

**CONTRIBUCIÓN EN LA ELABORACIÓN DEL PLANO ÓPTIMO DE
PRESIONES Y REDUCCIÓN DE AGUA NO CONTABILIZADA EN EL
ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA**

JUAN DIEGO PINILLA GÓMEZ



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2007**

**CONTRIBUCIÓN EN LA ELABORACIÓN DEL PLANO ÓPTIMO DE
PRESIONES Y REDUCCIÓN DE AGUA NO CONTABILIZADA EN EL
ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA**

JUAN DIEGO PINILLA GÓMEZ

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero Civil

Modalidad Práctica Empresarial

Directores

JORGE ALBERTO GUZMÁN

Ingeniero Civil, Docente de la Escuela de Ingeniería Civil UIS

JORGE ELIÉCER GÓMEZ SÁNCHEZ

Ingeniero Civil, Docente de la Escuela de Ingeniería Civil UIS

Tutor

WILLIAM IBÁÑEZ PINEDO

Gerente de Operaciones, Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2007**

A mis padres, que me han apoyado en cada proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas aquellas personas que de una u otra manera me apoyaron durante el transcurso de la práctica y el desarrollo de este proyecto; muchas gracias por sus consejos, enseñanzas y colaboración.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	XVII
METODOLOGÍA.....	XIX
1. METODOLOGÍA GENERALIZADA PARA LA DEFINICIÓN DEL PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. DEFINICIÓN DE POP	2
1.3. BENEFICIOS	3
1.4. METODOLOGÍA GENERAL.....	5
1.4.1. PASO 1: ANÁLISIS DE TOPOLOGÍA.....	6
1.4.2. PASO 2: INFORMACIÓN DE USUARIOS.....	9
1.4.3. PASO 3: MODELO HIDRÁULICO PRELIMINAR.....	10
1.4.4. PASO 4: MEDICIONES PRELIMINARES DE CAUDAL Y PRESIÓN	27
1.4.5. PASO 5: CALIBRACIÓN DEL MODELO PRELIMINAR	28
1.4.6. PASO 6: OPERACIONES DE CAMPO	32
1.4.7. PASO 7: ANÁLISIS DE CONSUMO	38
1.4.8. PASO 8: MODELOS POR ESCENARIOS.....	40
1.4.9. PASO 9: MODELO DEFINITIVO	40
1.4.10. PASO 10: OPTIMIZACIÓN DE PRESIONES Y REDUCCIÓN DEL IANC	42

1.4.11. RESULTADOS ESPERADOS	45
2. CONTRIBUCIÓN EN LA ELABORACIÓN DEL PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES Y REDUCCIÓN DE AGUA NO CONTABILIZADA EN EL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA.....	47
2.1. VERIFICACIÓN DEL CATASTRO DE REDES Y URBANISMO	47
2.2. MODELACIÓN DIGITAL DEL TERRENO	50
2.3. CURVAS DE MODULACIÓN DEL CONSUMO	52
2.4. INTERVENTORÍA DE CALIBRACIÓN DEL MODELO DISTRITO ESTADIO	54
2.5. CONFIGURACIÓN DE MACROMEDIDORES DISTRITOS SAN JUAN Y GIRÓN MAYOR	56
2.5.1. SISTEMAS DE MACROMEDICIÓN DE FLUJO	58
2.6. REVISIÓN DE PROYECTOS HIDRÁULICOS	60
2.7. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA SCADA	65
2.8. CAPACITACIONES Y CONFERENCIAS	66
CONCLUSIONES	68
RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	72

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Planchas FAL para Generación de MDE.....	51
---	----

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Plano de Presiones Distrito Estadio en Régimen Alto.	3
Figura 2. Error Topológico en Diagrama de Esquina.	7
Figura 3. Posible Registro de Usuarios Incompleto	10
Figura 4. Modelo Preliminar Subsectores al Norte del Distrito Estadio.....	11
Figura 5. Catastro de Redes Incompleto según Plano Estrella	12
Figura 6. Curva de Modulación Tanque Regadero.....	14
Figura 7. Caudal de Consumo Distrito El Carmen con Datos No Representativos	15
Figura 8. Caudal de Salida Tanque Estadio con Filtrado Manual	18
Figura 9. Caudal de Salida Tanque Estadio Filtrado No. 2 con Bandas.....	18
Figura 10. Cartografía Sector Barrio La Cumbre.....	21
Figura 11. Topografía Sector Barrio La Cumbre	22
Figura 12. Superficie en Malla Triangular Sector Barrio La Cumbre Vista 2D	22
Figura 13. Visualización Render de la Meseta de La Cumbre	23
Figura 14. Fragmento de Archivo Tipo *.inp.....	24
Figura 15. Diagrama de Flujo del Proceso de Calibración	29
Figura 16. Series de Presión Medida y Presión del Modelo	31
Figura 17. Esquema de Funcionamiento de Válvula Reguladora Tipo.....	33

Figura 18. Urbanización Mirador de Arenales. Zona Sur Municipio de Girón.	48
Figura 19. Red de distribución zona sur del Municipio de Girón	49
Figura 20. Planchas FAL Municipio de Girón	51
Figura 21. Visualización Render del municipio de Girón	52
Figura 22. Registro Típico de Presión con Datos No Representativos	53
Figura 23. Caudal Bombeado al Barrio La Cumbre (Junio a Noviembre) ...	53
Figura 24. Esquema de Operación y Localización de Macromedidores en los Distritos San Juan y Girón Mayor.	57
Figura 25. Esquema de Medidor de Flujo Ultrasónico.....	59
Figura 26. Configuración con uno y dos transversos.	59
Figura 27. Hoja de Cálculo para Evaluación de Sistema del Bombeo	64
Figura 28. Hoja de Cálculo para Estimación de Pérdidas por Fricción.....	64

RESUMEN

TÍTULO:

CONTRIBUCIÓN EN LA ELABORACIÓN DEL PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES Y REDUCCIÓN DE AGUA NO CONTABILIZADA EN EL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA *

AUTOR: JUAN DIEGO PINILLA GÓMEZ **

PALABRAS CLAVES: Modelo Hidráulico Digital, SIG, Red de Distribución, IANC, Distrito, Sectorización Hidráulica, Válvula Reguladora, Caudalímetro.

DESCRIPCIÓN

Con el desarrollo de este proyecto se presenta la metodología a seguir para optimizar el funcionamiento de una red de distribución de agua potable mediante el control de presiones, planteado en base a un modelo digital validado. Dada la necesidad de administrar adecuadamente los recursos naturales y aplicando su política de desarrollo como empresa, el amb ha implementado esta metodología con el fin de obtener un catastro de la red actualizado, con una operación eficiente, donde se identifiquen los sectores problemáticos desde el punto de vista técnico y comercial. El contenido del proyecto está soportado en el trabajo realizado por el Acueducto de Bucaramanga en tres de sus distritos de presión durante el segundo semestre del 2006.

