	4E-04	0,41907	9979,20	0,032	0,930	1,246	3,14E+09	
MALLA IV	6C - 5A	-0,00028	2,38125	0,02381	4E-04	0,62861	14968,80	0,029	0,930	1,118	2,82E+09	0,00008
	6B - 7A	0,00028	1,74625	0,01746	2E-04	1,16890	20412,00	0,026	1,400	2,121	1,85E+10	
	7C - 9B	0,00014	2,38125	0,02381	4E-04	0,31431	7484,40	0,035	0,930	1,348	3,40E+09	
	5B - 9A	-0,00047	1,74625	0,01746	2E-04	1,94817	34020,01	0,023	1,400	1,871	1,63E+10	
MALLA III	7C - 9B	-0,00014	2,38125	0,02381	4E-04	0,31431	7484,40	0,035	0,930	1,348	3,40E+09	0,00020
	7B - 8A	0,00014	1,74625	0,01746	2E-04	0,58445	10206,00	0,032	1,400	2,541	2,22E+10	
	8C - 10A	0,00007	2,38125	0,02381	4E-04	0,15715	3742,20	0,042	0,930	1,651	4,16E+09	
MALLA II	9C - 10B	-0,00061	1,74625	0,01746	2E-04	2,53263	44226,01	0,022	1,400	1,758	1,53E+10	
	5C - 4B	0,00019	2,38125	0,02381	4E-04	0,41907	9979,20	0,032	0,930	1,246	3,14E+09	-0,00017
	5B - 9A	0,00047	1,74625	0,01746	2E-04	1,94817	34020,01	0,023	1,400	1,871	1,63E+10	
	9C - 10B	0,00061	1,74625	0,01746	2E-04	2,53263	44226,01	0,022	1,400	1,758	1,53E+10	
	10C - 11E	0,00068	2,38125	0,02381	4E-04	1,51914	36174,61	0,023	0,930	0,898	2,26E+09	
MALLA I	4C - 11A	-0,00019	1,74625	0,01746	2E-04	0,77927	13608,00	0,029	2,800	4,707	4,10E+10	
	8C - 10A	-0,00007	2,38125	0,02381	4E-04	0,15715	3742,20	0,042	0,930	1,651	4,16E+09	0,00015
	10C - 11E	-0,00068	2,38125	0,02381	4E-04	1,51914	36174,61	0,023	0,930	0,898	2,26E+09	
	8B - 13B	0,00007	1,74625	0,01746	2E-04	0,29223	5103,00	0,039	2,870	6,333	5,52E+10	
	13A - 12A	0,00007	1,74625	0,01746	2E-04	0,29223	5103,00	0,039	1,860	4,104	3,58E+10	
	11C - 12E	-0,00043	1,74625	0,01746	2E-04	1,80206	31468,50	0,024	2,870	3,907	3,41E+10	

Al hacer las iteraciones necesarias para la corrección de los caudales, llegamos a que desde la sexta iteración, las correcciones en los caudales se hacían despreciables. Siendo así la iteración número seis de las correcciones la que nos arroja los valores exactos de los caudales dentro la red como lo muestra la Tabla 15.

Tabla 15. Corrección de Caudales. Sexta Iteración. Prueba 1.

SALIDA DE FLUJO EN LOS NODOS 4 - 11 - 12 (6ta ITERACION)												
	Línea	Q(M3/S)	D (cm)	D (m)	A (m2)	v (m/s)	Re	f	L (m)	K	C	Corrección
MALLA V	2B - 6A	0,000588	1,74625	0,01746	0,000239498	2,455133334	42872,76584	0,022086976	1,86	2,352571205	20507246047	-9,03862E-09
	2A - 3A	-0,000532	2,38125	0,02381	0,000445348	1,194128333	28435,18093	0,024364626	1,86	1,903126669	4797753873	
	3B - 4A	-0,000532	1,74625	0,01746	0,000239498	2,220486569	38775,24672	0,02261572	1,86	2,408889865	20998173005	
	6C - 5A	0,000271	2,38125	0,02381	0,000445348	0,6089749	14501,2148	0,028873562	0,93	1,127660391	2842814981	
MALLA IV	5C - 4B	-0,000024	2,38125	0,02381	0,000445348	0,054157119	1289,616399	0,059777594	0,93	2,334620982	5885544584	
	6C - 5A	-0,000271	2,38125	0,02381	0,000445348	0,6089749	14501,2148	0,028873562	0,93	1,127660391	2842814981	4,25444E-09
	6B - 7A	0,000317	1,74625	0,01746	0,000239498	1,322741991	23098,38201	0,025644393	1,4	2,055957079	17921675481	
	7C - 9B	0,000012	2,38125	0,02381	0,000445348	0,026968744	642,1932141	0,077221223	0,93	3,015883988	7602998433	
MALLA III	5B - 9A	-0,000295	1,74625	0,01746	0,000239498	1,23309673	21532,95164	0,026097716	1,4	2,092300772	18238481646	
	7C - 9B	-0,000012	2,38125	0,02381	0,000445348	0,026968744	642,1932141	0,077221223	0,93	3,015883988	7602998433	4,26193E-09
	7B - 8A	0,000305	1,74625	0,01746	0,000239498	1,2725935	22222,66399	0,025892679	1,4	2,075862634	18095191212	
	8C - 10A	0,000080	2,38125	0,02381	0,000445348	0,180138387	4289,545347	0,040561372	0,93	1,584129177	3993565967	
MALLA II	9C - 10B	-0,000307	1,74625	0,01746	0,000239498	1,28324522	22408,66966	0,02583885	1,4	2,071547047	18057572454	
	5C - 4B	0,000024	2,38125	0,02381	0,000445348	0,054157119	1289,616399	0,059777594	0,93	2,334620982	5885544584	-1,52376E-07
	5B - 9A	0,000295	1,74625	0,01746	0,000239498	1,23309673	21532,95164	0,026097716	1,4	2,092300772	18238481646	
	9C - 10B	0,000307	1,74625	0,01746	0,000239498	1,28324522	22408,66966	0,02583885	1,4	2,071547047	18057572454	
MALLA I	10C - 11B	0,000388	2,38125	0,02381	0,000445348	0,87023915	20722,56976	0,026350265	0,93	1,029112724	2594377789	
	4C - 11A	-0,000321	1,74625	0,01746	0,000239498	1,340511199	23408,67681	0,025559444	2,8	4,098293165	35724617443	
	8C - 10A	-0,000080	2,38125	0,02381	0,000445348	0,180138387	4289,545347	0,040561372	0,93	1,584129177	3993565967	-3,2882E-09
	10C - 11B	-0,000388	2,38125	0,02381	0,000445348	0,87023915	20722,56976	0,026350265	0,93	1,029112724	2594377789	
MALLA I	8B - 13B	0,000225	1,74625	0,01746	0,000239498	0,937625424	16373,28397	0,027978785	2,87	4,598374461	40083801199	
	13A - 12A	0,000225	1,74625	0,01746	0,000239498	0,937625424	16373,28397	0,027978785	1,86	2,980131184	25977655133	
	11C - 12B	-0,000277	1,74625	0,01746	0,000239498	1,156662657	20198,22165	0,026520903	2,87	4,358768356	37995166717	

Las velocidades en esta prueba generan movimientos irregulares e indeterminados de las partículas del fluido en direcciones transversales a la dirección principal de flujo. Y se ve al observar el número de Reynolds que cuenta con valores mayores a 4000 que se caracterizan por flujos turbulentos. Las velocidades y el número de Reynolds se muestran en la Tabla 15 con la corrección de los caudales en la iteración seis.

Todas las iteraciones para las correcciones realizadas en esta primera prueba se muestran en la Tabla 16 donde se observa que los valores no tienen variación alguna desde la iteración número seis. Luego entonces estos serían los caudales a evaluar con Epanet.

Tabla 16. Iteraciones para la corrección de los caudales en la prueba 1.

MALLA	TRAMO	VARIACION DEL CAUDAL DEPENDIENDO DE LAS ITERACIONES. SALIDA FLUJO EN TODOS LOS NODOS													
		0	1era	2da	3era	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10ma			
MALLAV	2B - 6A	0,000560	0,000585	0,000589	0,000588	0,000588	0,000588	0,000588	0,000588	0,000588	0,000588	0,000588	0,000588	0,000588	0,000588
	2A - 3A	-0,000560	-0,000535	-0,000531	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532
	3B - 4A	-0,000560	-0,000535	-0,000531	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532
	6C - 5A	0,000280	0,000225	0,000279	0,000272	0,000272	0,000271	0,000271	0,000271	0,000271	0,000271	0,000271	0,000271	0,000271	0,000271
	5C - 4B	-0,000187	0,000005	-0,000035	-0,000022	-0,000025	-0,000024	-0,000024	-0,000024	-0,000024	-0,000024	-0,000024	-0,000024	-0,000024	-0,000024
MALLAIV	6C - 5A	-0,000280	-0,000225	-0,000279	-0,000272	-0,000272	-0,000271	-0,000271	-0,000271	-0,000271	-0,000271	-0,000271	-0,000271	-0,000271	-0,000271
	6B - 7A	0,000280	0,000360	0,000309	0,000320	0,000316	0,000317	0,000317	0,000317	0,000317	0,000317	0,000317	0,000317	0,000317	0,000317
	7C - 9B	0,000140	0,000021	0,000013	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012
	5B - 9A	-0,000467	-0,000219	-0,000314	-0,000290	-0,000297	-0,000295	-0,000295	-0,000295	-0,000295	-0,000295	-0,000295	-0,000295	-0,000295	-0,000295
	7C - 9B	-0,000140	-0,000021	-0,000013	-0,000012	-0,000012	-0,000012	-0,000012	-0,000012	-0,000012	-0,000012	-0,000012	-0,000012	-0,000012	-0,000012
MALLAIII	7B - 8A	0,000140	0,000339	0,000296	0,000309	0,000304	0,000305	0,000305	0,000305	0,000305	0,000305	0,000305	0,000305	0,000305	0,000305
	8C - 10A	0,000070	0,000117	0,000072	0,000084	0,000080	0,000081	0,000080	0,000080	0,000080	0,000080	0,000080	0,000080	0,000080	0,000080
	9C - 10B	-0,000607	-0,000240	-0,000328	-0,000302	-0,000309	-0,000307	-0,000307	-0,000307	-0,000307	-0,000307	-0,000307	-0,000307	-0,000307	-0,000307
	5C - 4B	0,000187	-0,000005	0,000035	0,000022	0,000025	0,000024	0,000024	0,000024	0,000024	0,000024	0,000024	0,000024	0,000024	0,000024
	5B - 9A	0,000467	0,000219	0,000314	0,000290	0,000297	0,000295	0,000295	0,000295	0,000295	0,000295	0,000295	0,000295	0,000295	0,000295
MALLAII	9C - 10B	0,000607	0,000240	0,000328	0,000302	0,000309	0,000307	0,000307	0,000307	0,000307	0,000307	0,000307	0,000307	0,000307	0,000307
	10C - 11B	0,000677	0,000358	0,000400	0,000385	0,000389	0,000387	0,000387	0,000387	0,000387	0,000387	0,000387	0,000387	0,000387	0,000387
	4C - 11A	-0,000187	-0,000354	-0,000309	-0,000323	-0,000320	-0,000321	-0,000321	-0,000321	-0,000321	-0,000321	-0,000321	-0,000321	-0,000321	-0,000321
	8C - 10A	-0,000070	-0,000117	-0,000072	-0,000084	-0,000080	-0,000081	-0,000080	-0,000080	-0,000080	-0,000080	-0,000080	-0,000080	-0,000080	-0,000080
	10C - 11B	-0,000677	-0,000358	-0,000400	-0,000385	-0,000389	-0,000387	-0,000387	-0,000387	-0,000387	-0,000387	-0,000387	-0,000387	-0,000387	-0,000387
MALLAI	8B - 13B	0,000070	0,000222	0,000224	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225
	13A - 12A	0,000070	0,000222	0,000224	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225
	11C - 12B	-0,000432	-0,000280	-0,000278	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

Para el resto de pruebas, donde se varían las aperturas de las válvulas en la salida de los nodos 4, 11 y 12, los caudales corregidos también fue posible obtenerlos en la sexta iteración al igual que en la prueba número 1 como se describió anteriormente. Estos caudales iniciales y corregidos para cada una de las pruebas los resumimos en la Tabla 17.

A semejanza de la prueba 1 donde la salida de flujo se da en los nodos 4, 11 y 12, las velocidades y el número de Reynolds tiene el mismo comportamiento en las seis pruebas restantes, donde se presentan velocidades no superiores a 2,55m/s especialmente en los primeros tramos de entrada en la red. Las velocidades más bajas están en 0,008m/s y 0,20m/s.

La Tabla 18. Velocidades para cada una de las Pruebas. Velocidad inicial y velocidad corregida. nos muestra las velocidades para cada una de las pruebas tanto iniciales como después de corregidas hasta la sexta iteración. Se puede observar de manera clara que las velocidades más altas están siempre ubicadas en los tramos iniciales y en los tramos finales de la red. Como por ejemplo el tramo 12B-11C de la malla I presenta la más alta de las velocidades de todas las pruebas con 2,55m/s. Esta velocidad se da cuando se mantienen las válvulas de las tuberías salientes de los nodos 4 y 11 cerradas, mientras que la válvula en el nodo 12 está abierta (Prueba 4). Para esta misma prueba se presenta la velocidad más baja de todas las alternativas de salidas de flujo, 0,008m/s registrada en el tramo 7C-9B de la malla III.

Aunque los valores de la velocidad máximos y mínimos se registran en la prueba 4, la prueba 2 donde el flujo sale solo por el nodo 4, cuenta con un promedio de velocidades bajas en comparación al resto de pruebas. Mientras que en la prueba 7 con la salida de flujo por los nodos 11 y 12, se cuenta con un promedio de velocidades altas en comparación con el resto de pruebas.

Tabla 17. Caudales para cada una de las Pruebas. Caudal inicial y caudal corregido.

PRUEBA	1		2		3		4		5		6		7		
	4 - 11 - 12 ABIERTOS	Q Inicial	Q Corregido	4 ABIERTO	Q Inicial	Q Corregido	12 ABIERTO	Q Inicial	Q Corregido	4 - 11 ABIERTOS	Q Inicial	Q Corregido	4 - 12 ABIERTOS	Q Inicial	Q Corregido
MALLA V	2B - 6A	0.00056	0.00059	0.00057	0.00058	0.00055	0.00054	0.00057	0.00057	0.00059	0.00057	0.00060	0.00056	0.00056	0.00058
	2A - 3A	-0.00056	-0.00053	-0.00057	-0.00056	-0.00055	-0.00054	-0.00057	-0.00057	-0.00054	-0.00057	-0.00055	-0.00056	-0.00056	-0.00055
	3B - 4A	-0.00056	-0.00053	-0.00057	-0.00056	-0.00055	-0.00054	-0.00057	-0.00057	-0.00054	-0.00057	-0.00055	-0.00056	-0.00056	-0.00055
	6C - 5A	0.00028	0.00027	0.00029	0.00044	-0.00014	0.00027	0.00027	0.00028	0.00032	0.00029	0.00032	0.00028	0.00028	0.00063
	5C - 4B	-0.00019	-0.0002	0.00054	0.00046	-0.00027	-0.00013	-0.00027	-0.00014	0.00009	0.00014	0.00007	-0.00028	-0.00027	-0.00027
	6C - 5A	-0.00028	-0.00027	-0.00029	-0.00044	0.00014	-0.00022	-0.00027	-0.00028	-0.00032	-0.00029	-0.00032	-0.00028	-0.00028	-0.00063
MALLA IV	6B - 7A	0.00028	0.00032	0.00029	0.00014	0.00069	0.00027	0.00037	0.00028	0.00027	0.00028	0.00028	0.00028	0.00028	0.00065
	7C - 9B	0.00014	0.00001	0.00014	0.0006	0.00034	-0.0002	-0.0002	-0.0007	0.0002	0.00014	0.00001	0.00028	0.00028	0.00009
	9A - 5B	-0.00047	-0.00030	0.00025	0.0004	-0.00014	-0.00035	-0.00034	-0.00014	-0.00024	-0.00014	-0.00025	0.00036	0.00036	0.00022
	7C - 9B	-0.00014	-0.00001	-0.00014	-0.0008	-0.00034	0.00027	-0.00034	0.00007	-0.0002	-0.00014	-0.0001	0.00028	0.00028	-0.00009
MALLA III	7B - 6A	0.00014	0.00030	0.00014	0.0006	0.00034	0.00036	0.00036	0.00035	0.00025	0.00014	0.00026	0.00036	0.00036	0.00042
	8C - 10A	0.00007	0.00008	0.00007	0.0004	0.00017	-0.00013	-0.00033	0.00018	0.00018	0.00007	-0.00008	0.00014	0.00014	0.00029
	10B - 9C	-0.00061	-0.00031	0.00011	-0.0005	-0.00048	-0.00036	-0.00027	-0.00036	-0.00026	-0.00029	-0.00026	-0.00028	-0.00028	-0.00043
	5C - 4B	0.00019	0.0002	-0.00054	-0.00048	0.00027	0.00013	-0.00027	0.00015	-0.00014	-0.00014	-0.00009	0.00028	0.00028	0.00027
MALLA II	9A - 5B	0.00047	0.00030	-0.00025	-0.0004	0.00014	0.00035	0.00034	0.00035	0.00024	0.00014	0.00025	0.00036	0.00036	-0.00022
	10B - 9C	0.00061	0.00031	-0.00011	0.0005	0.00048	0.00027	0.00036	0.00007	0.00026	0.00029	0.00026	0.00028	0.00028	0.00043
	10C - 11B	0.00068	0.00039	-0.00004	0.0009	0.00065	0.00062	-0.00013	-0.00011	0.00025	0.00036	0.00019	0.00014	0.00014	0.00045
	11A - 4C	-0.00019	-0.00032	0.00004	0.0010	-0.00027	-0.00039	-0.00027	-0.00036	-0.00035	-0.00036	-0.00026	-0.00028	-0.00028	-0.00028
MALLA I	8C - 10A	-0.00007	-0.00008	-0.00007	-0.0004	-0.00017	0.00013	0.00013	0.00010	-0.00018	-0.00018	0.00008	0.00014	0.00014	-0.00029
	10C - 11B	-0.00068	-0.00039	0.00004	-0.0009	-0.00065	0.00013	0.00013	0.00011	-0.00025	-0.00036	-0.00019	-0.00014	-0.00014	-0.00045
	8B - 13B	0.00007	0.0002	0.00007	0.0001	0.00017	0.00067	0.00046	0.00046	0.00018	0.00018	0.00034	0.00070	0.00070	0.00040
	13A - 12A	0.00007	0.0002	0.00007	0.0001	0.00017	0.00067	0.00046	0.00046	0.00018	0.00018	0.00034	0.00070	0.00070	0.00040
	12B - 11C	-0.00043	-0.00028	0.00007	0.0001	0.00017	-0.00040	-0.00061	-0.00061	0.00018	-0.00072	-0.00045	-0.00021	-0.00021	-0.00051

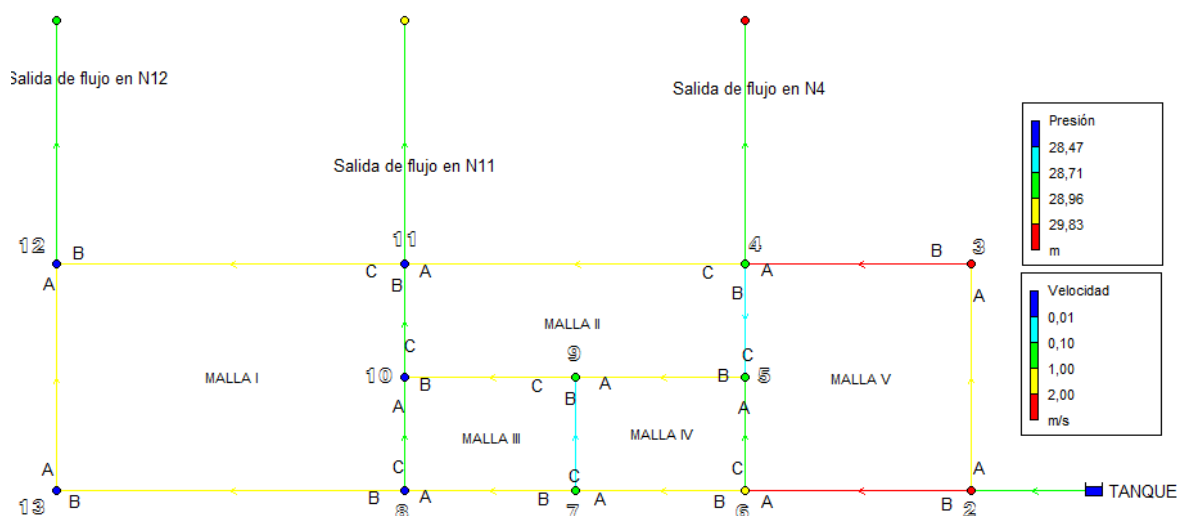
Tabla 18. Velocidades para cada una de las Pruebas. Velocidad inicial y velocidad corregida.

PRUEBA	1		2		3		4		5		6		7	
	4 - 11 - 12 ABIERTOS	4 ABIERTO	11 ABIERTO	12 ABIERTO	4 - 11 ABIERTOS	4 - 12 ABIERTOS	11 - 12 ABIERTOS	V Inicial	V Corregida	V Inicial	V Corregida	V Inicial	V Corregida	V Inicial
MALLA V	2.3781	2.4513	2.3847	2.4027	2.2959	2.4246	2.2371	2.3491	2.3751	2.4908	2.3845	2.4962	2.3510	2.4245
2A - 3A	1.2572	1.7943	1.2839	1.2894	1.2342	1.1628	1.2038	1.1365	1.2753	1.21647	1.28445	1.2467	1.2645	1.2387
3B - 4A	2.3781	2.2049	2.3847	2.34287	2.2959	2.18871	2.23871	2.1250	2.3751	2.28204	2.3845	2.27727	2.3510	2.28158
6C - 5A	0.6261	0.6087	0.6469	0.69547	0.30856	0.48876	0.60196	0.45183	0.63767	0.72783	0.64223	0.72194	0.6372	1.42479
5C - 4B	0.41907	0.5416	1.2018	1.07528	0.61712	0.28733	0.60196	0.33825	0.31884	0.19752	0.32111	0.16894	0.6372	0.60628
6C - 5A	0.6261	0.6087	0.6469	0.69547	0.30856	0.48876	0.60196	0.45183	0.63767	0.72783	0.64223	0.72194	0.6372	1.42479
6B - 7A	1.1880	1.3274	1.1923	0.57918	2.8886	1.5961	1.11935	1.52474	1.1876	1.1759	1.19422	1.15717	1.17655	0.22476
7C - 9B	0.3431	0.02897	0.32085	0.18622	0.77140	0.03405	0.60196	0.008865	0.15942	0.05164	0.32111	0.03328	0.6372	0.20812
9A - 9B	1.94817	1.2310	1.0408	0.14839	0.57377	1.44315	2.23871	1.46916	0.59288	0.98610	0.59711	1.3202	2.3510	0.93129
7C - 9B	0.3431	0.02897	0.32085	0.18622	0.77140	0.03405	0.60196	0.008865	0.15942	0.05164	0.32111	0.03328	0.6372	0.20812
MALLA III	0.59445	1.27259	0.59662	0.23291	1.43443	1.44929	2.23871	1.53007	1.48219	1.03157	0.59711	1.0928	2.3510	1.73948
8C - 10A	0.15715	0.18014	0.16042	0.09646	0.38570	0.57847	0.30088	0.22460	0.39855	0.41307	0.16056	0.17218	0.31636	0.66118
10B - 9C	2.5283	1.28325	0.44746	0.19788	2.00820	1.50846	1.11935	1.48883	0.29844	0.0212	1.19422	1.0390	1.17655	1.81068
5C - 4B	0.41907	0.5416	1.2018	1.07528	0.61712	0.28733	0.60196	0.33825	0.31884	0.19752	0.32111	0.16894	0.6372	0.60628
9A - 5B	1.94817	1.2310	1.0408	0.14839	0.57377	1.44315	2.23871	1.46916	0.59288	0.98610	0.59711	1.3202	2.3510	0.93129
10B - 9C	2.5283	1.28325	0.44746	0.19788	2.00820	1.50846	1.11935	1.48883	0.29844	0.0212	1.19422	1.0390	1.17655	1.81068
10C - 11B	1.51914	1.87024	0.08021	0.20286	1.46567	1.38661	0.30088	0.025377	0.55796	0.99601	0.80278	0.41610	0.31636	1.00220
11A - 4C	0.7927	1.3451	0.14915	0.43079	1.14754	1.6342	1.11935	1.48351	1.48219	1.14714	1.48278	1.09492	1.17655	1.5605
8C - 10A	0.15715	0.18014	0.16042	0.09646	0.38570	0.57847	0.30088	0.22460	0.39855	0.41307	0.16056	0.17218	0.31636	0.66118
10C - 11B	1.51914	1.87024	0.08021	0.20286	1.46567	1.38661	0.30088	0.025377	0.55796	0.99601	0.80278	0.41610	0.31636	1.00220
8B - 13B	0.29223	0.93763	0.29831	0.05356	0.71721	0.37363	2.79838	1.90773	0.74110	0.26346	0.29856	1.41546	2.94138	1.68857
13A - 12A	0.29223	0.93763	0.29831	0.05356	0.71721	0.37363	2.79838	1.90773	0.74110	0.26346	0.29856	1.41546	2.94138	1.68857
12B - 11C	1.80206	1.5666	0.29831	0.05356	0.71721	0.37363	1.67903	2.35588	0.74110	0.26346	2.98556	1.8886	0.8241	2.13723

5.3.2. Modelación de la Red con EPANET.

Para la modelación de la Red mallada del laboratorio, se procedió a montar las características físicas de la Red en el software, como parámetro comparativo antes de proceder al cálculo, se le implanto al programa un máximo de iteraciones de 10, cabe resaltar que este procedimiento fue expuesto en la Metodología. La Ilustración 37 enseña el esquema de la Red luego de corrido el programa, en esta podemos ver el comportamiento de las velocidades, presiones en los nodos y sentidos del flujo a través de las tuberías hacia las salidas ubicadas en los nodos 4, 11 y 12 (una de las siete posibles condiciones de distribución del flujo en la Red), el programa caracteriza el rango de presiones y velocidades de las líneas y los nodos en una gama de colores.

Ilustración 37. Esquema de la Red de Cross Epanet.



Los resultados de esta corrida, pudieron ser extraídos del programa como lo indica en primera instancia la Ilustración 38, en la cual se muestran las propiedades y el estado de la Red, luego de la iteración 10 en las tuberías. En la Ilustración 39, podemos ver las propiedades de los Nodos

Ilustración 38. Estado de las Tuberías en la Red. Epanet.

ID Línea	Longitud m	Diámetro mm	Rugosidad mm	Caudal LPS	Velocidad m/s	Pérdida Unit. m/km	Factor Fricción
Tubería 2A-3A	1,86	23,8125	0,0015	0,54	1,21	75,16	0,024
Tubería 3B-4A	1,86	16,1925	0,0015	0,54	2,62	475,70	0,022
Tubería 5C-4B	0,93	23,8125	0,0015	0,03	0,08	0,46	0,035
Tubería 6C-5A	0,93	23,8125	0,0015	-0,27	0,60	21,64	0,028
Tubería 2B-6A	1,86	16,1925	0,0015	0,58	2,82	540,27	0,022
Tubería 6B-7A	1,4	16,1925	0,0015	0,31	1,53	182,51	0,025
Tubería 7B-8A	1,4	16,1925	0,0015	0,31	1,49	174,32	0,025
Tubería 5B-9A	1,4	16,1925	0,0015	0,30	1,46	168,20	0,025
Tubería 7C-9B	0,93	23,8125	0,0015	0,01	0,02	0,10	0,143
Tubería 8C-10A	0,93	23,8125	0,0015	0,08	0,19	3,02	0,039
Tubería 9C-10B	1,4	16,1925	0,0015	0,31	1,50	176,26	0,025
Tubería 4C-11A	2,8	16,1925	0,0015	0,32	1,55	186,64	0,025
Tubería 10C-11E	0,93	23,8125	0,0015	0,39	0,88	42,91	0,026
Tubería 11C-12B	2,87	16,1925	0,0015	0,28	1,36	148,36	0,026
Tubería 13A-12A	1,86	16,1925	0,0015	-0,22	1,08	99,05	0,027
Tubería 8B-13B	2,87	16,1925	0,0015	-0,22	1,08	99,05	0,027
Tubería salidaflujo4	2	30,4	0,0015	-0,19	0,26	3,71	0,033
Tubería salidaflujo12	2	30,4	0,0015	0,50	0,69	20,62	0,026
Tubería 20	1	38,9	0,0015	1,12	0,94	26,21	0,023
Tubería salidaflujo11	2	30,4	0,0015	-0,43	0,59	15,85	0,027

Ilustración 39. Estado de los Nodos de la Red. Epanet

ID Nudo	Cota m	Demanda Base LPS	Demanda LPS	Altura m	Presión m
Nudo NUDO2	1,8	0	0,00	31,77	29,97
Nudo NUDO3	1,8	0	0,00	31,63	29,83
Nudo NUDO4	1,8	0	0,00	30,75	28,95
Nudo NUDO5	1,8	0	0,00	30,75	28,95
Nudo NUDO6	1,8	0	0,00	30,77	28,97
Nudo NUDO7	1,8	0	0,00	30,51	28,71
Nudo NUDO8	1,8	0	0,00	30,27	28,47
Nudo NUDO9	1,8	0	0,00	30,51	28,71
Nudo NUDO10	1,8	0	0,00	30,27	28,47
Nudo NUDO11	1,8	0	0,00	30,23	28,43
Nudo NUDO12	1,8	0	0,00	29,80	28,00
Nudo NUDO13	1,8	0	0,00	29,99	28,19
Nudo SALIDAN11	0,8	0,431591	0,43	30,19	29,39
Nudo SALIDAN4	0,8	0,186634	0,19	30,74	29,94
Nudo SALIDAN12	0,8	0,501579	0,50	29,76	28,96
Embalse 1	31,8	Sin Valor	-1,12	31,80	0,00

Al igual que en la implementación del método de Hardy Cross, donde se recrearon las siete posibles salidas de flujo en la red para el cálculo de caudales, velocidades y demás. También se recrearon siete modelos en el software para las siete posibles salidas de flujo del sistema, obteniendo de igual manera valores de caudales, velocidades, presiones, etc. Que nos sirvieron de comparación para ajuste de equipos y calibración del sistema.



5.4. CALIBRACIÓN DEL SISTEMA.

Queriendo saber si los datos arrojados inicialmente tanto por los equipos como por los cálculos y el software, eran realmente válidos, se realizó una comparación desde la primera toma de datos hasta los arrojados por software.

5.4.1. Verificación de las Presiones en el sistema.

Para cada tramo de la Red, se verifico cada presión con los manómetros de presiones puntuales (Analógicos de 0-15 Psi) y los manómetros diferenciales de mercurio y analógico (manómetro calibrado de 0-5 Psi de caratula amplia).

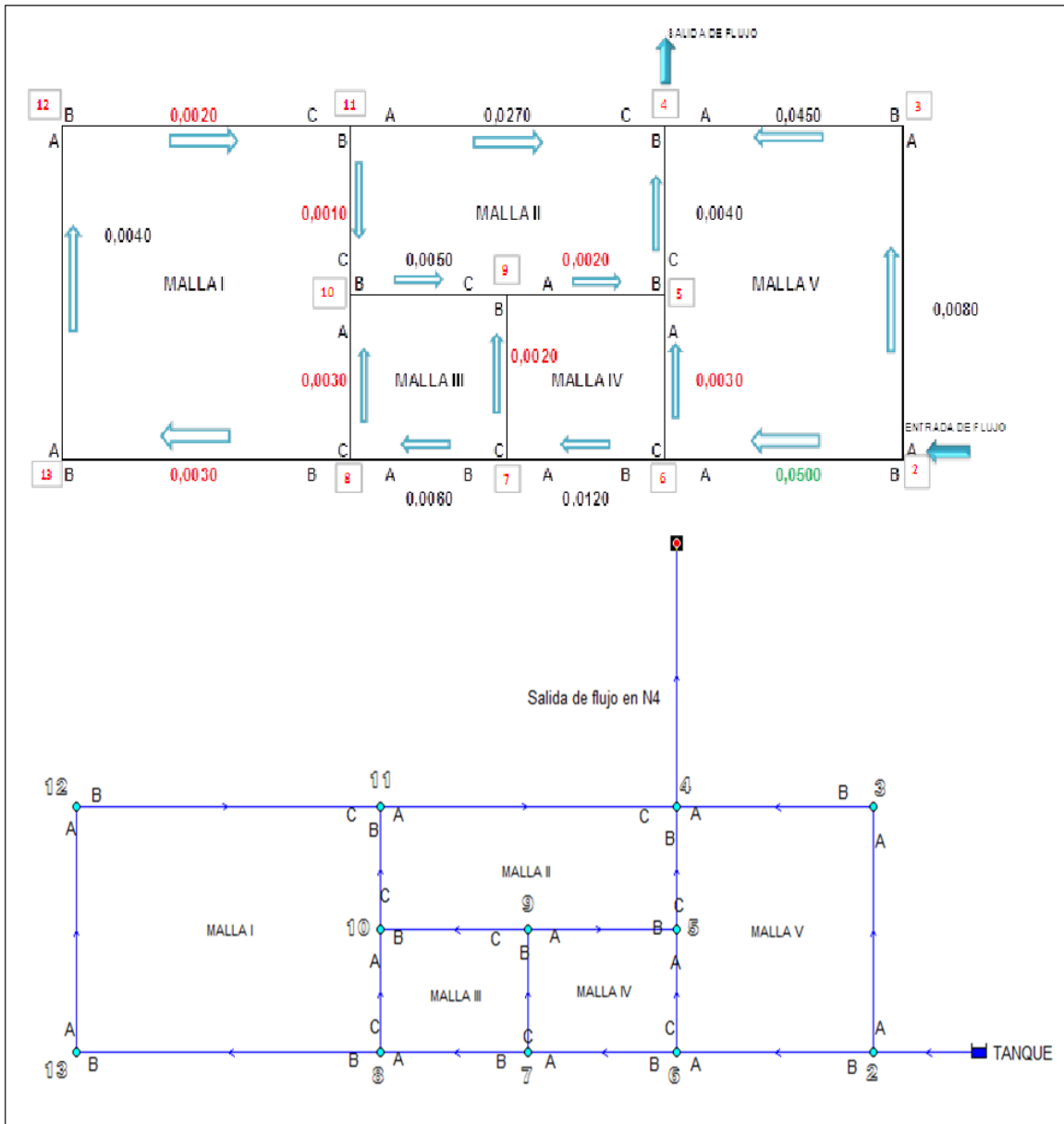
Para los tramos donde las presiones fueron muy bajas, la mejor manera de estar seguro era tomando las presiones puntuales en los nodos y verificando, la diferencia entre estas dos presiones puntuales resultaría ser la presión en el tramo en cuestión. Todas y cada una de las presiones registradas fueron revisadas y comprobadas tanto con los manómetros puntuales y los diferenciales sin obtener ningún tipo de anomalías en las medidas.

Para mayor seguridad, el manómetro diferencial de mercurio fue sometido a limpieza y se pudo drenar de material en suspensión y así se lograron mejores lecturas.