El procedimiento descrito pretende generalizar cada uno de los pasos a seguir para obtener una distribución de presiones óptima en cualquier red de distribución tal que se reduzca el IANC, sin afectar el servicio al usuario. La ejecución de la metodología aquí plasmada permite caracterizar hidráulicamente la zona de estudio por sectores y distritos, definiendo un estado de operación eficiente. Se puede esperar una serie de beneficios asociados no solo con su estado de operación final sino también con el proceso de implementación, los cuales se describen en el contenido de este proyecto.

La optimización en la administración de redes de distribución de agua potable debe ser una prioridad para las empresas encargadas de su manejo desde el punto de vista económico y ambiental. La metodología descrita en este proyecto presenta la integración de los criterios y etapas a seguir para obtener una distribución de presiones óptima en base a un modelo digital fiable; así mismo se incluyen las recomendaciones a seguir para facilitar el proceso de implementación de esta metodología en lo que refiere al montaje del modelo hidráulico.

* Proyecto de Grado. Modalidad Práctica Empresarial.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas UIS , Escuela de ingeniería Civil,
Directores: Ing. Jorge Alberto Guzmán Jaimes e Ing. Jorge Eliécer Gómez Sánchez.

SUMMARY

TITLE:

ASSISTANCE TO THE ACCOMPLISHMENT OF THE OPTIMAL PRESSURE SURFACE AND REDUCTION OF NON COUNTED WATER AT THE BUCARAMANGA WATER SUPPLY COMPANY.*

AUTHOR: JUAN DIEGO PINILLA GÓMEZ.**

KEY WORDS: Hydraulic Digital Model, GIS, Water Supply Network, Non Counted Water, Hydraulic Sector, Regulating Valve, Flow meter.

The purpose of this project is to present a methodology to optimize the management of a water supply network by regulating water pressure; this process is supported by an hydraulic digital model. Given the need to administrate natural resources in an adequate way, and keeping in mind its enterprise politics, the water supply company of Bucaramanga amb has implemented this methodology in order to obtain an updated data base of the network, working with an efficient operation, where its problematic zones, both with technical and commercial issues, have been identified. The content of this project is supported by the work done by the amb company in three different pressure districts during the second semester of 2006.

The procedure described here is a generalization of each one of the steps required to obtain a pressure distribution that allows a reduction of the non counted water in any network, without affecting the service, by improving the way the network is operated. The application of this methodology allows an hydraulic characterization of the studied zone and its sub zones, defining an optimal state of operation. It is expected to obtain a series of benefits associated with the process of accomplishing that optimal final state; such benefits are described in this survey.

The optimization of the way water supply networks are operated should be a priority to any company in charge of its administration, from both the economical and environmental point of view. The methodology described in this project presents a summary of the main criteria and phases necessary to obtain an optimal pressure distribution based on a reliable hydraulic model; in addition, some recommendations are included regarding the modeling of the net, the calibration of the model and how to simplify the process that this requires.

* Degree Project.

**UIS Faculty of Physical - Mechanical Engineering, School of Civil Engineering, Directors: Eng. Jorge Alberto Guzmán Jaimes and Eng. Jorge Eliécer Gómez Sánchez.

GLOSARIO

ACOMETIDA derivación de la red local de acueducto que llega hasta la válvula adelante del medidor (que puede ser operada por el usuario) en el punto de empate con la instalación interna del inmueble. En edificios de propiedad horizontal o condominios, la acometida llega hasta el registro de corte general.

ARCHIVO *.INP fichero de entrada de EPANET en formato binario que permite una edición directa del modelo.

ARCHIVO *.NET fichero de entrada de EPANET con interfaz gráfica que admite edición en la ventana de visualización del programa.

DERIVACIÓN FRAUDULENTA conexión realizada a partir de una acometida, o de una red interna o de los tanques de un inmueble independiente, que no ha sido autorizada por el amb.

DISTRITO zona de trabajo de un sector hidráulico, delimitada por válvulas regularmente abiertas y que puede ser aislada para realizar, reparaciones, aforos y diversas operaciones.

EPANET es un programa de ordenador para Windows 95 a XP que permite realizar simulaciones en periodos prolongados (uno o varios días) del comportamiento hidráulico y de la evolución de la calidad del agua en redes de suministro a presión. Una red puede estar constituida por tuberías, nudos (uniones de tuberías), bombas, válvulas y depósitos de almacenamiento o embalses.

FUGA IMPERCEPTIBLE volumen de agua que se escapa a través de las redes públicas e instalaciones internas de un inmueble, y se detecta solamente mediante instrumentos apropiados tales como los geófonos.

FUGA PERCEPTIBLE volumen de agua que se escapa a través de las redes públicas e instalaciones internas de un inmueble y es detectable directamente por los sentidos.

PÉRDIDAS COMERCIALES diferencia entre el volumen de agua entregado a la salida de las plantas de tratamiento y el volumen facturado por la empresa de acueducto, debido a conexiones clandestinas, consumo de hidrantes, submedición, etc. Las pérdidas comerciales están asociadas al patrón de consumo.

PÉRDIDAS TÉCNICAS diferencia entre el volumen de agua entregado a la salida de las plantas de tratamiento y el volumen facturado por la empresa de acueducto, debido a fugas perceptibles e imperceptibles, rebose de tanques, daños, etc. Las pérdidas técnicas están asociadas con la presión.

PILA PÚBLICA suministro de agua instalada por la entidad prestadora del servicio de Acueducto, de manera provisional, para el abastecimiento colectivo en zonas que no cuenten con red local de Acueducto, siempre que las condiciones técnicas y económicas impidan la instalación de redes domiciliarias.

PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES condición de la red en la cual se han reducido las presiones a una condición mejorada en base al estudio de un modelo digital, mediante la sectorización e instalación de estaciones de regulación de presión. Gráficamente está representado por la superficie generada al relacionar las coordenadas X y Y de los nodos de la red con la Presión como coordenada Z.

RED DE DISTRIBUCIÓN de acueducto es el conjunto de tuberías, accesorios, estructura y equipos que conducen el agua desde el tanque de almacenamiento o planta de tratamiento hasta las acometidas domiciliarias.

RED LOCAL es el conjunto de tuberías o accesorios que conforman el sistema de suministro del servicio público de acueducto a una comunidad y del cual se derivan las acometidas de los inmuebles.

RED MATRIZ o red primaria de acueducto parte de la red de recolección que conforma la malla principal de servicio de una población y que distribuye el agua procedente de la conducción, planta de tratamiento o tanques a las redes secundarias.