Ahora bien, las direcciones de flujo provocadas por las presiones, siempre hacen cumplir al sistema con la ley de continuidad de flujo como se describió anteriormente, y se comprueba también con las presiones arrojadas por Epanet que direccionan el flujo en el mismo sentido que se trazó al tomar las presiones en el laboratorio. La Ilustración 40 nos muestra las dos graficas de distribución de flujo por presiones para cuando el flujo sale por el nodo 4, se observa que las direcciones de flujo son exactamente iguales.

Así como las presiones en la prueba 4 son correctas, para el resto de pruebas también se tiene que las presiones son correctas puesto que las direcciones de flujo arrojadas por el programa Epanet y las determinadas en laboratorios son similares y sus valores prácticamente iguales.

Ilustración 40. Comparación de Presiones. Hardy Cross - Epanet. Prueba 2.



Los datos de presión arrojados para cada una de las pruebas corridas con Epanet las mostramos como anexos para su respectiva revisión.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

5.4.2. Verificación de los Caudales en el Sistema.

Al igual que las presiones, los caudales son semejantes entre los arrojados por Hardy Cross y los de Epanet. No existe diferencia significativa entre estos valores, además, para cada tramo de red en Hardy Cross los caudales se presentan en m^3/s , mientras que el software nos arroja caudales en lps. Pero al hacer la conversión correspondiente, los caudales son los mismos.

Tomando como ejemplo la prueba 1 donde el flujo sale por los nodos 4, 11 y 12, la distribución asumida y los caudales corregidos son los mismos arrojados por Epanet. Se observa en la Ilustración 41 donde se señalan los caudales obtenidos tanto por Hardy Cross y por Epanet. Y también para el caso donde el flujo sale por los nodos 4 y 12.

Lo mismo pasa con el resto pruebas, donde los caudales corregidos son exactamente iguales a los arrojados por Epanet. Para su verificación se anexan todas las tablas de caudales tanto de Hardy Cross como las de Epanet.

En general, con la verificación realizada para cada uno de los parámetros de cálculo (Caudal, presión, velocidad, etc.) desde la medición hasta las conjeturas realizadas para su obtención, se tienen datos precisos y confiables que nos demuestran y nos garantizan el buen funcionamiento del sistema. Por ende, el sistema de Red de Cross arroja datos confiables para el estudio de presiones y velocidades.

Ilustración 41. Tabla de caudales por Hardy Cross - Epanet

PRUEBA	11 ABIERTOS		4 ABIERTO		11 ABIERTO		12 ABIERTO		4 - 11 ABIERTOS		4 - 12 ABIERTOS		7	
	Q Inicial	Q Corregido	Q Inicial	Q Corregido	Q Inicial	Q Corregido	Q Inicial	Q Corregido	Q Inicial	Q Corregido	Q Inicial	Q Corregido	Q Inicial	Q Corregido
MALLA V	0.0095	0.0095	0.0057	0.0058	0.0055	0.0058	0.0054	0.0057	0.0057	0.0059	0.0057	0.0060	0.0056	0.0058
2B - 6A	-0.0056	-0.0056	-0.0057	-0.0056	-0.0055	-0.0056	-0.0054	-0.0057	-0.0057	-0.0054	-0.0057	-0.0056	-0.0056	-0.0055
2A - 3A	-0.0056	-0.0056	-0.0057	-0.0056	-0.0055	-0.0056	-0.0054	-0.0057	-0.0057	-0.0054	-0.0057	-0.0056	-0.0056	-0.0055
3B - 4A	-0.0056	-0.0056	-0.0057	-0.0056	-0.0055	-0.0056	-0.0054	-0.0057	-0.0057	-0.0054	-0.0057	-0.0056	-0.0056	-0.0055
6C - 5A	0.0028	0.0028	0.0029	0.0028	0.0027	0.0028	0.0027	0.0027	0.0028	0.0028	0.0029	0.0028	0.0028	0.0028
5C - 4B	-0.0019	-0.0022	0.0044	0.0048	-0.0027	-0.0027	-0.0027	-0.0027	0.0014	0.0009	0.0014	0.0007	-0.0028	-0.0027
6C - 5A	0.0028	0.0028	-0.0028	-0.0044	0.0014	-0.0022	-0.0027	-0.0027	-0.0028	-0.0032	-0.0028	-0.0032	-0.0028	-0.0028
6B - 7A	0.0028	0.0032	0.0029	0.0034	0.0039	0.0036	0.0037	0.0037	0.0037	0.0037	0.0039	0.0038	0.0038	0.0038
7C - 9B	0.0014	0.0091	0.0014	0.0006	0.0008	0.0002	-0.0027	-0.0027	0.0004	0.0002	0.0014	0.0001	0.0028	0.0009
9A - 5B	-0.0047	-0.0030	0.0025	0.0004	-0.0014	-0.0035	-0.0035	-0.0035	-0.0014	-0.0024	-0.0014	-0.0025	0.0056	0.0022
7C - 9B	-0.0014	-0.0001	-0.0014	-0.0008	-0.0034	-0.0034	-0.0034	-0.0034	0.0007	-0.0002	-0.0014	-0.0001	0.0028	-0.0009
7B - 8A	0.0014	0.0030	0.0014	0.0006	0.0034	0.0035	0.0034	0.0035	0.0036	0.0035	0.0036	0.0036	0.0056	0.0042
8C - 10A	0.0007	0.0030	0.0007	0.0004	0.0017	0.0028	-0.0013	-0.0038	0.0018	0.0018	0.0017	-0.0008	0.0014	0.0029
10B - 9C	-0.0061	-0.0031	0.0011	-0.0005	-0.0048	-0.0036	-0.0027	-0.0007	-0.0028	-0.0028	-0.0029	-0.0026	-0.0028	-0.0043
5C - 4B	0.0019	0.0092	-0.0054	-0.0048	0.0027	0.0013	-0.0027	0.0015	-0.0014	-0.0009	-0.0014	-0.0007	0.0028	0.0027
9A - 5B	0.0047	0.0030	-0.0025	-0.0004	0.0014	0.0035	0.0034	0.0035	0.0014	0.0024	0.0014	0.0025	0.0056	-0.0022
10B - 9C	0.0061	0.0031	-0.0011	0.0005	0.0048	0.0036	0.0027	0.0036	0.0007	0.0026	0.0029	0.0026	0.0028	0.0043
10C - 11B	0.0039	-0.0039	-0.0004	0.0009	0.0065	0.0062	-0.0013	-0.0031	0.0025	0.0044	0.0036	0.0019	0.0014	0.0045
11A - 4C	-0.0019	-0.0032	0.0004	0.0010	-0.0027	-0.0039	-0.0027	-0.0036	-0.0027	-0.0036	-0.0027	-0.0036	-0.0028	-0.0028
8C - 10A	-0.0007	-0.0008	-0.0007	-0.0004	-0.0017	-0.0026	0.0013	0.0010	-0.0018	-0.0018	-0.0007	0.0008	0.0014	-0.0029
10C - 11B	-0.0039	-0.0039	0.0004	-0.0009	-0.0065	-0.0062	0.0013	0.0011	-0.0025	-0.0044	-0.0036	-0.0019	-0.0014	-0.0045
8B - 13B	0.0007	0.0022	0.0007	0.0001	0.0017	0.0009	0.0067	0.0046	0.0018	0.0006	0.0007	0.0034	0.0070	0.0040
13A - 12A	0.0007	0.0022	0.0007	0.0001	0.0017	0.0009	0.0067	0.0046	0.0018	0.0006	0.0007	0.0034	0.0070	0.0040
12B - 11C	-0.0043	-0.0028	0.0007	0.0001	-0.0017	0.0009	-0.0040	-0.0061	0.0018	0.0006	-0.0072	-0.0045	0.0030	0.0040
														-0.0051

Resultados para prueba 1

ID Línea	Longitud m	Diámetro mm	Velocidad m/s	Pérdida Unit. m/m	Factor Fricción	Estado	
Tubería 2A-3A	1.86	23.8125	0.54	2.71	75.15	0.024	Abierta
Tubería 3B-4A	1.86	16.1925	0.54	2.62	475.70	0.022	Abierta
Tubería 5C-4B	0.93	23.8125	0.03	0.08	0.46	0.035	Abierta
Tubería 6C-5A	0.93	23.8125	-0.27	0.60	21.64	0.028	Abierta
Tubería 2B-6A	1.86	16.1925	0.98	2.82	540.27	0.022	Abierta
Tubería 6B-7A	1.4	16.1925	0.31	1.53	182.91	0.025	Abierta
Tubería 7B-9A	1.4	16.1925	0.30	1.49	174.32	0.025	Abierta
Tubería 5B-9A	1.4	16.1925	0.30	1.46	168.20	0.025	Abierta
Tubería 7C-9B	0.93	23.8125	0.01	0.02	0.10	0.143	Abierta
Tubería 8C-10A	0.93	23.8125	0.08	0.19	3.02	0.039	Abierta
Tubería 9C-10B	1.4	16.1925	0.32	1.50	176.26	0.025	Abierta
Tubería 4C-11A	2.8	16.1925	0.32	1.55	186.64	0.025	Abierta
Tubería 10C-11E	0.93	23.8125	0.39	0.88	42.91	0.026	Abierta
Tubería 11C-12B	2.87	16.1925	0.28	1.36	146.36	0.026	Abierta
Tubería 13A-12A	1.86	16.1925	-0.22	1.08	98.05	0.027	Abierta
Tubería 8B-13B	2.87	16.1925	-0.22	1.08	98.05	0.027	Abierta
Tubería salsaluga1	2	30.4	-0.19	0.26	3.71	0.033	Abierta
Tubería salsaluga2	2	30.4	0.90	0.69	20.62	0.026	Abierta
Tubería 20	1	38.9	1.12	0.94	26.21	0.023	Abierta
Tubería salsaluga11	2	30.4	-0.45	0.59	15.85	0.027	Abierta

Resultados para la prueba 6

ID Línea	Longitud m	Diámetro mm	Velocidad m/s	Pérdida Unit. m/m	Factor Fricción	Estado		
Tubería 2A-3A	1.86	23.8125	0.015	0.56	73.11	0.024	Abierta	
Tubería 3B-4A	1.86	16.1925	0.015	0.56	500.97	0.022	Abierta	
Tubería 5C-4B	0.93	23.8125	0.015	-0.07	1.80	0.038	Abierta	
Tubería 6C-5A	0.93	23.8125	0.015	-0.32	29.83	0.027	Abierta	
Tubería 2B-6A	1.86	16.1925	0.015	0.59	584.27	0.022	Abierta	
Tubería 6B-7A	1.4	16.1925	0.015	0.28	134.25	0.026	Abierta	
Tubería 7B-9A	1.4	16.1925	0.015	0.27	129.10	0.026	Abierta	
Tubería 5B-9A	1.4	16.1925	0.015	0.25	124.52	0.026	Abierta	
Tubería 7C-9B	0.93	23.8125	0.015	0.01	0.02	0.13	Abierta	
Tubería 8C-10A	0.93	23.8125	0.015	-0.08	0.17	2.50	0.041	Abierta
Tubería 9C-10B	1.4	16.1925	0.015	0.26	133.95	0.026	Abierta	
Tubería 4C-11A	2.8	16.1925	0.015	0.26	127.13	0.026	Abierta	
Tubería 10C-11E	0.93	23.8125	0.015	0.19	44.21	0.031	Abierta	
Tubería 11C-12B	2.87	16.1925	0.015	0.45	218.42	0.023	Abierta	
Tubería 13A-12A	1.86	16.1925	0.015	-0.34	1.85	210.11	0.024	Abierta
Tubería 8B-13B	2.87	16.1925	0.015	-0.34	1.85	210.11	0.024	Abierta
Tubería salsaluga1	2	30.4	0.015	-0.36	0.50	11.55	0.028	Abierta
Tubería salsaluga2	2	30.4	0.015	0.79	1.09	45.88	0.023	Abierta
Tubería 20	1	38.9	0.015	1.15	0.97	27.47	0.022	Abierta



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

5.5. GUÍA PARA REALIZAR LA PRÁCTICA

GUÍA DE LABORATORIO PARA PRACTICA DE RED DE CROSS

Simulación de Redes de distribución de Agua. Red mallada.

Objetivo

Estudiar el comportamiento en diferentes condiciones de funcionamiento de una red de distribución de agua, a través de la simulación de esta por el software EPANET y el análisis del método de Hardy Cross por medio de hojas de cálculo de Excel.

Generalidades

EPANET

Es un programa orientado al análisis del comportamiento de los sistemas de distribución de agua y el seguimiento de la calidad del agua en los mismos, que ha tenido una gran aceptación en España, y en todos los países de habla hispana, desde su lanzamiento en Europa en Septiembre de 1993. Ha sido desarrollado por la Agencia para la Protección del Medio Ambiente de EEUU con el fin de disponer de una herramienta para el cálculo, entre otras cosas, del comportamiento hidráulico en sistemas de distribución de agua. En estos momentos es uno de los paquetes informáticos más completo que existe en el campo de la simulación de sistemas hidráulicos, hecho que unido a su distribución libre hace que sea el software más extendido.

EXCEL

Software que permite crear tablas, y calcular y analizar datos. Este tipo de software se denomina software de hoja de cálculo. Excel permite crear tablas que calculan de forma automática los totales de los valores numéricos que especifica, imprimir tablas con diseños cuidados, y crear gráficos simples.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

REDES DE DISTRIBUCIÓN

Una red de distribución de agua es un conjunto de elementos hidráulicos (bombas, depósitos, tuberías, uniones, etc) utilizados para distribuir agua en una zona determinada. Un análisis de redes consiste en dadas las características físicas de las conducciones, diámetros, rugosidades, longitudes, así como de los restantes elementos de la red como válvulas, depósitos, etc. y sus características funcionales, como tanto de las válvulas y presionadores, grado de apertura de las válvulas, etc..., y conocida al menos una altura piezométrica en uno de los nudos del sistema, determinar el caudal trasegado por cada una de las conducciones así como la altura piezométrica en todos los nudos restantes

EQUIPOS A UTILIZAR

1. Bomba Centrifuga.
2. Tanque de Almacenamiento y auxiliar para Aforo de Caudales.
3. Tablero Ilustrativo de Res de Distribución.
4. Red de tuberías en PVC.
5. Tuberías Metálicas para medición de Presiones.
6. Manómetro de Mercurio.
7. Manómetro Diferencial de 0 – 5 psi.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

DESARROLLO DE LA PRÁCTICA:

- 1) El primer paso para llevar a cabo la experiencia es asegurarse de que el tanque de almacenamiento este por lo menos a media capacidad (250 litros).
- 1) Verificar que de las tres (3) válvulas de salida de la Red, se encuentre por lo menos una abierta (salidas en los nodos 04, 11 y 12).
- 2) Antes del encendido de la bomba, chequear que la válvula ubicada en la tubería de impulsión se encuentre cerrada.
- 3) Encender la bomba y abrir en forma progresiva la válvula ubicada en la tubería de impulsión, esto garantizara flujo continuo a través de la Red y evitara mal funcionamiento de la bomba debido a la presencia posible de la cavitación.
- 4) Tomar los datos de caudales iniciales con el fin de verificar la cantidad de flujo entrante y saliente de la Red. Existen dos formas de registrar el caudal, con el tanque de aforo o auxiliar y con la platina de orificio, para la medición del caudal con el tanque de aforo, tome el volumen que sale de la Red y con el cronometro registre el tiempo que tarde en realizar el llenado del tanque auxiliar, en forma simultánea registre con el manómetro las lecturas que salen de la platina de orificio. En el tablero donde se encuentra dibujada la Red, se ilustran los tramos en los cuales la presión es muy baja, para este caso los datos a registrar serán tomados en el manómetro diferencial (0 – 5 psi), para el resto de los tramos donde el tablero no indica presiones bajas, la dirección del flujo en los distintos puntos de la Red se podrá apreciar con el manómetro en U (mercurio).
- 5) Repita el paso 4 cuando:
 - La válvula en la salida del nodo 04 este abierta y las otras dos cerradas.
 - La válvula en la salida del nodo 11 este abierta y las otras dos cerradas.
 - La válvula en la salida del nodo 12 este abierta y las otras dos cerradas.
 - Dos válvulas estén abiertas y la otra cerrada.
 - Las tres válvulas en las salidas de los nodos 04, 11 y 12 estén abiertas.

- 6) Luego de la recopilación de los datos en el laboratorio, se procede con la digitalización de la información en EPANET y en las hojas de cálculo de Excel.

Para digitalizar la información a través de EPANET el estudiante debe seguir los siguientes pasos:

Modelar la red mallada de la Ilustración 42 con la entrada del flujo en el nodo 2 y las posibles salidas de flujo en los nodos 4, 11 y 12. Se recomienda utilizar el interface gráfico para el diseño de la red. Antes de meter cualquier dato, el estudiante debe seleccionar en las opciones de cálculo del programa, las unidades de caudal en litros por segundo (LPS) y la formula de pérdidas de Darcy-Weisbach (D-W), para un máximo de iteraciones de 10, luego se procede a Insertar los componentes no lineales del sistema como el Tanque (embalse) y los nodos con sus respectivas coordenadas y, a continuación, añadir las tuberías uniendo estos elementos, modificando los valores predeterminados por el programa. En la Ilustración 43 se observan las propiedades de la tubería 2A-3A, donde:

- a. corresponde a la identificación del tramo, en este caso 2A-3A,
- b. la longitud en metros,
- c. al diámetro en mm y,
- d. la rugosidad, que para las tuberías en PVC como material en la Red tienen una rugosidad relativa de 0.0015 (para la ecuación de pérdidas de D-W).

Cabe resaltar que para introducir las características de los elementos, se hace doble clic sobre ellos. Para entender lo antes expuesto, a manera de ejemplo la Ilustración 44 describe la Red montada en el software, cuando la salida de los flujos se presenta en los nodos 4,11 y 12.