SECTOR zona extensa de servicios cuyos límites obedecen a la disposición general de una malla de red de acueducto.

SUSCRIPTOR persona natural o jurídica propietaria del inmueble que genera facturación, es el responsable legal de la disponibilidad concedida. En términos prácticos se asocian cinco usuarios por cada suscriptor.

USUARIO persona natural o jurídica que se beneficia con la prestación de un servicio público, bien como propietario del inmueble en donde éste se presta, o como receptor directo del servicio. A este último usuario se le conoce también como consumidor.

ABREVIATURAS

amb Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

CIACUA Centro de Investigación de Acueductos y Alcantarillados Uniandes

CRA Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico.

EPA Environmental Protection Agency

ESP Empresa de Servicios Públicos

FAL Fotogrametría Analítica Limitada

IANC Índice de Agua No Contabilizada

MDE Modelo Digital de Elevaciones

POP Plano Óptimo de Presiones

POT Plan de Ordenamiento Territorial

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

SCADA Supervisory Control And Data Acquisition System (Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos).

SIG Sistema de Información Geográfica

SIIDAR Sistema Integrado de Información, Digitalización y Administración de Redes.

INTRODUCCIÓN

Conciente de su importante papel dentro de la comunidad como agente administrador de los recursos hídricos, de la necesidad de implementar planes que favorezcan la preservación de los recursos naturales; y de su política de rendimiento, crecimiento y desarrollo como empresa, el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga ha iniciado la implementación de un plan para la optimización de presiones.

El plan consiste en aplicar una metodología que permita definir un plano de presiones óptimas generado a partir de un sector de prueba, reduciendo en su desarrollo las pérdidas técnicas y comerciales propias del sistema. Se contempla la instalación de equipo de macromedición de consumo y presión, estructuras de control de presión, y la generación y calibración de modelos hidráulicos a partir de la recolección de datos de campo y registros de consumo.

La razón para desarrollar una metodología de optimización como la propuesta, obedece a la necesidad de definir una presión en cada sector de la red, que minimice el porcentaje de pérdidas en el proceso distribución, maximizando a su vez los ingresos para la empresa prestadora de servicio.

Esta condición óptima se obtiene al alcanzar un intervalo de presiones dentro de las restricciones límites impuestas por las características físicas y de consumo propias de la red, dentro del cual se disminuyan los caudales de escapes a través de las fugas no detectables, evite estallidos y daños visibles, se controlen las

conexiones clandestinas y que en general permita una reducción del volumen de agua no contabilizado. Si bien es factible que la disminución de presión puede generar una menor facturación de agua en los consumidores conectados directamente a la red de distribución, las consecuencias benéficas asociadas a su implementación compensarán ampliamente este efecto.

A continuación se presenta la Metodología Generalizada para la obtención del Plano Óptimo de Presiones como aporte a la Escuela de Ingeniería Civil, seguidamente se incluye el informe de desarrollo que describe cada una de las actividades llevadas a cabo como practicante de la Gerencia de Operaciones del **amb**, enfocadas en su mayoría a la obtención del plano óptimo de presiones para el distrito Estadio, La Cumbre, San Juan y Girón Mayor.

METODOLOGÍA

La práctica empresarial se desarrolló con dedicación de tiempo completo en la Gerencia de Operaciones localizada en la sede central del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. Como practicante de la empresa se realizaron actividades de apoyo y acompañamiento relacionadas con las funciones de la División Distribución dentro de la gerencia, con mayor dedicación al proyecto del Plano Óptimo de Presiones.

Esta labor se llevó a cabo mediante el seguimiento detallado del desarrollo del proyecto en el distrito Estadio realizando una labor de apoyo a la interventoría en cada uno de los informes presentados por el CIACUA de la Universidad de Los Andes, quienes han guiada a la empresa en la implementación de la metodología durante sus primeras fases. Las actividades llevadas a cabo para este sector fueron primordialmente la calibración y validación del modelo hidráulico. Para el barrio La Cumbre y el municipio de Girón se trabajó en la obtención del Modelo Digital de Elevaciones, así como en la verificación de la validez del urbanismo, y catastro de redes. El barrio La Cumbre, los tramos de conducción de la zona oriental, y las actividades realizadas para el municipio de Girón sirvieron como sectores de prueba para la aplicación del software requerido en el montaje del modelo hidráulico preliminar.

En el transcurso de la práctica, la apropiación de la metodología y el manejo del software necesario para la obtención del modelo validado fue constante, cada una de las etapas del proceso han sido manejadas de una u otra forma en las distintas áreas del estudio y en las diversas actividades de capacitación. Es posible

identificar las diversas fases llevadas a cabo para la obtención del Plano Óptimo de presiones en un sector particular, definidas de manera global así:

- Determinación y caracterización del sector de estudio
- Recolección y análisis de información, montaje del modelo básico
- Georeferenciación de usuarios
- Mediciones preliminares (macro y micro), calibración del modelo preliminar y operación hidráulica
- Operaciones de campo
- Calibración del modelo definitivo, generación de escenarios y validación

1. METODOLOGÍA GENERALIZADA PARA LA DEFINICIÓN DEL PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES

1.1. INTRODUCCIÓN

Durante el desarrollo de la práctica empresarial se dio énfasis a la mayoría de actividades realizadas, relacionadas con la definición del Plano Óptimo de Presiones. La definición de una superficie de presiones óptimas para los distritos críticos de la red de distribución es una necesidad manifiesta dentro del acueducto, y fue objeto de estudio primordial durante el desarrollo de la práctica.

Es necesario destacar el alcance que puede tener la aplicación de esta metodología en cualquier red de distribución de agua potable, pues su implementación implica una verdadera optimización en el manejo de la red desde diversas perspectivas.

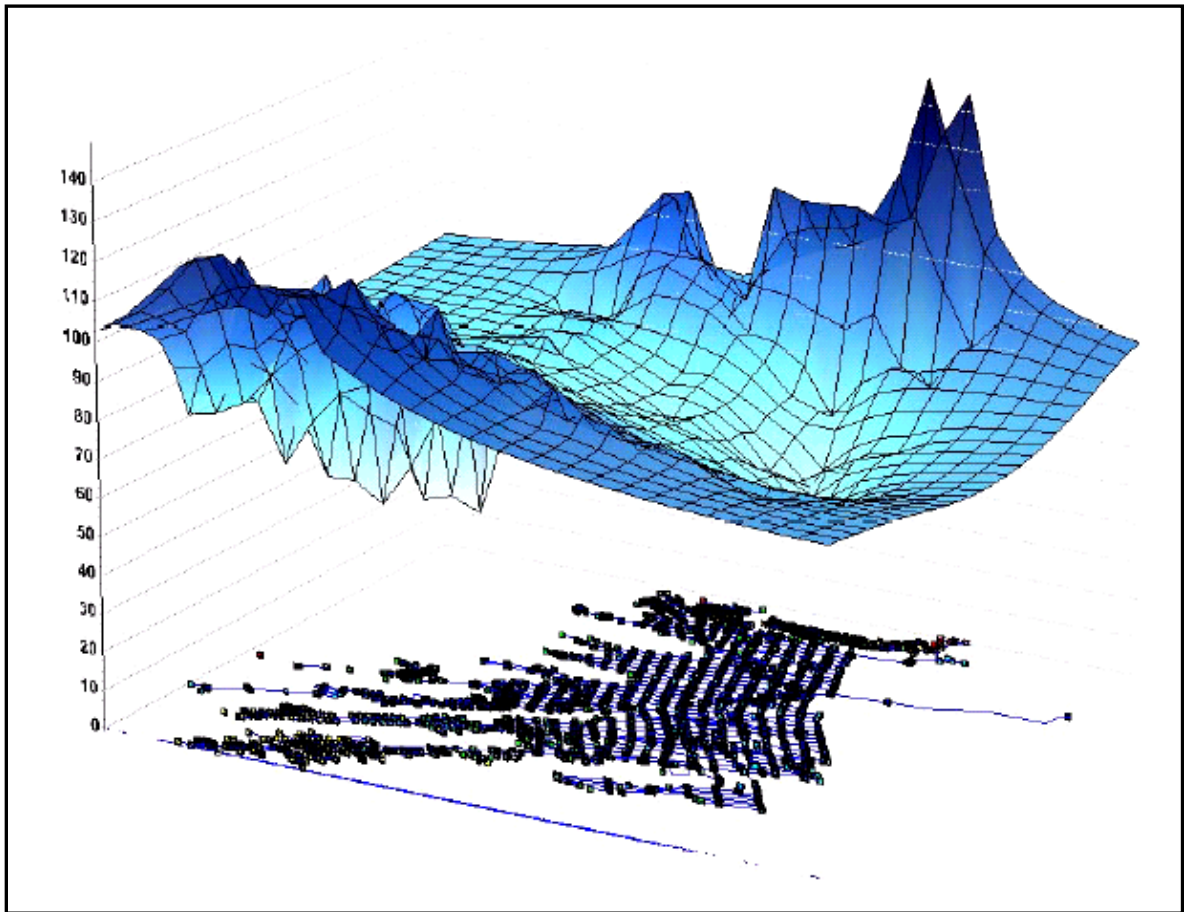
Dado el enfoque investigativo y experimental de las fases por las cuales atraviesa actualmente el proyecto POP, la aplicación de la metodología para la optimización de presiones representa una oportunidad excepcional para el desarrollo de un aporte significativo a la escuela de Ingeniería Civil de la UIS. El uso de software especializado para el montaje de modelos digitales de elevaciones así como la simulación de redes de distribución es de gran interés para la escuela dada su misión como entidad formadora de ingenieros integrales con manejo de programas actuales y especializados como lo es el software acá requerido.

Se pretende con este aporte presentar la metodología general para obtener un plano de presiones óptimas a partir de la cartografía y registros de consumo de un distrito específico o de una red en general. La experiencia obtenida con el desarrollo de las diversas etapas transcurridas durante la práctica permite complementar el aporte con los resultados y dificultades encontradas en la implementación de la metodología. Cabe mencionar que la metodología aquí descrita corresponde a los procesos aplicados por el **amb** tras la transferencia tecnológica y la capacitación de la Universidad de los Andes, adoptada y formalizada a partir de los procesos de administración de acueductos en el Reino Unido (Saldarriaga, 2006), y no son invención propia del autor.

1.2. DEFINICIÓN DE POP

Es importante establecer una descripción formal del Plano Óptimo de Presiones. Éste se define como la superficie de presiones, generada al relacionar las coordenadas X y Y de los diversos nodos de la red con la presión como coordenada Z continua, tal que el caudal por pérdidas totales debidas a fugas no visibles y a daños (roturas de tubos, estallidos causados por terceros, etc.) sea reducido, sin que se afecte en forma apreciable el volumen total de agua facturado, ni se dejen de cumplir los niveles de presión máxima o mínima en la red, establecidos por la normatividad colombiana (Saldarriaga, 2006). Esta distribución de presiones se obtiene tras la instalación de estaciones reductoras de presión en puntos estratégicos con una previa sectorización de la red.

Figura 1. Plano de Presiones Distrito Estadio en Régimen Alto.



Fuente: Informe Final POP Uniandes amb.

1.3. BENEFICIOS

La implementación de la metodología planteada para la definición del plano de presiones óptimas implica una gran labor en campo y oficina, sin embargo son evidentes los beneficios que se pueden obtener a partir del producto final e incluso durante su desarrollo. Dentro de los efectos que se pueden alcanzar con el desarrollo del POP se encuentran:

- Disminución del Índice de Agua No Contabilizada.
- Disminución del número de estallidos de tuberías y, por consiguiente, del personal y equipos necesarios para las reparaciones.
- Aumento de la vida útil de las redes de distribución, al estar sometidas a menores presiones.
- Actualización y verificación del catastro de redes consecuencia del montaje del modelo digital.
- Caracterización hidráulica detallada del sector de estudio (Modelo Digital actualizable).
- Identificar las características hidráulicas de los diversos sectores dentro del distrito planteados por el estudio como resultado de las hipótesis de calibración del modelo.
- Identificación de zonas en el sector de estudio con problemas comerciales tales como suscriptores no referenciados, consumos nulos o pérdidas comerciales excesivamente altas.
- Identificación de zonas con pérdidas técnicas excesivamente altas, con el fin de concentrar en ellas los esfuerzos de localización de fugas y problemas operativos.
- Planteamiento de un programa coherente de renovación/rehabilitación de tuberías en zonas del sector de estudio que lo requieran, por concentrar allí pérdidas técnicas de gran magnitud.
- Generar una sectorización hidráulica de forma permanente que haga más eficiente la realización de operaciones en la red, previendo con exactitud los sectores afectados por cierres y disminuyendo la población afectada por los mismos.

1.4. METODOLOGÍA GENERAL

El propósito de implementar una metodología para definir un estado de presiones óptimas en la red de distribución obedece a la necesidad de operar el sistema empleando la menor energía posible dentro del rango de servicio admisible; logrando obtener con ello los beneficios ya expuestos.