Ilustración 42. Red de Distribución Instalada en Laboratorio.

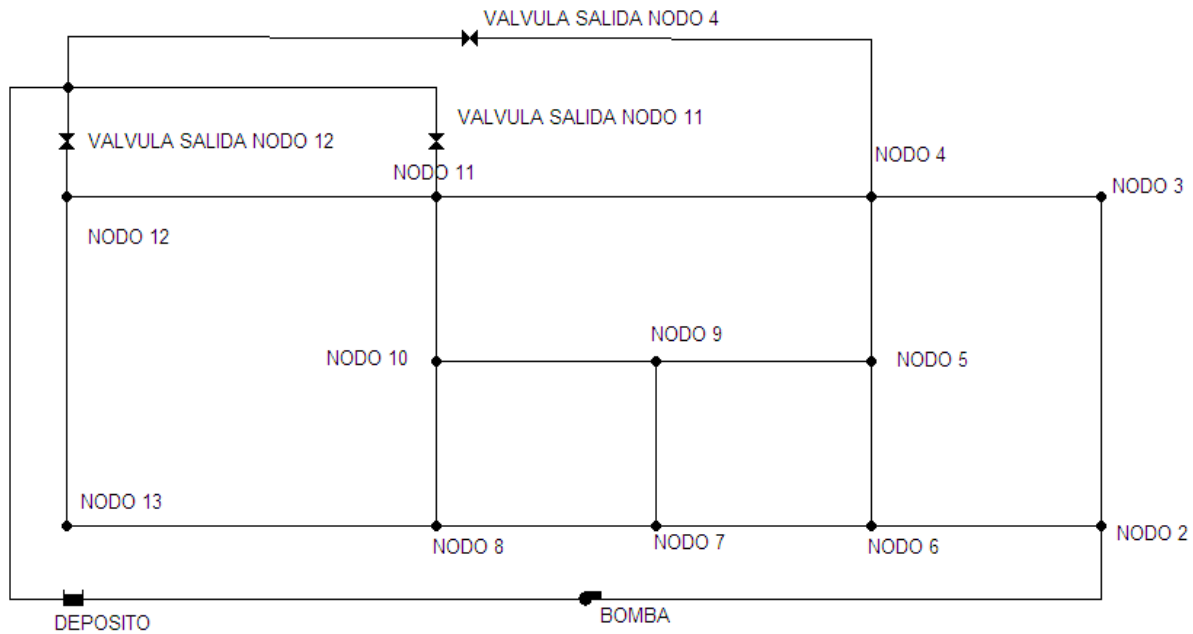
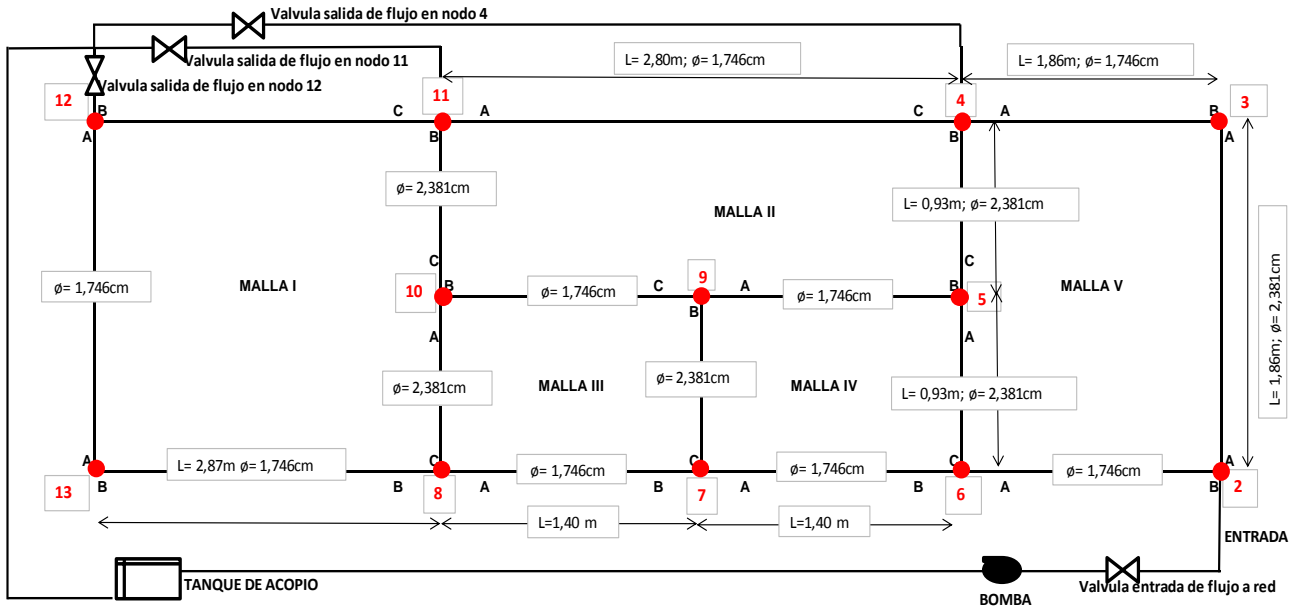
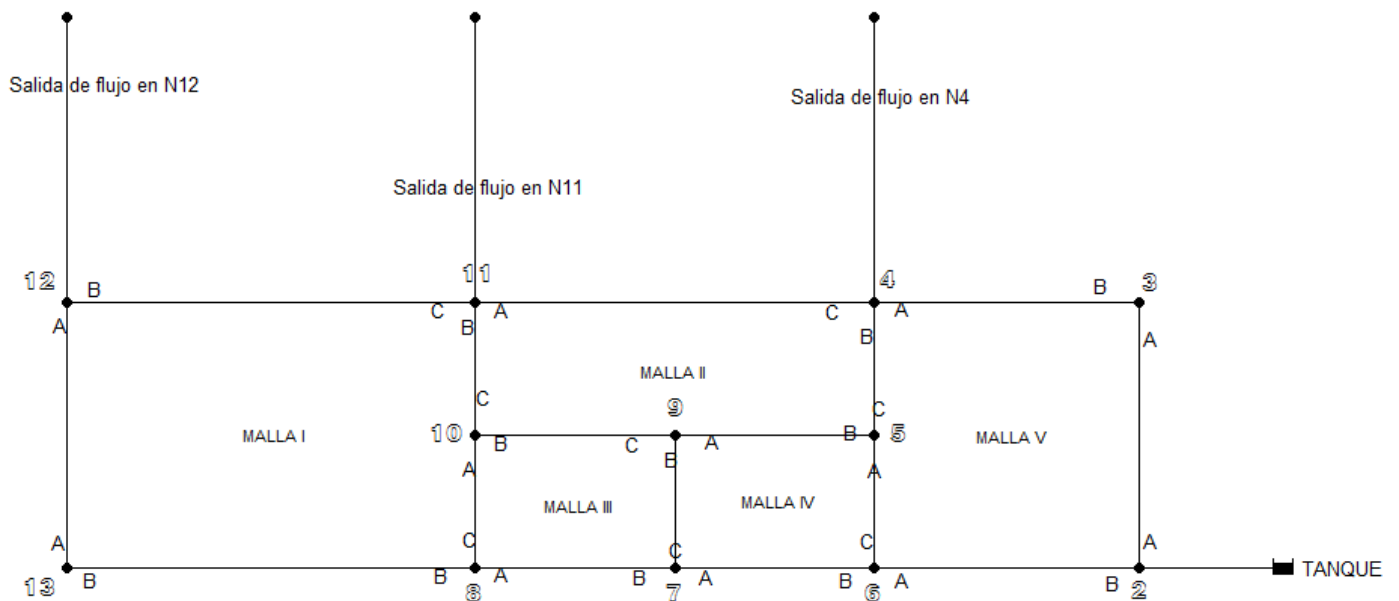


Ilustración 43. Propiedades de Tubería 2A-3A

Propiedad	Valor
*ID Tubería	a. 2A-3A
*Nudo Inicial	NUD02
*Nudo Final	NUD03
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	b. 1,86
*Diámetro	c. 23,8125
*Rugosidad	d. 0,0015
Coef. Pérdidas Menores	0
Estado Inicial	Abierta
Coef. Reacción en el Medico	
Coef. Reacción en la Parec	

Ilustración 44. Diseño de la Red de Distribución (EPANET).





PROGRAMA DE ING. CIVIL.

Para los datos a través de Excel el estudiante debe seguir el siguiente escenario:

Utilizando la Tabla 19 para la tabulación de los datos iniciales en el laboratorio, se realiza en primer lugar el aforo de caudales identificando inicialmente para qué alternativa de salida de flujo se trabaja. Se toman seis caudales con el fin de promediar y tomar valores más congruentes.

Pasado esto, se determinan las presiones en el sistema por medio de los manómetros diferenciales y puntuales y son registradas en el grupo de tablas de tabulación número 2 identificando las presiones del manómetro de mercurio y el análogo. También se registra el nodo de mayor presión para saber el direccionamiento del flujo en la red.

Para mayor claridad, se dibujan con flechas los sentidos del flujo en el diagrama de red según cual sea la presión.

Con gran parte de los datos obtenidos, caudales, presiones y sentidos de flujos, se suponen los caudales en cada tramo de la red y demás parámetros para luego desarrollar el método de Hardy Cross por corrección de caudales. Realizar como mínimo 10 iteraciones hasta lograr la convergencia del método y luego comparar con el programa, es decir, se deben programar en Excel 10 iteraciones equivalentes a una corrida del EPANET, de esta forma se comparan las dos situaciones.

Tabla 19. Grupo de Tablas para la Tabulación de Datos en Laboratorio.

TABLAS PARA TABULACION DE DATOS

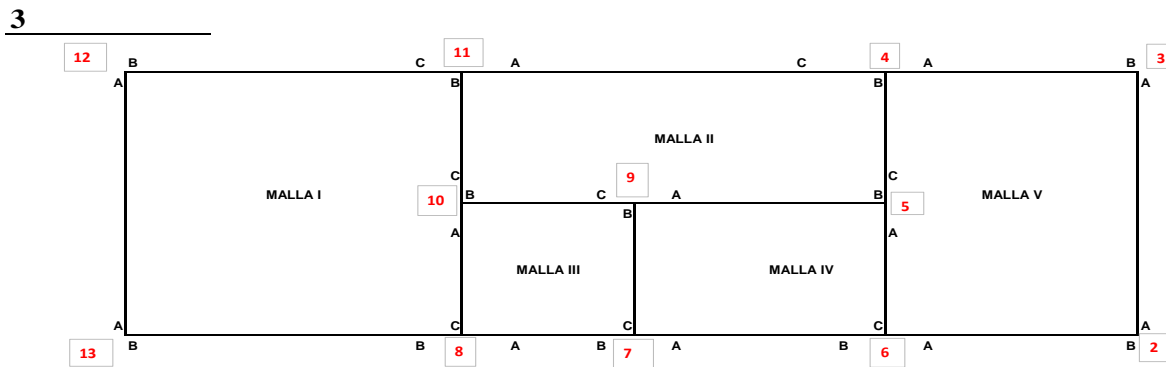
1. Tabla de Aforo de Caudales.
2. Tabla de Registro de Presiones en Tuberías.
3. Diagrama de Red para Ilustración de Sentidos de Flujo.
4. Tabla de Corrección de Caudales por Hardy Cross.

1

AFORO DE CAUDALES					
CARACTERÍSTICAS DEL TANQUE DE AFORO		PRUEBA #			
DIAMETRO (m)=	0,32	PRESION EN PLATINA DE ORIFICIO		M. C. A. : PSI:	
AREA (m2)=	0,08042477				
CAUDAL CON EL TANQUE DE AFORO					
PRUEBA	TIEMPO (s)	ALTURA TANQUE (m)	VOLUMEN TANQUE (m3)	CAUDAL (m3/s)	CAUDAL (L/s)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
PROMEDIO					

2

REGISTRO DE PRESIONES EN TUBERIAS					
MALLA	TRAMO	MANOMETRO DE MERCURIO (m)	MANOMETRO ANALOGICO (PSI)	MAYOR NODO	SENTIDO EN MALLA
MALLA V	2B - 6A				
	2A - 3A				
	3B - 4A				
	6C - 5A				
MALLA IV	5C - 4B				
	6C - 5A				
	6B - 7A				
MALLA III	7C - 9B				
	9A - 5B				
	7C - 9B				
	7B - 8A				
MALLA II	8C - 10A				
	10B - 9C				
	5C - 4B				
	9A - 5B				
	10B - 9C				
MALLA I	10C - 11B				
	11A - 4C				
	8C - 10A				
	10C - 11B				
	8B - 13B				
13A - 12A					
12B - 11C					



4

CORRECCION DE CAUDALES POR EL METODO DE HARDY CROSS												
MALLA	Línea	Q(M3/S)	D (cm)	D (m)	A (m2)	v (m/s)	Re	f	L (m)	K	C	Corrección
MALLA V	2B - 6A											
	2A - 3A											
	3B - 4A											
	6C - 5A											
MALLA IV	5C - 4B											
	6C - 5A											
	6B - 7A											
MALLA III	7C - 9B											
	5B - 9A											
	7C - 9B											
	7B - 8A											
MALLA II	8C - 10A											
	9C - 10B											
	10C - 11B											
	4C - 11A											
MALLA I	8C - 10A											
	10C - 11B											
	8B - 13B											
	13A - 12A											
11C - 12B												



6. CONCLUSIONES

Se pone en marcha nuevamente el laboratorio de Red de Cross, dotado con materiales y equipos garantizados para el estudio de velocidades y presiones. Sencillo de utilizar y práctico para las ejecución de la experiencia.

El laboratorio genera oportunidades de aprendizaje en una variedad de entornos, incluyendo cursos cortos y largos, estancias, seminarios, y sesiones de entrenamiento uno a uno, sesiones experimentales. Por ende una de las maneras de garantizar su durabilidad es un mantenimiento periódico de la composición total de la red.

Con la puesta en marcha del laboratorio se cumple con el propósito de recuperar la red de Cross para el estudio de presiones y velocidades. Las funciones del laboratorio ahora si están disponibles y ejecutan las acciones para las cuales se dispusieron en el sistema gracias a la dotación adecuada de equipos y herramientas.

Controlar y determinar la cantidad de elementos y equipos existentes en el laboratorio con el fin de mantener su adecuado estado de funcionamiento y orden así como de tener un registro exacto de las existencias.

El inventario de los equipos y elementos de laboratorio deben hacerse por lo menos una vez cada periodo académico, bien sea al inicio o al finalizar, para ello, el Coordinador de Laboratorio debe verificar el inventario anterior. Así como también, todo equipo o material que llega nuevo al laboratorio debe registrarse en el registro de inventario. De acuerdo con lo anterior, los datos básicos de los materiales y equipos se llevan en un registro de inventario, el cual cada vez que ingresan o se retiran del inventario se actualizan los datos o se borran los mismos según sea el caso.

Al realizar la practica es importante tener en cuenta que para los tramos con presiones entre 0 y 0,1psi se deben medir las presiones puntuales en los nodos y no por tramos, y el direccionamiento del flujo lo da la diferencia entre presiones puntuales.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

Como por ejemplo, en la primera alternativa con las llaves de los nodos 4, 11 y 12 abierta en los tramos 11B-10C de la malla1; 4B-5C, 5B-9C, 9C-10B, 10C-11B de la malla 2, entre otras. Al momento de medir las presiones en estos tramos, deberán medirse con los manómetros puntuales, puesto que el manómetro de mercurio no registrara dichas presiones.

Las guías del laboratorio son importantes ya que estas garantizan que la experiencia se realice de forma correcta, con el fin de evitar el reajuste o calibración de herramientas que hacen parte del laboratorio, estas ayudan a proteger a los instrumentos producto de la operación inadecuada. Un manual de instrucciones, se asemeja al concepto de una guía de laboratorio en la cual se ilustren los pasos a seguir para la recolección de datos y, en donde se hagan notar los fundamentos teóricos para el análisis de la información. Esto constituye el corazón para la ejecución de la práctica del laboratorio, pues, es en esta guía donde se desarrollan y aplican los estudios de presiones, velocidades y conceptos básicos que se manejan en tuberías de distribución de agua potable.

Dentro de las pruebas fue posible identificar la hegemonía de flujos turbulentos en todas las alternativas de salidas del flujo, en los que no, son tramos en donde el flujo es de transición, esto ocurre debido a las velocidades altas que en la red se presentan, la cuales generan movimientos irregulares e indeterminados de las partículas del fluido en direcciones transversales a la dirección principal de flujo.

La consumación de este laboratorio nos arrojó resultados favorables que comprobaron el comportamiento normal de la Red y la validez del método. Fue visto a través de las iteraciones hechas en Excel y comparación de resultados con las tablas de Epanet (luego de 10 iteraciones). En las tablas de Excel, se comprobó que a partir de la tercera iteración las correcciones de los caudales presentaron variaciones más cercanas al cero, y desde la sexta iteración las correcciones ya no eran significativas al caudal corregido (los valores de corrección eran muy pequeños).



7. RECOMENDACIONES

En vistas a extender la duración del laboratorio, es necesario monitorear los elementos que componen la Red, un seguimiento de los equipos y elementos de laboratorio puede hacerse por lo menos una vez cada periodo académico, bien sea al inicio o al finalizar, para ello, el Coordinador de Laboratorio debe verificar el inventario anterior e informar el estado para cambio o mantenimiento de los componentes de la red.

La forma en que es aforado el caudal puede ser mejorada a través de la implementación de otro tanque, para la recolección del promedio de caudales se utilizaba un tanque perteneciente a otra práctica del mismo laboratorio. Para mejorar la toma de datos, este tanque podría ser en fibra de vidrio, este material no se corroe, lo cual extiende su durabilidad (Ver anexo Ilustración 51). El tanque anterior tenía huecos en el fondo y presentaba fugas de agua, debido a la corrosión la lámina inferior la cual perdió sección.