Operar la red bajo presiones reducidas implica la reducción de pérdidas de agua por fugas, de acuerdo con lo predicho por la ecuación de Torricelli que relaciona la velocidad (y por ende el caudal) de salida de un fluido a través de un agujero con la presión sobre el mismo.

$$\text{Ecuación 1. } Q = C \times H^X$$

Adicionalmente, el proceso requerido para implementar la metodología permite identificar zonas específicas con problemas de pérdidas técnicas y comerciales durante su desarrollo. La elaboración de un plan de detección de conexiones clandestinas, legalización de nuevos usuarios, reposición y construcción de redes; es el paso a seguir una vez implementado el plano óptimo de presión; pues, como se verá a continuación, el proceso de calibración y ajuste del modelo digital permite plantear hipótesis de modificación de consumo y presión con una localización geográfica definida.

Como primer paso para efectuar el proceso de optimización, es necesario limitar en lo posible las entradas de agua al sistema, lo cual forma parte del proceso de sectorización hidráulica. La sectorización hidráulica facilita las labores de control del sistema y minimiza la cantidad de estaciones reguladoras de caudal requeridas para controlar una zona dada (Jiménez, 2003). Adicionalmente, se

requiere ubicar en estos puntos equipos medidores de caudal y presión, los cuales permiten saber con precisión la cantidad de masa de agua que ingresa al sistema y la energía total con la cual se cuenta.

La metodología general para la optimización de presiones es el eje principal que lidera una serie de procesos paralelos necesarios para su progreso. La configuración de una presión adecuada a la entrada del distrito, georeferenciación de usuarios, esquema preciso de funcionamiento de la red, operaciones de campo, renovación y refuerzo de tuberías, entre otras; son actividades requeridas para obtener un verdadero manejo óptimo de presiones.

1.4.1. PASO 1: ANÁLISIS DE TOPOLOGÍA

Como un primer paso a desarrollar es necesario recolectar toda la información disponible del catastro de redes. No es posible en la mayoría de los casos contar con la información en formato digital y es necesario recurrir al registro de planos impresos, modificaciones a mano alzada, registros de reposición e instalación de tuberías, e incluso la experiencia del personal involucrado.

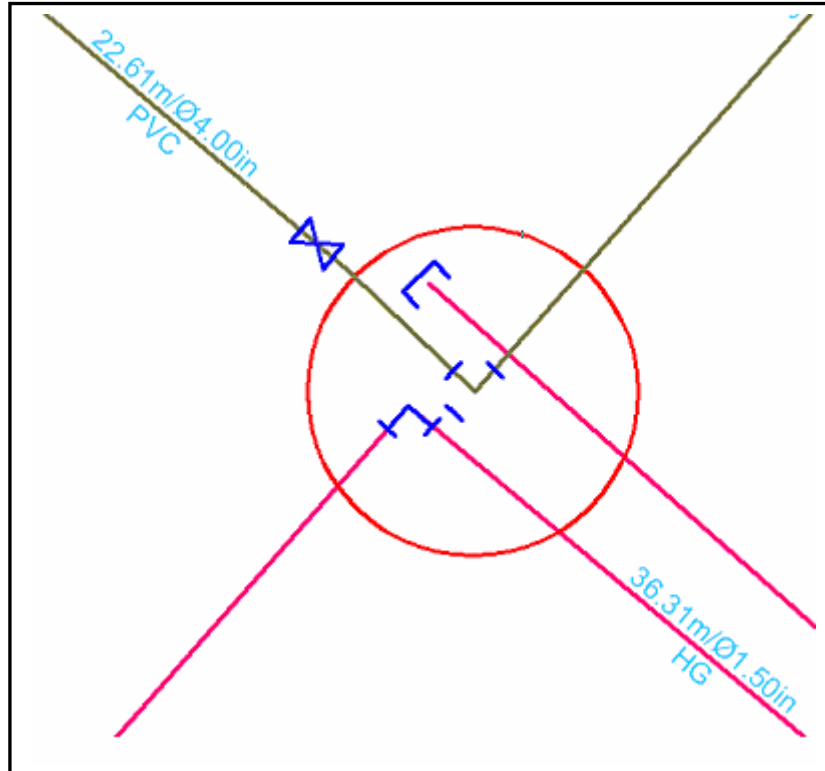
En el desarrollo de este proceso pueden definirse dos actividades principales: la asignación de las características individuales de las tuberías y accesorios, y su conectividad. Idealmente se debe relacionar cada tramo y accesorio con todas sus características posibles, estas corresponden, entre otras, a:

- Diámetros reales internos
- Diámetros nominales
- Materiales
- Fabricante

- Edades
- Fecha de Instalación
- Profundidad de instalación
- Eventos de mantenimiento
- Coeficiente de pérdidas menores
- Estado de válvulas
- Sentido de flujo

La conectividad de los elementos puede identificarse a través de los llamados diagramas de esquina, siguiendo la continuidad lógica de los diámetros, consultando al personal involucrado y en últimas por medio de apiques localizados. La figura 2 muestra un error de conectividad típico del catastro de redes.

Figura 2. Error Topológico en Diagrama de Esquina.



Fuente: Catastro de Redes amb.

Durante el desarrollo del POP en el **amb** se han presentado inconvenientes persistentes respecto a la conectividad de los elementos. Es indispensable realizar actualizaciones periódicas del catastro de redes que incluyan nuevas tuberías y se verifique la topología del catastro existente. El sistema SIIDAR existente en el **amb** permite realizar actualizaciones a un solo archivo manejado por el administrador del sistema el cual puede ser descargado con el catastro actual de cualquier sector de la red. La implementación de este sistema de administración de catastro de redes ha sido la solución planteada por el **amb** para el problema de manejo de registros gráficos, y se encuentra constantemente en actualización en formato *.dwg.

Las herramientas de generación y verificación de topología ofrecidas por el programa AutoCAD Map son de gran utilidad para la corrección de las incongruencias de conectividad y para la localización de accesorios faltantes. Las rutas para acceder a las herramientas nombradas en el software Autodesk, son:

Map / Tools / Drawing Cleanup

Map / Topology / Create

Además del catastro de redes, es altamente recomendable contar con la cartografía del urbanismo del sector de estudio. En base a un urbanismo confiable es posible localizar tuberías que no se encuentran en el registro de forma relativamente precisa; este también es útil para verificar la localización de tuberías ya incluidas en el catastro al realizar un cruce de imágenes. Al iniciar los trabajos en el municipio de Girón fue necesario contratar una firma especializada para actualizar el urbanismo del municipio con tecnología GPS.