Deben ser acatadas las instrucciones dadas en la guía para la realización del laboratorio, de esta forma garantizamos que la ejecución de la experiencia se realice de manera satisfactoria. Al realizar la práctica es importante tener en cuenta que para los tramos con presiones bajas se deben medir las presiones puntuales en los nodos y no por tramos, y el direccionamiento del flujo lo da la diferencia entre presiones puntuales. Como por ejemplo, en la primera alternativa con las llaves de los nodos 4, 11 y 12 abierta en los tramos 11B-10C de la malla1; 4B-5C, 5B-9C, 9C-10B, 10C-11B de la malla 2, entre otras. Al momento de medir las presiones en estos tramos, deberán medirse con los manómetros puntuales, puesto que el manómetro de mercurio no registrara dichas presiones.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfonso Fleites, M. E. (2002). EPARED. Programa para el diseño y simulación de Redes hidráulicas. *XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, (pág. 6). Cancún, México.
- Ayad, A., Awad, H., & Yassin, A. (2013). Modelo de simulación hidráulica desarrollado para redes de tuberías de agua. *Alexandria Diario de ingeniería volumen 52, número 1*, 43-49.
- Bieupoude, P., Azoumah, Y., & Neveu, P. (2012). La optimización de las redes de distribución de agua potable: métodos basados en computadoras y diseño constructal. *Computadoras, Medio Ambiente y Sistemas Urbanos. Volumen 36*, 434-444.
- Engelhardt, M., Skipworth, P., Savic, D., Saúl, A., & Walters, G. (2000). Estrategias de rehabilitación de redes de distribución de agua: una revisión de la literatura con una perspectiva del Reino Unido. *Agua Urbana, volumen 2, número 2*, 153-170.
- Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos, U. d. (s.f.). *www.instagua.upv.es*.
Obtenido de *www.instagua.upv.es*: <http://www.instagua.upv.es/Epanet/>
- López, R. J. (2009). *Diseño Del Sistema De Abastecimiento De Agua Potable Para Las Comunidades Santa Fe Y Capachal, Píritu, Estado Anzoátegui*. Tesis Pregrado, Universidad De Oriente, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Mecánica., Puerto La cruz, Venezuela.
- Nelson, S. B. (1989). INGENIERIA HIDRAULICA. En F. S. MERRIT, *Manual del Ingeniero Civil v.3* (pág. 21113). Juarez: McGRAW-HILL.
- Ni-Bin, C., Natthaphon, P. P., & Andrew, E. (2012). Un sistema de ayuda a la decisión basados en reglas para la implementación del sensor en pequeñas redes de agua potable. *Journal of Cleaner Production*, 28-37.
- Pérez, W. (20 de Marzo de 2009). La mitad de Colombia tiene problemas de abastecimiento de agua potable: Defensoría. (C. RADIO, Entrevistador)
- RAS, M. d. (2000). *REGLAMENTO TECNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO RAS - 2000*. SANTAFE DE BOGOTA D.C.: MinDesarrollo.



PROGRAMA DE ING. CIVIL.

- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2 USER'S MANUAL*. CINCINNATI: Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.
- Saldarriaga V., J. G. (1998). Analisis de redes de tuberías. Redes cerradas. En J. G. Saldarriaga V., *Hidráulica de tuberías* (págs. 295-369). Santafé de Bogotá D. C., Colombia: McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S. A.
- Staff, H. M. (2002). *Computer Applications in Hydraulic Engineering: Connecting Theory to Practice 5th Edition*. FL, USA: Haestad Methods Inc.
- Santos Gómez, D. E. (21 de Septiembre de 2006). En el país, son muchos los que beben agua del cielo. *EL COLOMBIANO*.
- Unicef. (2006). Obtenido de Procuraduría General de la Nación:
http://www.procuraduria.gov.co/portal/media/file/descargas/publicaciones/parte3_agua.pdf
- Vergara, M. M. (21 de Marzo de 2013). El Carmen de Bolívar, 237 años sin agua. *El Espectador*.
- Wikipedia®. (1 de Agosto de 2013). *Wikipedia.org*. Recuperado el 20 de Agosto de 2013, de Wikipedia.org: <http://es.wikipedia.org/wiki/Agua>
- Yazdani, A., Appiah Otoo, R., & Jeffrey, P. (2011). Estrategias de expansión para mejorar la resiliencia de los sistemas de distribución de agua: un enfoque teoría de redes. *Environmental Modelling & Software*, volumen 26, 1574-1582.
- Universidad de Cartagena. Reseña Histórica de la Facultad de Ingeniería.
http://www.unicartagena.edu.co/index.php/historia-ingenieria-civil#.VdNED7J_Okp

9. ANEXOS

Tabla 20. Factores De Conversión De Unidades De Presión Más Comunes

	Psi	Pa	Kg/cm ²	Bar	Atmósfera	Torr	Cm H ₂ O	Pulg H ₂ O	Pulg Hg
Psi	1	6896,5	0,0703	0,0689	0,068	51,715	70,31	27,68	2,036
Pa	0,000145	1	1,019E-05	0,00001	9,87E-06	0,0075	0,01	0,0039	0,00029
Kg/cm ²	14,22	98067	1	0,9807	0,9678	735,58	1000	393,7	28,96
Bar	14,5	100000	1,019	1	0,9869	750.062	1024	401.46	29.53
Atmósfera	14,7	101325	10.332	101.325	1	760	1033	406.78	29,92
Torr	0,01934	133.32	0,001359	0,00133	0,001316	1	1.359	0,5352	0,0394
Cm H ₂ O	0,0142	100	0,001	0,0009	0,00096	0,7356	1	0,3937	0,0289
Pulg H ₂ O	0,0361	2,54,6	0,00254	0,00249	0,00246	18.683	2,54	1	0,07355
Pulg Hg	0,4912	3386	0,0345	0,0333	0,0334	25,4	34,53	13,6	1

Tabla 21. Formato Inventario de la Red.

INVENTARIO DEL SISTEMA					
N°	ELEMENTO	UND	CANTIDAD	CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO	OBSERVACIONES
1					
2					
3					
4					
5					

Tabla 22. Formato de Aforo de Caudales.

CARACTERISTICAS DEL TANQUE DE AFORO		PRUEBA #			
DIAMETRO (m)=	0,32	PRESION EN PLATINA DE ORIFICIO	M. C. A. :		
AREA (m2)=	0,08042477		PSI:		
CAUDAL CON EL TANQUE DE AFORO					
PRUEBA	TIEMPO (s)	ALTURA TANQUE (m)	VOLUMEN TANQUE (m3)	CAUDAL (m3/s)	CAUDAL (L/s)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
PROMEDIO					

Tabla 23. Caudales y Presiones para Prueba 1.

PRUEBA #1/7					
FLUJO EN NODO 4		FLUJO EN NODO 11		FLUJO EN NODO 12	
ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA
CARACTERISTICAS DEL TANQUE DE AFORO		PRESION EN PLATINA DE ORIFICIO		M. C. A. :	0,060
DIAMETRO (m)=	0,32			PSI:	1,10
AREA (m2)=	0,08042477				
CAUDAL CON EL TANQUE DE AFORO					
PRUEBA	TIEMPO (s)	ALTURA TANQUE (m)	VOLUMEN TANQUE (m)	CAUDAL (m3/s)	CAUDAL (L/s)
1	5,10	0,073	0,0058710	0,0011512	1,1511781
2	5,03	0,071	0,0057102	0,0011352	1,1352204
3	5,12	0,067	0,0053885	0,0010524	1,0524335
4	5,28	0,072	0,0057906	0,0010967	1,0967014
5	5,08	0,069	0,0055493	0,0010924	1,0923837
6	5,20	0,077	0,0061927	0,0011909	1,1909053
PROMEDIO	5,14	0,07	0,0057504	0,0011198	1,1198038

PRUEBA #1. SALIDA DE FLUJO EN NODOS 4, 11 Y 12					
MALLA	TRAMO	MANOMETRO DE MERCURIO (M)	MANOMETRO ANALOGICO (PSI)	MAYOR NODO	SENTIDO EN MALLA
MALLA V	2B - 6A	0,0070	0,20	2B	POS.
	2A - 3A	0,0100	0,25	2A	NEG.
	3B - 4A	0,0520	1,00	3B	NEG.
	6C - 5A	0,0050	0,10	6C	POS.
	5C - 4B	0,0010	0,10	4B	NEG.
MALLA IV	6C - 5A	0,0050	1,00	6C	NEG.
	6B - 7A	0,0190	0,40	6B	POS.
	7C - 9B	0,0020	0,10	7C	POS.
	9A - 5B	0,0030	0,10	5B	NEG.
MALLA III	7C - 9B	0,0020	0,10	7C	NEG.
	7B - 8A	0,0130	0,30	7B	POS.
	8C - 10A	0,0010	0,10	8C	POS.
	10B - 9C	0,0020	0,10	9C	NEG.
MALLA II	5C - 4B	0,0010	0,10	4B	POS.
	9A - 5B	0,0030	0,10	5B	POS.
	10B - 9C	0,0020	0,10	9C	NEG.
	10C - 11B	0,0040	0,20	10C	POS.
	11A - 4C	0,0140	0,40	4C	NEG.
MALLA I	8C - 10A	0,0020	0,10	8C	NEG.
	10C - 11B	0,0040	0,20	10C	NEG.
	8B - 13B	0,0020	0,10	8B	POS.
	13A - 12A	0,0050	0,20	13A	POS.
	12B - 11C	0,0080	0,20	11C	NEG.

Tabla 24. Caudales y Presiones para Prueba 2

PRUEBA #2/7					
FLUJO EN NODO 4		FLUJO EN NODO 11		FLUJO EN NODO 12	
ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA
CARACTERISTICAS DEL TANQUE DE AFORO		PRESION EN PLATINA DE ORIFICIO		M. C. A. :	0,052
DIAMETRO (m)=	0,32			PSI:	1,00
AREA (m2)=	0,08042477				
CAUDAL CON EL TANQUE DE AFORO					
PRUEBA	TIEMPO (s)	ALTURA TANQUE (m)	VOLUMEN TANQUE (m)	CAUDAL (m3/s)	CAUDAL (L/s)
1	5,34	0,075	0,0060319	0,0011296	1,1295614
2	5,43	0,073	0,0058710	0,0010812	1,0812170
3	5,23	0,077	0,0061927	0,0011841	1,1840741
4	5,09	0,073	0,0058710	0,0011534	1,1534398
5	5,04	0,075	0,0060319	0,0011968	1,1967972
6	5,20	0,072	0,0057906	0,0011136	1,1135738
PROMEDIO	5,22	0,074	0,0059648	0,0011431	1,1431105

PRUEBA #2. SALIDA DE FLUJO EN NODO 4					
MALLA	TRAMO	MANOMETRO DE MERCURIO (MCA)	MANOMETRO ANALOGICO (PSI)	MAYOR NODO	SENTIDO EN MALLA
MALLA V	2B - 6A	0,050	0,90	2B	POS.
	2A - 3A	0,008	0,20	2A	NEG.
	3B - 4A	0,045	0,80	3B	NEG.
	6C - 5A	0,003	0,10	6C	POS.
	5C - 4B	0,004	0,10	5C	POS.
MALLA IV	6C - 5A	0,003	0,10	6C	NEG.
	6B - 7A	0,012	0,30	6B	POS.
	7C - 9B	0,002	0,10	7C	POS.
	9A - 5B	0,002	0,10	9A	POS.
MALLA III	7C - 9B	0,002	0,10	7C	NEG.
	7B - 8A	0,006	0,15	7B	POS.
	8C - 10A	0,003	0,10	8C	POS.
	10B - 9C	0,005	0,20	10B	POS.
MALLA II	5C - 4B	0,004	0,10	5C	NEG.
	9A - 5B	0,002	0,10	9A	NEG.
	10B - 9C	0,005	0,20	10B	NEG.
	10C - 11B	0,001	0,10	11B	NEG.
	11A - 4C	0,027	0,60	11A	POS.
MALLA I	8C - 10A	0,003	0,10	10A	POS.
	10C - 11B	0,001	0,10	11B	POS.
	8B - 13B	0,003	0,20	8B	POS.
	13A - 12A	0,004	0,20	13A	POS.
	12B - 11C	0,002	0,10	12B	POS.

Tabla 25. Caudales y Presiones para Prueba 3

PRUEBA #3/7					
FLUJO EN NODO 4		FLUJO EN NODO 11		FLUJO EN NODO 12	
ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA
CARACTERISTICAS DEL TANQUE DE AFORO		PRESION EN PLATINA DE ORIFICIO		M. C. A. :	0,051
DIAMETRO (m)=	0,32			PSI:	0,90
AREA (m2)=	0,08042477				
CAUDAL CON EL TANQUE DE AFORO					
PRUEBA	TIEMPO (s)	ALTURA TANQUE (m)	VOLUMEN TANQUE (m)	CAUDAL (m3/s)	CAUDAL (L/s)
1	5,13	0,073	0,0058710	0,0011444	1,1444461
2	5,24	0,072	0,0057906	0,0011051	1,1050732
3	5,18	0,070	0,0056297	0,0010868	1,0868212
4	5,05	0,066	0,0053080	0,0010511	1,0510960
5	5,21	0,071	0,0057102	0,0010960	1,0959998
6	5,06	0,070	0,0056297	0,0011126	1,1125957
PROMEDIO	5,15	0,070	0,0056565	0,0010993	1,0993387

PRUEBA #3. FLUJO EN NODO 11					
MALLA	TRAMO	MANOMETRO DE MERCURIO (MCA)	MANOMETRO ANALOGICO (PSI)	MAYOR NODO	SENTIDO EN MALLA
MALLA V	2B - 6A	0,049	0,60	2B	POS.
	2A - 3A	0,002	0,10	2A	NEG.
	3B - 4A	0,007	0,10	3B	NEG.
	6C - 5A	0,001	0,10	5A	NEG.
	5C - 4B	0,001	0,10	4B	NEG.
MALLA IV	6C - 5A	0,001	0,10	5A	NEG.
	6B - 7A	0,023	0,50	6B	NEG.
	7C - 9B	0,002	0,10	7C	POS.
	9A - 5B	0,010	0,25	5B	NEG.
MALLA III	7C - 9B	0,002	0,10	7C	NEG.
	7B - 8A	0,017	0,40	7B	POS.
	8C - 10A	0,001	0,10	8C	POS.
	10B - 9C	0,001	0,10	9C	NEG.
MALLA II	5C - 4B	0,001	0,10	4B	POS.
	9A - 5B	0,001	0,25	7C	POS.
	10B - 9C	0,001	0,10	9C	POS.
	10C - 11B	0,008	0,20	10C	POS.
	11A - 4C	0,052	1,00	4C	NEG.
MALLA I	8C - 10A	0,001	0,10	10A	POS.
	10C - 11B	0,008	0,20	10C	NEG.
	8B - 13B	0,008	0,20	8B	POS.
	13A - 12A	0,004	0,15	13A	POS.
	12B - 11C	0,014	0,30	12B	POS.

Tabla 26. Caudales y Presiones para Prueba 4

PRUEBA #4/7					
FLUJO EN NODO 4		FLUJO EN NODO 11		FLUJO EN NODO 12	
ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA
CARACTERISTICAS DEL TANQUE DE AFORO		PRESION EN PLATINA DE ORIFICIO		M. C. A. :	0,05
DIAMETRO (m)=	0,32			PSI:	0,90
AREA (m2)=	0,08042477				
CAUDAL CON EL TANQUE DE AFORO					
PRUEBA	TIEMPO (s)	ALTURA TANQUE (m)	VOLUMEN TANQUE (m)	CAUDAL (m3/s)	CAUDAL (L/s)
1	5,08	0,069	0,0055493	0,0010924	1,0923837
2	4,86	0,067	0,0053885	0,0011087	1,1087366
3	5,28	0,068	0,0054689	0,0010358	1,0357736
4	5,06	0,068	0,0054689	0,0010808	1,0808072
5	5,12	0,065	0,0052276	0,0010210	1,0210176
6	5,14	0,070	0,0056297	0,0010953	1,0952790
PROMEDIO	5,09	0,068	0,0054555	0,0010723	1,0723329

PRUEBA #4. FLUJO EN NODO 12					
MALLA	TRAMO	MANOMETRO DE MERCURIO (CM)	MANOMETRO ANALOGICO (PSI)	MAYOR NODO	SENTIDO EN MALLA
MALLA V	2B - 6A	0,047	0,90	2B	POS.
	2A - 3A	0,007	0,10	2A	NEG.
	3B - 4A	0,038	0,75	3B	NEG.
	6C - 5A	0,002	0,10	6C	POS.
	5C - 4B	0,001	0,10	4B	NEG.
MALLA IV	6C - 5A	0,002	0,10	6C	POS.
	6B - 7A	0,024	0,50	6B	POS.
	7C - 9B	0,001	0,10	9B	NEG.
	9A - 5B	0,013	0,25	5B	NEG.
MALLA III	7C - 9B	0,001	0,10	9B	POS.
	7B - 8A	0,022	0,40	7B	POS.
	8C - 10A	0,003	0,10	10A	NEG.
	10B - 9C	0,001	0,10	9C	NEG.
MALLA II	5C - 4B	0,001	0,10	4B	NEG.
	9A - 5B	0,013	0,25	5B	POS.
	10B - 9C	0,001	0,10	9C	POS.
	10C - 11B	0,001	0,10	10C	POS.
	11A - 4C	0,047	0,90	4C	NEG.
MALLA I	8C - 10A	0,003	0,10	10A	POS.
	10C - 11B	0,001	0,10	10C	NEG.
	8B - 13B	0,012	0,25	8B	POS.
	13A - 12A	0,028	0,26	13A	POS.
	12B - 11C	0,078	1,40	11C	NEG.