1.4.2. PASO 2: INFORMACIÓN DE USUARIOS

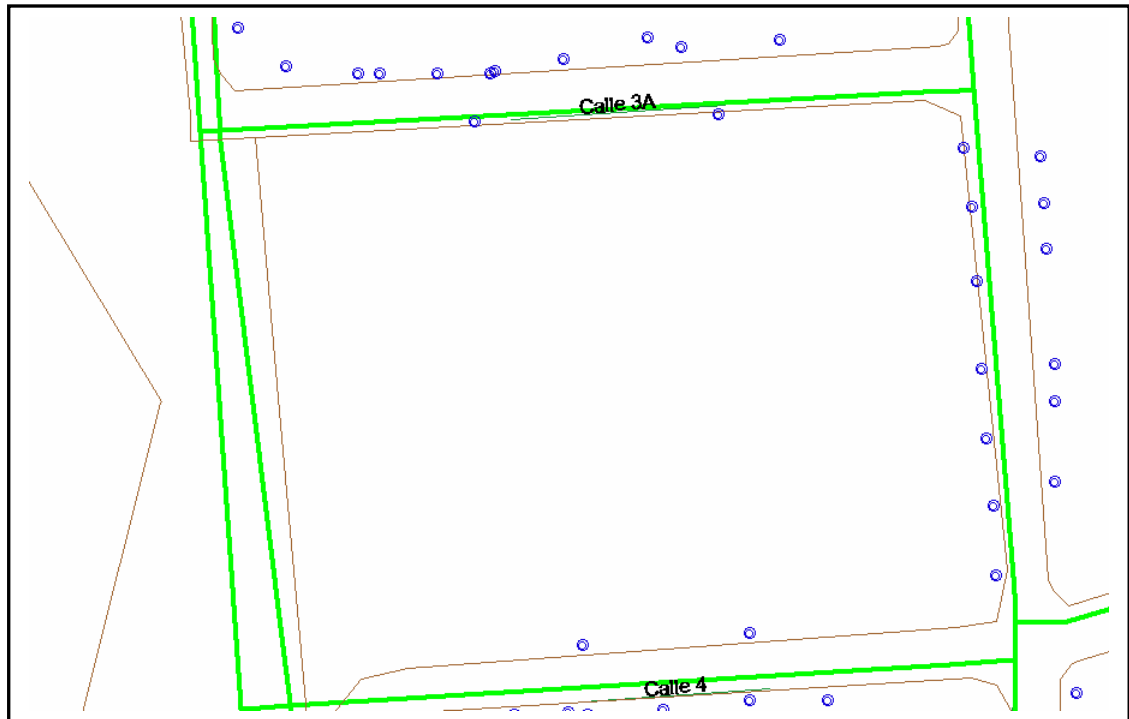
La actividad de recolección de información correspondiente a los usuarios del distrito puede ser efectuada de forma simultánea con la del catastro de redes y urbanismo. Es importante relacionar esta información con su posición geográfica exacta.

En empresas como el **amb**, la división de facturación cuenta con la información de sus usuarios georreferenciados. La Universidad de los Andes y el **amb** cuentan con programas de georeferenciación desarrollados por ellos mismos, este software permite consultar la ubicación geográfica a partir de una dirección estandarizada, y localizar nuevos usuarios a partir de su dirección predial única. En caso de no contar con registros georreferenciados es necesario realizar un censo y asignar a cada usuario su localización en un sistema de información geográfica; este proceso puede realizarse en base a coordenadas calculadas con GPS, o en su defecto manualmente a partir del urbanismo actualizado.

Cada usuario debe tener asignado un código único de facturación, registro histórico de consumo, dirección predial, uso, estrato socioeconómico, y toda aquella información que permita caracterizarlo como consumidor. El producto de esta etapa corresponde a un registro de usuarios georreferenciados con un registro de consumo asignado.

Es recomendable verificar que la totalidad de los usuarios estén incluidos en el registro, esto se puede comprobar por medio del número de usuarios totales, la suma de los caudales promedios o con herramientas gráficas. La superposición de planos cartográficos, catastro de redes, o fotografías satelitales son de gran utilidad en esta labor.

Figura 3. Posible Registro de Usuarios Incompleto



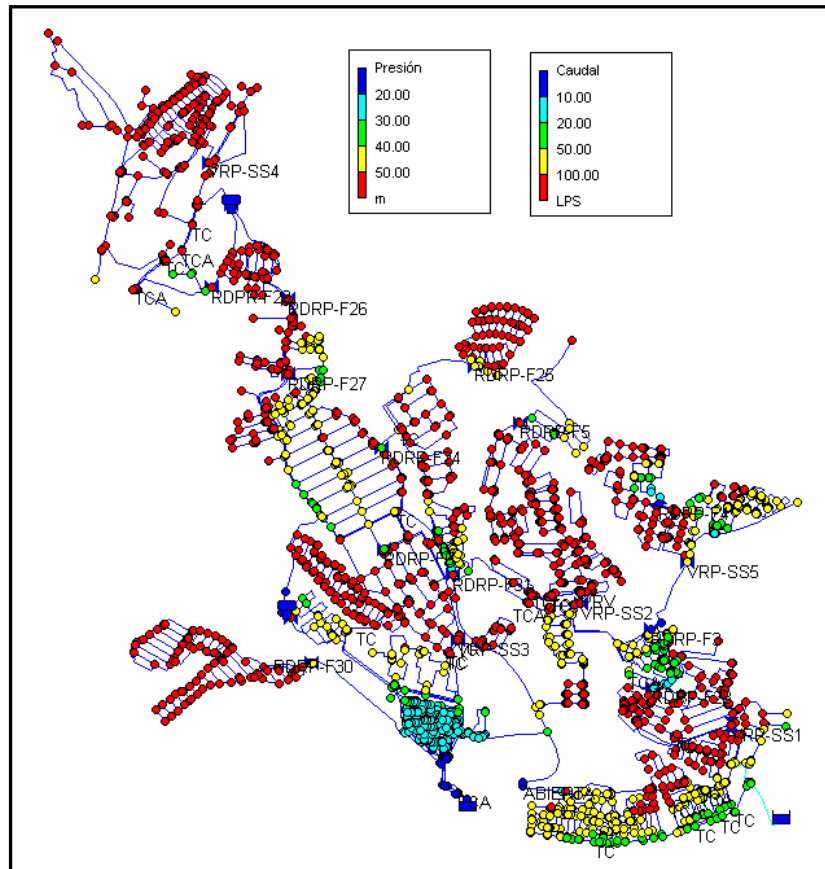
Fuente: SIG amb

1.4.3. PASO 3: MODELO HIDRÁULICO PRELIMINAR

La generación del modelo hidráulico preliminar es el producto de la integración de los pasos anteriores. Este modelo consiste de un archivo generado en un programa de simulación hidráulica, que contiene el sector de estudio con toda la información que lo caracteriza hidráulicamente sin validar su fidelidad con las mediciones en campo. Al culminar esta fase del proceso el modelo deberá contar con:

- Catastro de redes actual, que incluye tuberías, nodos, accesorios y válvulas; referenciadas geográficamente (Coordenadas X, Y y Z).
- Caudal de demanda georreferenciado para cada usuario y asignado a un nodo de la red.
- Caracterización de la variación de consumo diario por uso o generalizado.