Tabla 27. Caudales y Presiones para Prueba 5

PRUEBA #5/7					
FLUJO EN NODO 4		FLUJO EN NODO 11		FLUJO EN NODO 12	
ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA
CARACTERISTICAS DEL TANQUE DE AFORO		PRESION EN PLATINA DE ORIFICIO		M. C. A. :	0,060
DIAMETRO (m)=	0,32			PSI:	1,10
AREA (m2)=	0,08042477				
CAUDAL CON EL TANQUE DE AFORO					
PRUEBA	TIEMPO (s)	ALTURA TANQUE (m)	VOLUMEN TANQUE (m)	CAUDAL (m3/s)	CAUDAL (L/s)
1	5,11	0,071	0,0057102	0,0011174	1,1174479
2	5,21	0,077	0,0061927	0,0011886	1,1886195
3	5,00	0,070	0,0056297	0,0011259	1,1259468
4	5,14	0,073	0,0058710	0,0011422	1,1422195
5	5,10	0,072	0,0057906	0,0011354	1,1354085
6	5,09	0,070	0,0056297	0,0011060	1,1060381
PROMEDIO	5,11	0,072	0,0058040	0,0011359	1,1359467

PRUEBA #5. FLUJO EN NODOS 4 Y 11					
MALLA	TRAMO	MANOMETRO DE MERCURIO (CM)	MANOMETRO ANALOGICO (PSI)	MAYOR NODO	SENTIDO EN MALLA
MALLA V	2B - 6A	0,053	1,00	2B	POS.
	2A - 3A	0,008	0,20	2A	NEG.
	3B - 4A	0,046	0,80	3B	NEG.
	6C - 5A	0,002	0,10	6C	POS.
	5C - 4B	0,002	0,10	5C	POS.
MALLA IV	6C - 5A	0,002	0,10	6C	NEG.
	6B - 7A	0,018	0,35	6B	POS.
	7C - 9B	0,001	0,10	9B	NEG.
	9A - 5B	0,003	0,10	5B	NEG.
MALLA III	7C - 9B	0,001	0,10	9B	POS.
	7B - 8A	0,011	0,20	7B	POS.
	8C - 10A	0,002	0,10	8C	NEG.
	10B - 9C	0,001	0,10	9C	NEG.
MALLA II	5C - 4B	0,002	0,10	5C	NEG.
	9A - 5B	0,003	0,10	5B	POS.
	10B - 9C	0,001	0,10	9C	POS.
	10C - 11B	0,003	0,10	10C	POS.
	11A - 4C	0,010	0,20	4C	NEG.
MALLA I	8C - 10A	0,002	0,10	8C	POS.
	10C - 11B	0,003	0,10	10C	NEG.
	8B - 13B	0,016	0,25	8B	POS.
	13A - 12A	0,006	0,10	13A	POS.
	12B - 11C	0,006	0,25	12B	POS.

Tabla 28. Caudales y Presiones para Prueba 6

PRUEBA #6/7					
FLUJO EN NODO 4		FLUJO EN NODO 11		FLUJO EN NODO 12	
ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA
CARACTERISTICAS DEL TANQUE DE AFORO		PRESION EN PLATINA DE ORIFICIO		M. C. A. :	0,061
DIAMETRO (m)=	0,32			PSI:	1,10
AREA (m2)=	0,08042477				
CAUDAL CON EL TANQUE DE AFORO					
PRUEBA	TIEMPO (s)	ALTURA TANQUE (m)	VOLUMEN TANQUE (m)	CAUDAL (m3/s)	CAUDAL (L/s)
1	4,98	0,071	0,0057102	0,0011466	1,1466182
2	5,12	0,072	0,0057906	0,0011310	1,1309734
3	5,19	0,074	0,0059514	0,0011467	1,1467116
4	4,99	0,072	0,0057906	0,0011604	1,1604376
5	5,24	0,075	0,0060319	0,0011511	1,1511179
6	5,06	0,071	0,0057102	0,0011285	1,1284899
PROMEDIO	5,10	0,073	0,0058308	0,0011441	1,1440581

PRUEBA #6. FLUJO EN NODOS 4 Y 12					
MALLA	TRAMO	MANOMETRO DE MERCURIO (CM)	MANOMETRO ANALOGICO (PSI)	MAYOR NODO	SENTIDO EN MALLA
MALLA V	2B - 6A	0,055	1,00	2B	POS.
	2A - 3A	0,008	0,20	2A	NEG.
	3B - 4A	0,045	1,30	3B	NEG.
	6C - 5A	0,001	0,10	6C	POS.
	5C - 4B	0,001	0,10	5C	POS.
MALLA IV	6C - 5A	0,001	0,10	6C	NEG.
	6B - 7A	0,018	0,32	6B	POS.
	7C - 9B	0,001	0,10	9B	NEG.
	9A - 5B	0,002	0,10	5B	NEG.
MALLA III	7C - 9B	0,001	0,10	9B	POS.
	7B - 8A	0,011	0,20	7B	POS.
	8C - 10A	0,002	0,10	8C	POS.
	10B - 9C	0,001	0,10	9C	NEG.
MALLA II	5C - 4B	0,001	0,10	5C	NEG.
	9A - 5B	0,002	0,10	5B	POS.
	10B - 9C	0,001	0,10	9C	POS.
	10C - 11B	0,002	0,10	10C	POS.
	11A - 4C	0,009	0,15	4C	NEG.
MALLA I	8C - 10A	0,002	0,10	8C	NEG.
	10C - 11B	0,002	0,10	10C	NEG.
	8B - 13B	0,003	0,10	8B	POS.
	13A - 12A	0,006	0,15	13A	POS.
	12B - 11C	0,025	0,50	11C	NEG.

Tabla 29. Caudales y Presiones para Prueba 7

PRUEBA #7/7					
FLUJO EN NODO 4		FLUJO EN NODO 11		FLUJO EN NODO 12	
ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA	ABIERTA	CERRADA
CARACTERISTICAS DEL TANQUE DE AFORO		PRESION EN PLATINA DE ORIFICIO		M. C. A. :	0,057
DIAMETRO (m)=	0,32			PSI:	1,05
AREA (m2)=	0,08042477				
CAUDAL CON EL TANQUE DE AFORO					
PRUEBA	TIEMPO (s)	ALTURA TANQUE (m)	VOLUMEN TANQUE (m)	CAUDAL (m3/s)	CAUDAL (L/s)
1	5,04	0,070	0,0056297	0,0011170	1,1170107
2	5,06	0,071	0,0057102	0,0011285	1,1284899
3	5,20	0,073	0,0058710	0,0011290	1,1290401
4	5,25	0,075	0,0060319	0,0011489	1,1489253
5	5,12	0,071	0,0057102	0,0011153	1,1152654
6	5,08	0,071	0,0057102	0,0011240	1,1240470
PROMEDIO	5,13	0,072	0,0057772	0,0011271	1,1271297

PRUEBA #7. FLUJO EN NODOS 11 Y 12					
MALLA	TRAMO	MANOMETRO DE MERCURIO (CM)	MANOMETRO ANALOGICO (PSI)	MAYOR NODO	SENTIDO EN MALLA
MALLA V	2B - 6A	0,053	1,00	2B	POS.
	2A - 3A	0,007	0,20	2A	NEG.
	3B - 4A	0,043	0,80	3B	NEG.
	6C - 5A	0,001	0,10	6C	POS.
	5C - 4B	0,001	0,10	4B	NEG.
MALLA IV	6C - 5A	0,001	0,10	6C	NEG.
	6B - 7A	0,026	0,50	6B	POS.
	7C - 9B	0,003	0,10	9B	NEG.
	9A - 5B	0,005	0,20	5B	NEG.
MALLA III	7C - 9B	0,003	0,10	9B	POS.
	7B - 8A	0,020	0,40	7B	POS.
	8C - 10A	0,002	0,10	10A	NEG.
	10B - 9C	0,001	0,10	9C	NEG.
MALLA II	5C - 4B	0,001	0,10	4B	POS.
	9A - 5B	0,005	0,20	5B	POS.
	10B - 9C	0,001	0,10	9C	NEG.
	10C - 11B	0,005	0,10	10C	POS.
	11A - 4C	0,055	1,00	4C	NEG.
MALLA I	8C - 10A	0,002	0,10	10A	POS.
	10C - 11B	0,005	0,10	10C	NEG.
	8B - 13B	0,002	0,10	8B	POS.
	13A - 12A	0,006	0,20	13A	POS.
	12B - 11C	0,017	0,35	11C	NEG.



Tabla 30. Variación De Caudales Por Correcciones Hardy Cross. Prueba 1.

MALLA	TRAMO	VARIACION DEL CAUDAL DEPENDIENDO DE LAS ITERACIONES. SALIDA FLUJO EN TODOS LOS NODOS											
		0	1era	2da	3era	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10ma	
MALLA V	2B - 6A	0,000560	0,000585	0,000589	0,000588	0,000588	0,000588	0,000588	0,000588	0,000588	0,000588	0,000588	0,000588
	2A - 3A	-0,000560	-0,000535	-0,000531	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532
	3B - 4A	-0,000560	-0,000535	-0,000531	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532	-0,000532
	6C - 5A	0,000280	0,000225	0,000279	0,000267	0,000272	0,000271	0,000271	0,000271	0,000271	0,000271	0,000271	0,000271
MALLA IV	5C - 4B	-0,000187	0,000005	-0,000035	-0,000022	-0,000025	-0,000024	-0,000024	-0,000024	-0,000024	-0,000024	-0,000024	-0,000024
	6C - 5A	-0,000280	-0,000225	-0,000279	-0,000267	-0,000272	-0,000271	-0,000271	-0,000271	-0,000271	-0,000271	-0,000271	-0,000271
	6B - 7A	0,000280	0,000360	0,000309	0,000320	0,000316	0,000317	0,000317	0,000317	0,000317	0,000317	0,000317	0,000317
	7C - 9B	0,000140	0,000021	0,000013	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012
MALLA III	5B - 9A	-0,000467	-0,000219	-0,000314	-0,000290	-0,000297	-0,000295	-0,000295	-0,000295	-0,000295	-0,000295	-0,000295	-0,000295
	7C - 9A	-0,000140	-0,000021	-0,000013	-0,000012	-0,000012	-0,000012	-0,000012	-0,000012	-0,000012	-0,000012	-0,000012	-0,000012
	7B - 8A	0,000140	0,000339	0,000296	0,000309	0,000304	0,000305	0,000305	0,000305	0,000305	0,000305	0,000305	0,000305
	8C - 10A	0,000070	0,000117	0,000072	0,000084	0,000080	0,000081	0,000080	0,000080	0,000080	0,000080	0,000080	0,000080
MALLA II	9C - 10B	-0,000607	-0,000240	-0,000328	-0,000302	-0,000309	-0,000307	-0,000307	-0,000307	-0,000307	-0,000307	-0,000307	-0,000307
	5C - 4B	0,000187	-0,000005	0,000035	0,000022	0,000025	0,000024	0,000024	0,000024	0,000024	0,000024	0,000024	0,000024
	5B - 9A	0,000467	0,000219	0,000314	0,000290	0,000297	0,000295	0,000295	0,000295	0,000295	0,000295	0,000295	0,000295
	9C - 10B	0,000607	0,000240	0,000328	0,000302	0,000309	0,000307	0,000307	0,000307	0,000307	0,000307	0,000307	0,000307
MALLA I	10C - 11B	0,000677	0,000358	0,000400	0,000385	0,000389	0,000387	0,000388	0,000387	0,000387	0,000387	0,000387	0,000387
	4C - 11A	-0,000187	-0,000354	-0,000309	-0,000323	-0,000320	-0,000321	-0,000321	-0,000321	-0,000321	-0,000321	-0,000321	-0,000321
	8C - 10A	-0,000070	-0,000117	-0,000072	-0,000084	-0,000080	-0,000081	-0,000080	-0,000080	-0,000080	-0,000080	-0,000080	-0,000080
	10C - 11B	-0,000677	-0,000358	-0,000400	-0,000385	-0,000389	-0,000387	-0,000388	-0,000387	-0,000387	-0,000387	-0,000387	-0,000387
MALLA I	8B - 13B	0,000070	0,000222	0,000224	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225
	13A - 12A	0,000070	0,000222	0,000224	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225	0,000225
	11C - 12B	-0,000432	-0,000280	-0,000278	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277
	11C - 12B	-0,000432	-0,000280	-0,000278	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277

Tabla 31. Variación De Caudales Por Correcciones Hardy Cross. Prueba 2

MALLA	TRAMO	VARIACION DEL CAUDAL DEPENDIENDO DE LAS ITERACIONES. SALIDA DE FLUJO EN NODO 4											
		0	1era	2da	3era	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10ma	
MALLA V	2B - 6A	0,0005716	0,0005825	0,0005841	0,0005831	0,0005825	0,0005822	0,0005820	0,0005820	0,0005820	0,0005819	0,0005819	0,0005819
	2A - 3A	-0,0005716	-0,0005606	-0,0005590	-0,0005600	-0,0005606	-0,0005609	-0,0005611	-0,0005611	-0,0005612	-0,0005612	-0,0005612	-0,0005612
	3B - 4A	-0,0005716	-0,0005606	-0,0005590	-0,0005600	-0,0005606	-0,0005609	-0,0005611	-0,0005611	-0,0005612	-0,0005612	-0,0005612	-0,0005612
	6C - 5A	0,0002858	0,0004088	0,0004333	0,0004396	0,0004418	0,0004429	0,0004433	0,0004436	0,0004437	0,0004437	0,0004437	0,0004437
MALLA IV	5C - 4B	0,0005358	0,0004538	0,0004681	0,0004743	0,0004770	0,0004783	0,0004789	0,0004791	0,0004793	0,0004793	0,0004793	0,0004794
	6C - 5A	-0,0002858	-0,0004088	-0,0004333	-0,0004396	-0,0004418	-0,0004429	-0,0004433	-0,0004436	-0,0004437	-0,0004437	-0,0004437	-0,0004437
	6B - 7A	0,0002858	0,0001737	0,0001508	0,0001435	0,0001406	0,0001393	0,0001387	0,0001384	0,0001383	0,0001382	0,0001382	0,0001382
	7C - 9B	0,0001429	0,0000830	0,0000778	0,0000798	0,0000816	0,0000825	0,0000829	0,0000831	0,0000832	0,0000832	0,0000833	0,0000833
MALLA III	9A - 5B	0,0002501	0,0000450	0,0000349	0,0000347	0,0000352	0,0000354	0,0000355	0,0000356	0,0000356	0,0000356	0,0000356	0,0000356
	7C - 9B	-0,0001429	-0,0000830	-0,0000778	-0,0000798	-0,0000816	-0,0000825	-0,0000829	-0,0000831	-0,0000832	-0,0000832	-0,0000833	-0,0000833
	7B - 8A	0,0001429	0,0000908	0,0000730	0,0000637	0,0000590	0,0000568	0,0000558	0,0000553	0,0000551	0,0000550	0,0000549	0,0000549
	8C - 10A	0,0000714	0,0000528	0,0000494	0,0000466	0,0000446	0,0000435	0,0000430	0,0000430	0,0000427	0,0000425	0,0000425	0,0000424
MALLA II	10B - 9C	0,0001072	-0,0000380	-0,0000430	-0,0000451	-0,0000464	-0,0000471	-0,0000474	-0,0000475	-0,0000476	-0,0000476	-0,0000476	-0,0000476
	5C - 4B	-0,0005358	-0,0004538	-0,0004681	-0,0004743	-0,0004770	-0,0004783	-0,0004789	-0,0004791	-0,0004793	-0,0004793	-0,0004793	-0,0004794
	9A - 5B	-0,0002501	-0,0000450	-0,0000349	-0,0000347	-0,0000352	-0,0000354	-0,0000355	-0,0000356	-0,0000356	-0,0000356	-0,0000356	-0,0000356
	10B - 9C	-0,0001072	0,0000380	0,0000430	0,0000451	0,0000464	0,0000471	0,0000474	0,0000475	0,0000476	0,0000476	0,0000476	0,0000476
MALLA I	10C - 11B	-0,0000357	0,0000908	0,0000924	0,0000917	0,0000911	0,0000906	0,0000903	0,0000902	0,0000901	0,0000901	0,0000901	0,0000901
	11A - 4C	0,0000357	0,0001288	0,0001160	0,0001088	0,0001055	0,0001039	0,0001032	0,0001028	0,0001027	0,0001026	0,0001026	0,0001026
	8C - 10A	-0,0000714	-0,0000528	-0,0000494	-0,0000466	-0,0000446	-0,0000435	-0,0000430	-0,0000427	-0,0000425	-0,0000425	-0,0000425	-0,0000424
	10C - 11B	0,0000357	-0,0000908	-0,0000924	-0,0000917	-0,0000911	-0,0000906	-0,0000903	-0,0000902	-0,0000901	-0,0000901	-0,0000901	-0,0000901
MALLA I	8B - 13B	0,0000714	0,0000380	0,0000236	0,0000171	0,0000144	0,0000133	0,0000128	0,0000126	0,0000126	0,0000125	0,0000125	0,0000125
	13A - 12A	0,0000714	0,0000380	0,0000236	0,0000171	0,0000144	0,0000133	0,0000128	0,0000126	0,0000126	0,0000125	0,0000125	0,0000125
	12B - 11C	0,0000714	0,0000380	0,0000236	0,0000171	0,0000144	0,0000133	0,0000128	0,0000126	0,0000126	0,0000125	0,0000125	0,0000125
	12B - 11C	0,0000714	0,0000380	0,0000236	0,0000171	0,0000144	0,0000133	0,0000128	0,0000126	0,0000126	0,0000125	0,0000125	0,0000125