Figura 4. Modelo Preliminar Subsectores al Norte del Distrito Estadio



Fuente: Modelo en EPANET amb.

En el desarrollo de esta etapa se debe definir el esquema de macromedición a emplear en el distrito, por ello es necesario plantear una sectorización hidráulica preliminar.

A partir del modelo preliminar se obtiene una aproximación del funcionamiento hidráulico del distrito; aunque, debido a que no ha sido validado, es posible obtener nodos con presiones negativas y valores de flujo no coherentes. Por medio de este modelo es posible estimar la localización de zonas con presiones potencialmente altas y bajas, a su vez se identifican las falencias de la información del catastro de redes, urbanismo y registros de consumo, y deben realizarse todas las correcciones pertinentes.

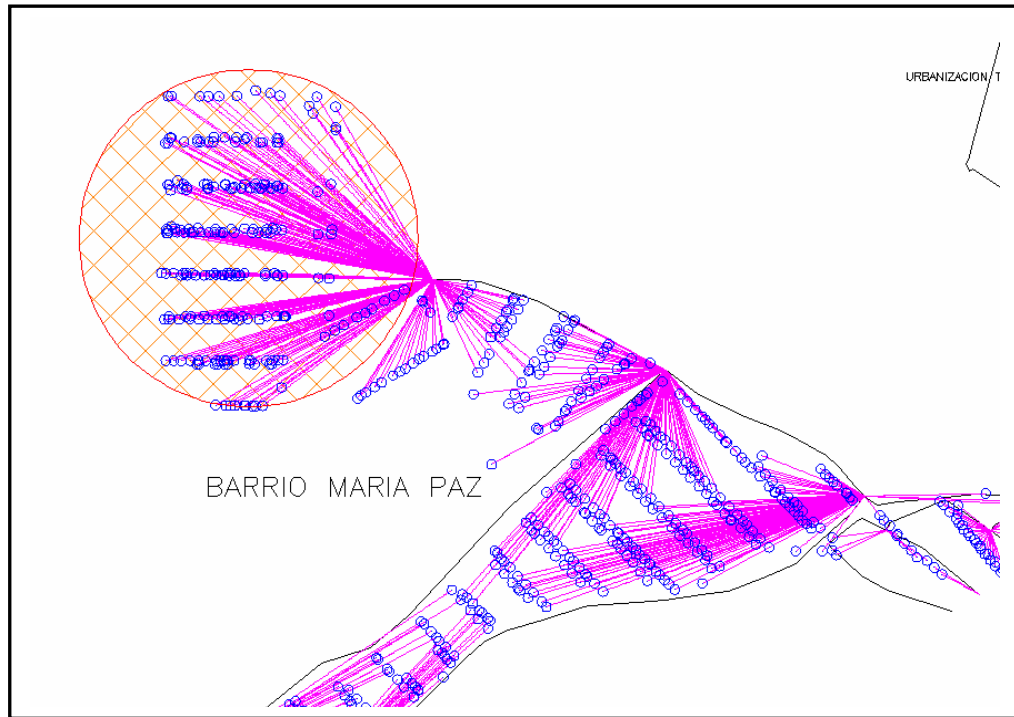
DEFINICIÓN DE LA DEMANDA La demanda asignada a cada nodo de la red se obtiene al relacionar la posición del consumo de cada usuario con el nodo más cercano de la red local de distribución (generalmente diámetros inferiores a seis pulgadas).

Para redes pequeñas es posible realizar esta asignación de modo manual, de lo contrario es necesario desarrollar rutinas que determinen el nodo más cercano a cada usuario y nodo de la red, haciendo uso de las coordenadas de los mismos. La posibilidad de trabajar sobre el archivo *.inp generado por EPANET facilita la modificación de las demandas asignadas a cada nodo.

El uso del programa ASIGNA desarrollado por la Universidad de los Andes permite realizar esta asignación de forma automática; el programa requiere como datos de entrada los identificadores ID de cada nodo y tramo de tubería con sus coordenadas, nodos final e inicial respectivamente. Adicionalmente, este relaciona el usuario con el nodo al cual fue asignado de forma gráfica, esta vinculación gráfica es denominada Plano Estrella y permite identificar sectores con su catastro de redes incompleto y sectores con redes y usuarios no incluidos en el registro.

Al evaluar el registro de lecturas para facturación se encuentra un cierto porcentaje de registros no válidos, que resultan en consumos calculados negativos, ceros o lecturas no tomadas. El **amb** aplica un proceso de crítica con el fin de asignar consumos aproximados a aquellas lecturas no válidas y generar una facturación adecuada.

Figura 5. Catastro de Redes Incompleto según Plano Estrella



Fuente: Sector Plano Estrella Distrito Estadio amb.

En el montaje del modelo se toman las lecturas crudas y se les aplica un depurado en base a su consumo histórico, esto proceso implica dos factores: de rechazo y de modificación. El primero indica en qué grado debe estar desfasado el consumo tomado versus el registro histórico para que sea rechazado; se ha determinado que un factor de tres ofrece una aproximación válida sin rechazar muchos datos leídos. Esto quiere decir que un usuario cuyo registro histórico sea de 20 m^3 por mes, podrá tener un máximo de 60 m^3 como consumo válido. El segundo factor indica la modificación que se aplica al consumo histórico para considerarlo como actual, se considera adecuado un factor de uno. Debido a la naturaleza de deterioro gradual de los medidores es posible considerar factores de modificación mayores que uno.

Aquellos usuarios con lecturas no validas y que no cuenten con un registro histórico como base de comparación tienen un consumo asignado equivalente al promedio del estrato.

CURVAS DE MODULACIÓN DEL CONSUMO

Para obtener una simulación en tiempo extendido es necesario caracterizar el patrón de consumo por medio de una curva de modulación. Esta tarea consiste en asignar factores multiplicadores del consumo medio calculado para distintas horas del día. Tradicionalmente se ha usado el criterio de los factores K de mayoración del consumo planteados por la norma RAS, pero al contar con registros macromedidos de caudal de salida de los tanques es posible obtener una modulación minuto a minuto de cada distrito medido.