Tabla 32. Variación De Caudales Por Correcciones Hardy Cross. Prueba 3

MALLA	TRAMO	VARIACION DEL CAUDAL DEPENDIENDO DE LAS ITERACIONES. SALIDA DE FLUJO EN NODO 11										
		0	1era	2da	3era	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10ma
MALLA V	2B - 6A	0,000550	0,000582	0,000583	0,000581	0,000581	0,000580	0,000580	0,000580	0,000580	0,000580	0,000580
	2A - 3A	-0,000550	-0,000518	-0,000517	-0,000518	-0,000519	-0,000519	-0,000519	-0,000520	-0,000520	-0,000520	-0,000520
	3B - 4A	-0,000550	-0,000518	-0,000517	-0,000518	-0,000519	-0,000519	-0,000519	-0,000520	-0,000520	-0,000520	-0,000520
	6C - 5A	-0,000137	0,000133	0,000185	0,000201	0,000211	0,000215	0,000218	0,000219	0,000220	0,000220	0,000220
	5C - 4B	-0,000275	-0,000188	-0,000161	-0,000143	-0,000135	-0,000130	-0,000128	-0,000127	-0,000126	-0,000125	-0,000125
MALLA IV	6C - 5A	0,000137	-0,000133	-0,000185	-0,000201	-0,000211	-0,000215	-0,000218	-0,000219	-0,000220	-0,000220	-0,000220
	6B - 7A	0,000687	0,000449	0,000397	0,000380	0,000370	0,000365	0,000362	0,000361	0,000360	0,000360	0,000359
	7C - 9B	0,000344	0,000044	0,000016	0,000015	0,000015	0,000015	0,000015	0,000015	0,000015	0,000015	0,000015
	9A - 5B	-0,000137	-0,000321	-0,000346	-0,000345	-0,000346	-0,000346	-0,000346	-0,000346	-0,000346	-0,000346	-0,000346
MALLA III	7C - 9B	-0,000344	-0,000044	-0,000016	-0,000015	-0,000015	-0,000015	-0,000015	-0,000015	-0,000015	-0,000015	-0,000015
	7B - 8A	0,000344	0,000405	0,000381	0,000365	0,000355	0,000350	0,000347	0,000346	0,000345	0,000344	0,000344
	8C - 10A	0,000172	0,000287	0,000279	0,000270	0,000263	0,000260	0,000258	0,000257	0,000256	0,000256	0,000255
	10B - 9C	-0,000481	-0,000364	-0,000363	-0,000359	-0,000361	-0,000361	-0,000361	-0,000361	-0,000361	-0,000361	-0,000361
MALLA II	5C - 4B	0,000275	0,000188	0,000161	0,000143	0,000135	0,000130	0,000128	0,000127	0,000126	0,000125	0,000125
	9A - 5B	0,000137	0,000321	0,000346	0,000345	0,000346	0,000346	0,000346	0,000346	0,000346	0,000346	0,000346
	10B - 9C	0,000481	0,000364	0,000363	0,000359	0,000361	0,000361	0,000361	0,000361	0,000361	0,000361	0,000361
	10C - 11B	0,000653	0,000651	0,000641	0,000629	0,000624	0,000620	0,000618	0,000617	0,000617	0,000617	0,000616
	11A - 4C	-0,000275	-0,000329	-0,000356	-0,000375	-0,000384	-0,000389	-0,000391	-0,000393	-0,000394	-0,000394	-0,000394
MALLA I	8C - 10A	-0,000172	-0,000287	-0,000279	-0,000270	-0,000263	-0,000260	-0,000258	-0,000257	-0,000256	-0,000256	-0,000255
	10C - 11B	-0,000653	-0,000651	-0,000641	-0,000629	-0,000624	-0,000620	-0,000618	-0,000617	-0,000617	-0,000617	-0,000616
	8B - 13B	0,000172	0,000119	0,000102	0,000096	0,000092	0,000090	0,000089	0,000089	0,000089	0,000089	0,000088
	13A - 12A	0,000172	0,000119	0,000102	0,000096	0,000092	0,000090	0,000089	0,000089	0,000089	0,000089	0,000088
	12B - 11C	0,000172	0,000119	0,000102	0,000096	0,000092	0,000090	0,000089	0,000089	0,000089	0,000089	0,000088

Tabla 33. Variación De Caudales Por Correcciones Hardy Cross. Prueba 4

MALLA	TRAMO	VARIACION DEL CAUDAL DEPENDIENDO DE LAS ITERACIONES. SALIDA DE FLUJO EN NODO 12										
		0	1era	2da	3era	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10ma
MALLA V	2B - 6A	0,00054	0,00056	0,00057	0,00057	0,00057	0,00057	0,00057	0,00057	0,00057	0,00056	0,000566
	2A - 3A	-0,00054	-0,00051	-0,00051	-0,00051	-0,00051	-0,00051	-0,00051	-0,00051	-0,00051	-0,000506	-0,000506
	3B - 4A	-0,00054	-0,00051	-0,00051	-0,00051	-0,00051	-0,00051	-0,00051	-0,00051	-0,00051	-0,000506	-0,000506
	6C - 5A	0,00027	0,00017	0,00019	0,00019	0,00020	0,00020	0,00020	0,00020	0,00020	0,000203	0,000203
	5C - 4B	-0,00027	-0,00018	-0,00017	-0,00016	-0,00015	-0,00015	-0,00015	-0,00015	-0,00015	-0,000149	-0,000149
MALLA IV	6C - 5A	-0,00027	-0,00017	-0,00019	-0,00019	-0,00020	-0,00020	-0,00020	-0,00020	-0,00020	-0,000203	-0,000203
	6B - 7A	0,00027	0,00039	0,00038	0,00037	0,00037	0,00037	0,00037	0,00036	0,00036	0,000364	0,000364
	7C - 9B	-0,000268083	-0,00003	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,000004	0,000004
	9A - 5B	-0,00054	-0,00036	-0,00036	-0,00035	-0,00035	-0,00035	-0,00035	-0,00035	-0,00035	-0,000352	-0,000352
MALLA III	7C - 9B	0,000268083	0,00003	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-0,000004	-0,000004
	7B - 8A	0,00054	0,00042	0,00038	0,00037	0,00037	0,00036	0,00036	0,00036	0,00036	0,000360	0,000359
	8C - 10A	-0,000134042	-0,00007	-0,00008	-0,00009	-0,00009	-0,00010	-0,00010	-0,00010	-0,00010	-0,000101	-0,000101
	10B - 9C	-0,000268083	-0,00032	-0,00036	-0,00035	-0,00036	-0,00036	-0,00036	-0,00036	-0,00036	-0,000356	-0,000356
MALLA II	5C - 4B	-0,00027	0,00018	0,00017	0,00016	0,00015	0,00015	0,00015	0,00015	0,00015	0,000149	0,000149
	9A - 5B	0,00054	0,00036	0,00036	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035	0,000352	0,000352
	10B - 9C	0,000268083	0,00032	0,00036	0,00035	0,00036	0,00036	0,00036	0,00036	0,00036	0,000356	0,000356
	10C - 11B	-0,000134	-0,00002	0,00000	0,00000	-0,00001	-0,00001	-0,00001	-0,00001	-0,00001	-0,000013	-0,000013
	11A - 4C	-0,000268083	-0,00033	-0,00033	-0,00035	-0,00035	-0,00035	-0,00036	-0,00036	-0,00036	-0,000357	-0,000357
MALLA I	8C - 10A	0,000134042	0,00007	0,00008	0,00009	0,00009	0,00010	0,00010	0,00010	0,00010	0,000101	0,000101
	10C - 11B	0,000134	0,00002	0,00000	0,00000	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,000013	0,000013
	8B - 13B	0,00067	0,00049	0,00046	0,00046	0,00046	0,00046	0,00046	0,00046	0,00046	0,000460	0,000460
	13A - 12A	0,00067	0,00049	0,00046	0,00046	0,00046	0,00046	0,00046	0,00046	0,00046	0,000460	0,000460
	12B - 11C	-0,000402	-0,00058	-0,00061	-0,00061	-0,00061	-0,00061	-0,00061	-0,00061	-0,00061	-0,000612	-0,000612



Tabla 34. Variación De Caudales Por Correcciones Hardy Cross. Prueba 5.

MALLA	TRAMO	VARIACION DEL CAUDAL DEPENDIENDO DE LAS ITERACIONES. SALIDA DE FLUJO EN NODOS 4 Y 11										
		0	1era	2da	3era	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10ma
MALLA V	2B - 6A	0,000568	0,000590	0,000593	0,000594	0,000594	0,000594	0,000594	0,000594	0,000594	0,000594	0,000594
	2A - 3A	-0,000568	-0,000546	-0,000543	-0,000542	-0,000542	-0,000542	-0,000542	-0,000542	-0,000542	-0,000542	-0,000542
	3B - 4A	-0,000568	-0,000546	-0,000543	-0,000542	-0,000542	-0,000542	-0,000542	-0,000542	-0,000542	-0,000542	-0,000542
	6C - 5A	0,000284	0,000348	0,000320	0,000325	0,000324	0,000324	0,000324	0,000324	0,000324	0,000324	0,000324
MALLA IV	5C - 4B	0,000142	0,000065	0,000091	0,000086	0,000088	0,000088	0,000088	0,000088	0,000088	0,000088	0,000088
	6C - 5A	-0,000284	-0,000348	-0,000320	-0,000325	-0,000324	-0,000324	-0,000324	-0,000324	-0,000324	-0,000324	-0,000324
	6B - 7A	0,000284	0,000242	0,000273	0,000269	0,000271	0,000270	0,000270	0,000270	0,000270	0,000270	0,000270
	7C - 9B	-0,000071	0,000009	0,000019	0,000022	0,000023	0,000023	0,000023	0,000023	0,000023	0,000023	0,000023
MALLA III	9A - 5B	-0,000142	-0,000283	-0,000229	-0,000239	-0,000236	-0,000236	-0,000236	-0,000236	-0,000236	-0,000236	-0,000236
	7C - 9B	0,000071	-0,000009	-0,000019	-0,000022	-0,000023	-0,000023	-0,000023	-0,000023	-0,000023	-0,000023	-0,000023
	7B - 8A	0,000355	0,000233	0,000255	0,000247	0,000248	0,000247	0,000247	0,000247	0,000247	0,000247	0,000247
	8C - 10A	0,000177	0,000132	0,000182	0,000182	0,000184	0,000184	0,000184	0,000184	0,000184	0,000184	0,000184
MALLA II	10B - 9C	-0,000071	-0,000292	-0,000247	-0,000262	-0,000258	-0,000259	-0,000259	-0,000259	-0,000259	-0,000259	-0,000259
	5C - 4B	-0,000142	-0,000065	-0,000091	-0,000086	-0,000088	-0,000088	-0,000088	-0,000088	-0,000088	-0,000088	-0,000088
	9A - 5B	0,000142	0,000283	0,000229	0,000239	0,000236	0,000236	0,000236	0,000236	0,000236	0,000236	0,000236
	10C - 9C	0,000071	0,000292	0,000247	0,000262	0,000258	0,000259	0,000259	0,000259	0,000259	0,000259	0,000259
MALLA I	10C - 11B	0,000248	0,000425	0,000429	0,000443	0,000443	0,000443	0,000443	0,000443	0,000443	0,000443	0,000443
	11A - 4C	-0,000355	-0,000256	-0,000279	-0,000273	-0,000275	-0,000275	-0,000275	-0,000275	-0,000275	-0,000275	-0,000275
	8C - 10A	-0,000177	-0,000132	-0,000182	-0,000182	-0,000184	-0,000184	-0,000184	-0,000184	-0,000184	-0,000184	-0,000184
	10C - 11B	-0,000248	-0,000425	-0,000429	-0,000443	-0,000443	-0,000443	-0,000443	-0,000443	-0,000443	-0,000443	-0,000443
MALLA I	8B - 13B	0,000177	0,000101	0,000073	0,000065	0,000063	0,000063	0,000063	0,000063	0,000063	0,000063	0,000063
	13A - 12A	0,000177	0,000101	0,000073	0,000065	0,000063	0,000063	0,000063	0,000063	0,000063	0,000063	0,000063
	12B - 11C	0,000177	0,000101	0,000073	0,000065	0,000063	0,000063	0,000063	0,000063	0,000063	0,000063	0,000063
	12B - 11C	0,000177	0,000101	0,000073	0,000065	0,000063	0,000063	0,000063	0,000063	0,000063	0,000063	0,000063

Tabla 35. Variación De Caudales Por Correcciones Hardy Cross. Prueba 6.

MALLA	TRAMO	VARIACION DEL CAUDAL DEPENDIENDO DE LAS ITERACIONES. SALIDA DE FLUJO EN LOS NODOS 4 Y 12										
		0	1era	2da	3era	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10ma
MALLA V	2B - 6A	0,000572	0,000595	0,000597	0,000598	0,000598	0,000598	0,000599	0,000599	0,000599	0,000599	0,000599
	2A - 3A	-0,000572	-0,000549	-0,000547	-0,000546	-0,000546	-0,000546	-0,000545	-0,000545	-0,000545	-0,000545	-0,000545
	3B - 4A	-0,000572	-0,000549	-0,000547	-0,000546	-0,000546	-0,000546	-0,000545	-0,000545	-0,000545	-0,000545	-0,000545
	6C - 5A	0,000286	0,000355	0,000341	0,000332	0,000326	0,000323	0,000322	0,000321	0,000320	0,000320	0,000320
MALLA IV	5C - 4B	0,000143	0,000116	0,000097	0,000085	0,000079	0,000076	0,000074	0,000073	0,000073	0,000073	0,000072
	6C - 5A	-0,000286	-0,000355	-0,000341	-0,000332	-0,000326	-0,000323	-0,000322	-0,000321	-0,000320	-0,000320	-0,000320
	6B - 7A	0,000286	0,000240	0,000255	0,000266	0,000272	0,000275	0,000277	0,000278	0,000279	0,000279	0,000279
	7C - 9B	0,000143	0,000037	0,000019	0,000016	0,000015	0,000015	0,000015	0,000015	0,000015	0,000015	0,000015
MALLA III	9A - 5B	-0,000143	-0,000239	-0,000244	-0,000247	-0,000247	-0,000247	-0,000247	-0,000247	-0,000247	-0,000247	-0,000247
	7C - 9B	-0,000143	-0,000037	-0,000019	-0,000016	-0,000015	-0,000015	-0,000015	-0,000015	-0,000015	-0,000015	-0,000015
	7B - 8A	0,000143	0,000203	0,000236	0,000249	0,000257	0,000260	0,000262	0,000263	0,000264	0,000264	0,000265
	8C - 10A	0,000072	-0,000130	-0,000101	-0,000089	-0,000082	-0,000079	-0,000077	-0,000076	-0,000075	-0,000075	-0,000075
MALLA II	10B - 9C	-0,000286	-0,000276	-0,000263	-0,000263	-0,000262	-0,000262	-0,000262	-0,000262	-0,000262	-0,000262	-0,000262
	5C - 4B	-0,000143	-0,000116	-0,000097	-0,000085	-0,000079	-0,000076	-0,000074	-0,000073	-0,000073	-0,000073	-0,000072
	9A - 5B	0,000143	0,000239	0,000244	0,000247	0,000247	0,000247	0,000247	0,000247	0,000247	0,000247	0,000247
	10C - 9C	0,000286	0,000276	0,000263	0,000263	0,000262	0,000262	0,000262	0,000262	0,000262	0,000262	0,000262
MALLA I	10C - 11B	0,000358	0,000146	0,000162	0,000174	0,000180	0,000183	0,000185	0,000186	0,000187	0,000187	0,000187
	11A - 4C	-0,000358	-0,000308	-0,000287	-0,000274	-0,000268	-0,000264	-0,000262	-0,000261	-0,000261	-0,000260	-0,000260
	8C - 10A	-0,000072	0,000130	0,000101	0,000089	0,000082	0,000079	0,000077	0,000076	0,000075	0,000075	0,000075
	10C - 11B	-0,000358	-0,000146	-0,000162	-0,000174	-0,000180	-0,000183	-0,000185	-0,000186	-0,000187	-0,000187	-0,000187
MALLA I	8B - 13B	0,000072	0,000333	0,000337	0,000338	0,000339	0,000339	0,000339	0,000339	0,000339	0,000339	0,000339
	13A - 12A	0,000072	0,000333	0,000337	0,000338	0,000339	0,000339	0,000339	0,000339	0,000339	0,000339	0,000339
	12B - 11C	-0,000715	-0,000453	-0,000449	-0,000448	-0,000448	-0,000448	-0,000448	-0,000447	-0,000447	-0,000447	-0,000447
	12B - 11C	-0,000715	-0,000453	-0,000449	-0,000448	-0,000448	-0,000448	-0,000448	-0,000447	-0,000447	-0,000447	-0,000447



Tabla 36. Variación De Caudales Por Correcciones Hardy Cross. Prueba 7.

MALLA	TRAMO	VARIACION DEL CAUDAL DEPENDIENDO DE LAS ITERACIONES. SALIDA DE FLUJO EN NODOS 11 Y 12											
		0	1era	2da	3era	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	10ma	
MALLA V	2B - 6A	0,00056	0,000591	0,000586	0,000582	0,000581	0,000581	0,000581	0,000581	0,000581	0,000581	0,000581	0,000581
	2A - 3A	-0,00056	-0,000536	-0,000541	-0,000545	-0,000546	-0,000546	-0,000546	-0,000546	-0,000546	-0,000546	-0,000546	-0,000546
	3B - 4A	-0,00056	-0,000536	-0,000541	-0,000545	-0,000546	-0,000546	-0,000546	-0,000546	-0,000546	-0,000546	-0,000546	-0,000546
	6C - 5A	0,00028	0,000515	0,000633	0,000627	0,000636	0,000634	0,000635	0,000634	0,000634	0,000634	0,000634	0,000634
MALLA IV	5C - 4B	-0,00028	-0,000181	-0,000282	-0,000263	-0,000271	-0,000269	-0,000270	-0,000269	-0,000269	-0,000269	-0,000269	-0,000269
	6C - 5A	-0,00028	-0,000515	-0,000633	-0,000627	-0,000636	-0,000634	-0,000635	-0,000634	-0,000634	-0,000634	-0,000634	
	6B - 7A	0,00028	0,000076	-0,000048	-0,000045	-0,000055	-0,000053	-0,000054	-0,000054	-0,000054	-0,000054	-0,000054	
	7C - 9B	0,00028	0,000200	0,000130	0,000098	0,000094	0,000093	0,000093	0,000093	0,000093	0,000093	0,000093	
MALLA III	9A - 5B	0,00056	0,000431	0,000212	0,000237	0,000220	0,000224	0,000223	0,000223	0,000223	0,000223	0,000223	
	7C - 9B	0,00028	0,000200	-0,000130	-0,000098	-0,000094	-0,000093	-0,000093	-0,000093	-0,000093	-0,000093	-0,000093	
	7B - 8A	0,00056	0,000440	0,000385	0,000420	0,000415	0,000417	0,000417	0,000417	0,000417	0,000417	0,000417	
	8C - 10A	0,00014	0,000274	0,000259	0,000298	0,000293	0,000295	0,000294	0,000295	0,000295	0,000295	0,000295	
MALLA II	10B - 9C	-0,00028	-0,000332	-0,000482	-0,000424	-0,000437	-0,000433	-0,000434	-0,000433	-0,000433	-0,000433	-0,000433	
	5C - 4B	0,00028	0,000181	0,000282	0,000263	0,000271	0,000269	0,000270	0,000269	0,000269	0,000269	0,000269	
	9A - 5B	0,00056	-0,000431	-0,000212	-0,000237	-0,000220	-0,000224	-0,000223	-0,000223	-0,000223	-0,000223	-0,000223	
	10B - 9C	0,00028	0,000332	0,000482	0,000424	0,000437	0,000433	0,000434	0,000433	0,000433	0,000433	0,000433	
MALLA I	10C - 11B	0,00014	0,000324	0,000459	0,000440	0,000448	0,000446	0,000446	0,000446	0,000446	0,000446	0,000446	
	11A - 4C	-0,00028	-0,000355	-0,000260	-0,000282	-0,000275	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	-0,000277	
	8C - 10A	0,00014	-0,000274	-0,000259	-0,000298	-0,000293	-0,000295	-0,000294	-0,000295	-0,000295	-0,000295	-0,000295	
	10C - 11B	-0,00014	-0,000324	-0,000459	-0,000440	-0,000448	-0,000446	-0,000446	-0,000446	-0,000446	-0,000446	-0,000446	
MALLA I	8B - 13B	0,00070	0,000448	0,000408	0,000404	0,000404	0,000404	0,000404	0,000404	0,000404	0,000404	0,000404	
	13A - 12A	0,00070	0,000448	0,000408	0,000404	0,000404	0,000404	0,000404	0,000404	0,000404	0,000404	0,000404	
	12B - 11C	-0,00021	-0,000468	-0,000508	-0,000511	-0,000512	-0,000512	-0,000512	-0,000512	-0,000512	-0,000512	-0,000512	

Tabla 37. Resultados de Epanet para Prueba 1. Salida de flujo en los nodos 4, 11 y 12.

Estado de las Líneas de la Red a las 0:00 Horas							
ID Línea	Longitud m	Díámetro mm	Caudal LPS	Velocidad m/s	Pérdida Unif. m/km	Factor Fricción	Estado
Tubería 2A-3A	1,86	23,8125	0,54	1,21	75,16	0,024	Abierta
Tubería 3B-4A	1,86	16,1925	0,54	2,62	475,70	0,022	Abierta
Tubería 5C-4B	0,93	23,8125	0,03	0,08	0,46	0,035	Abierta
Tubería 6C-5A	0,93	23,8125	-0,27	0,60	21,64	0,028	Abierta
Tubería 2B-6A	1,86	16,1925	0,58	2,82	540,27	0,022	Abierta
Tubería 6B-7A	1,4	16,1925	0,31	1,53	182,51	0,025	Abierta
Tubería 7B-8A	1,4	16,1925	0,31	1,49	174,32	0,025	Abierta
Tubería 5B-9A	1,4	16,1925	0,30	1,46	168,20	0,025	Abierta
Tubería 7C-9B	0,93	23,8125	0,01	0,02	0,10	0,143	Abierta
Tubería 8C-10A	0,93	23,8125	0,08	0,19	3,02	0,039	Abierta
Tubería 9C-10B	1,4	16,1925	0,31	1,50	176,26	0,025	Abierta
Tubería 4C-11A	2,8	16,1925	0,32	1,55	186,64	0,025	Abierta
Tubería 10C-11E	0,93	23,8125	0,39	0,88	42,91	0,026	Abierta
Tubería 11C-12B	2,87	16,1925	0,28	1,36	148,36	0,026	Abierta
Tubería 13A-12A	1,86	16,1925	-0,22	1,08	99,05	0,027	Abierta
Tubería 8B-13B	2,87	16,1925	-0,22	1,08	99,05	0,027	Abierta
Tubería salidaflujo4	2	30,4	-0,19	0,26	3,71	0,033	Abierta
Tubería salidaflujo12	2	30,4	0,50	0,69	20,62	0,026	Abierta
Tubería 20	1	38,9	1,12	0,94	26,21	0,023	Abierta
Tubería salidaflujo11	2	30,4	-0,43	0,59	15,85	0,027	Abierta

Ilustración 45. Resultados de Epanet para Prueba 2. Salida de flujo en el nodo 4.

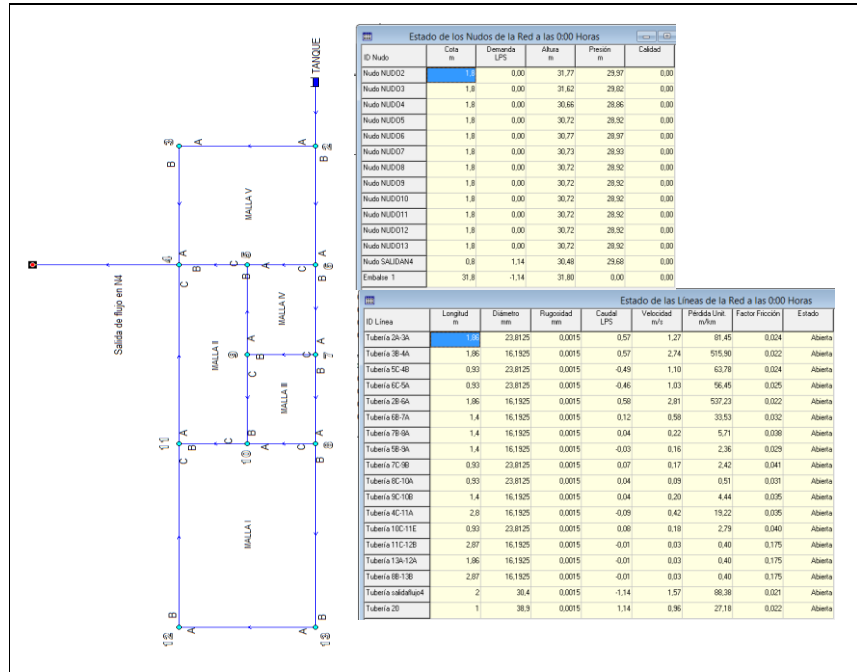


Ilustración 46. Resultados de Epanet para Prueba 3. Salida de flujo en el nodo 11.

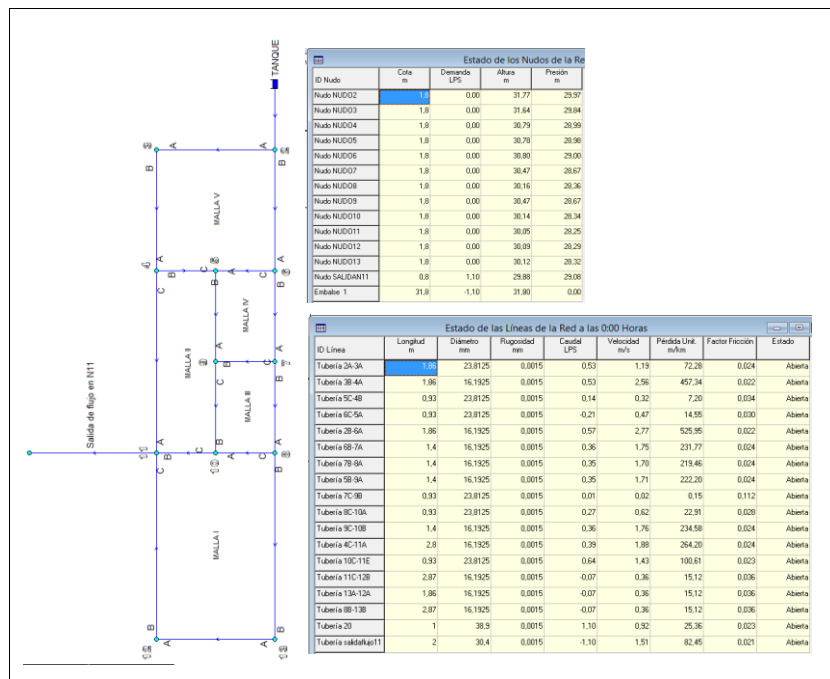


Ilustración 47. Resultados de Epanet para Prueba 4. Salida de flujo en el nodo 11.

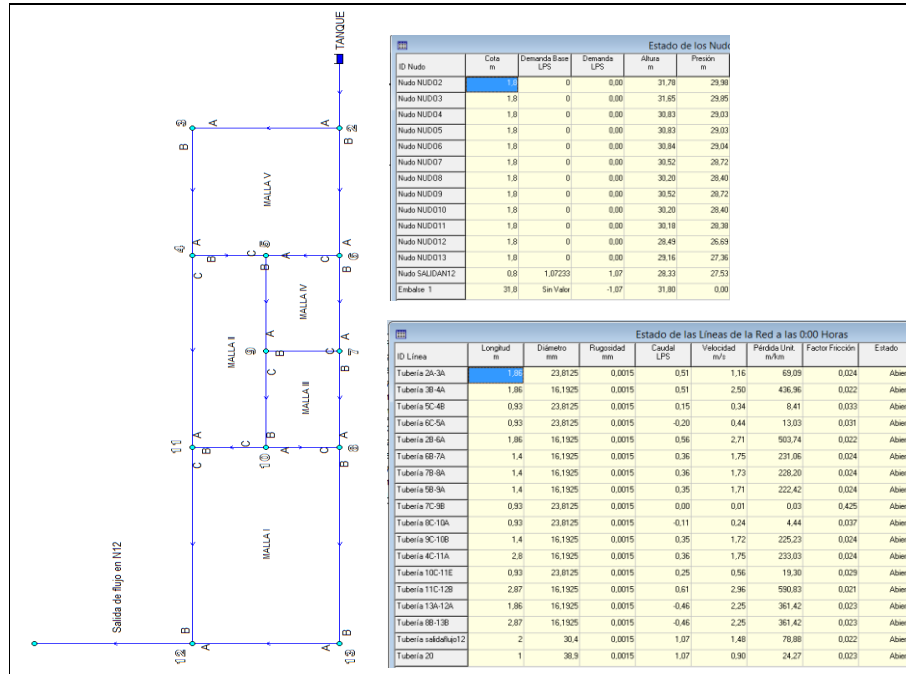


Ilustración 48. Resultados de Epanet para Prueba 5. Salida de flujo en los nodos 4 y 11.

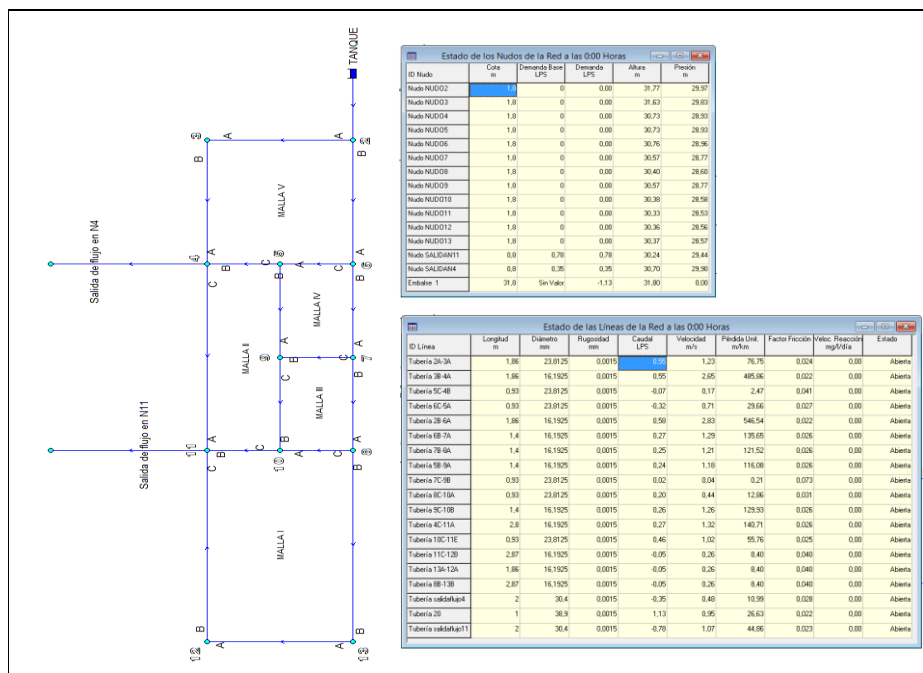


Ilustración 49. Resultados de Epanet para Prueba 6. Salida de flujo en los nodos 4 y 12.

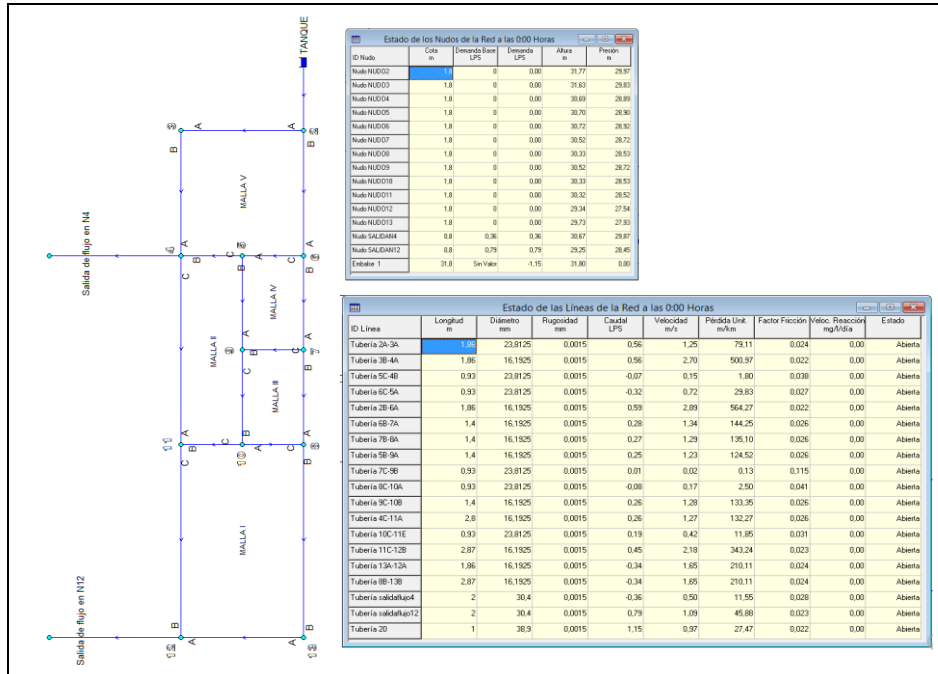


Ilustración 50. Resultados de Epanet para Prueba 7. Salida de flujo en los nodos 11 y 12.

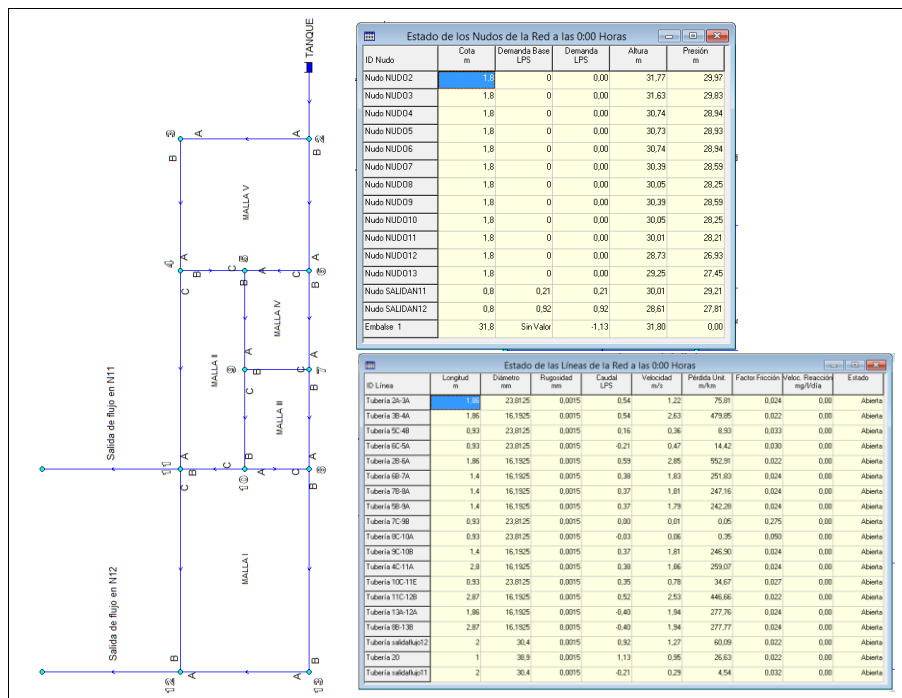


Ilustración 51. Diseño del tanque de aforo y almacenamiento. Autor Clemente Venencia