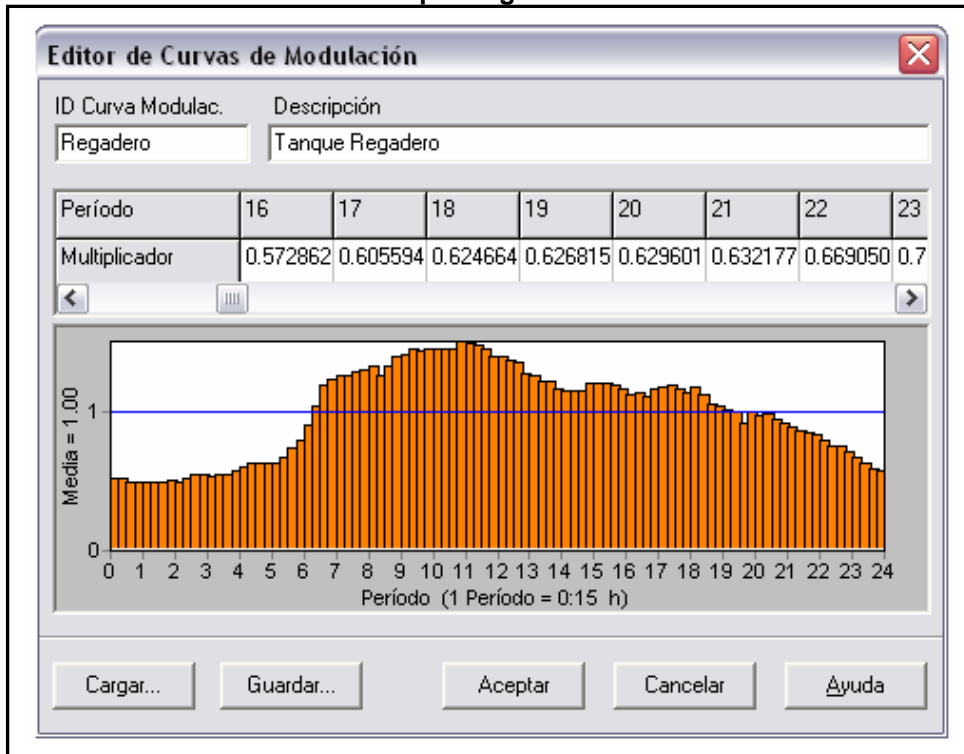
El programa EPANET permite asignar distintas curvas de modulación a distintos tipos de usuarios dependiendo del uso, estrato, tanque asociado, zonas con uso predominante de hidroneumáticos, o cualquier característica que resulte en una modificación del patrón. La figura 6 muestra una curva de modulación típica con factores calculados para intervalos de 15 minutos.

Si no se cuenta con una curva de modulación característica es posible adaptar una que corresponda a un sector similar o simplemente asignar los factores K de la norma RAS.

Con el fin de definir el comportamiento característico diario de consumo para todos los días de la semana, se recolectaron los datos de caudal de salida de los tanques de interés. El **amb** cuenta con un registro histórico generado a partir del Sistema SCADA de los tanques de la red.

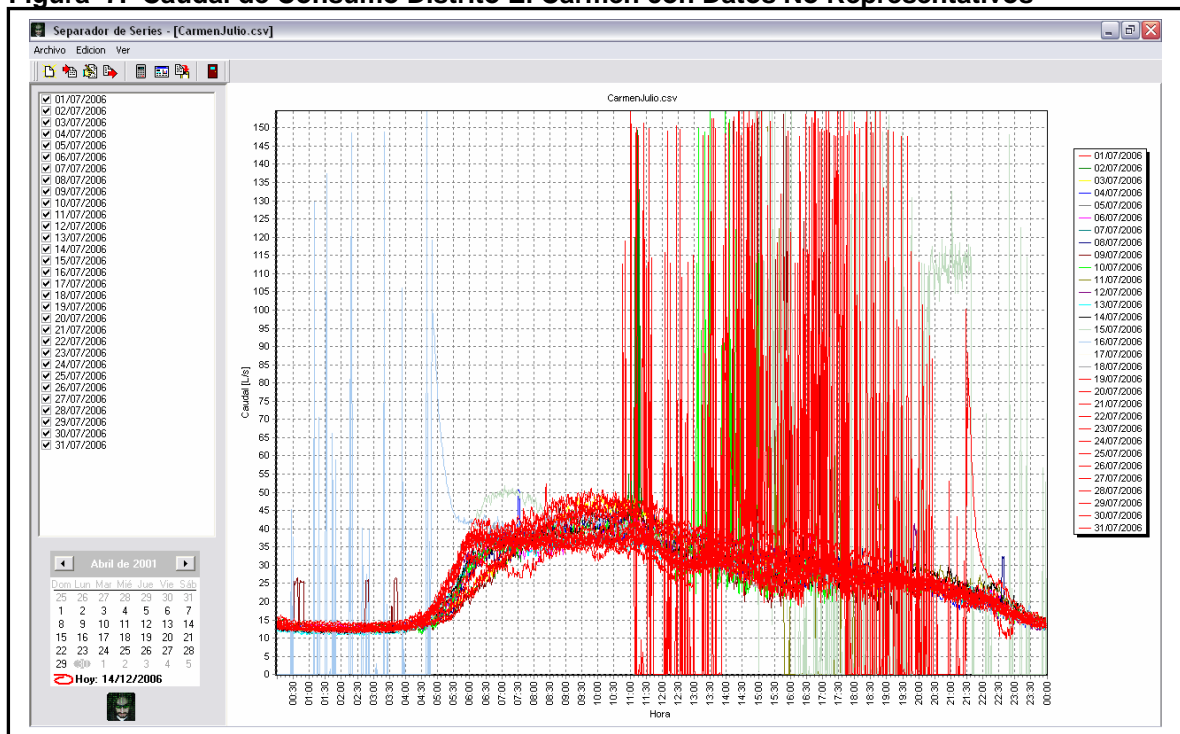
Debido a que la información disponible presenta períodos de comportamiento irregular causado por alteraciones en la demanda, generados entre otros por el cierre y reapertura de válvulas para reparación y renovación de redes o la alimentación de un tanque dependiente; es necesario realizar un depurado manual de los datos existentes.

Figura 6. Curva de Modulación Tanque Regadero



Fuente: Modelo de Subsectores Norte en EPANET amb.

Figura 7. Caudal de Consumo Distrito El Carmen con Datos No Representativos



Fuente: Datos SCADA, visualización SEPARADOR Uniandes.

Los datos empleados en la obtención de curvas de modulación corresponden a las últimas 4 a 24 semanas del registro, esto con el fin de obtener un patrón de consumo actual del sistema que incluya los efectos locales del periodo de estudio y que coincida con las mediciones a realizar en campo. Factores que pueden estar modificando actualmente el modo de consumo son: efectos climáticos producidos por el Fenómeno del Niño, cambios de horario de oficina tras la aplicación del Pico y Placa, la aparición de nuevas fuentes de consumo, entre otros. El hecho de emplear datos recientes en lugar del registro histórico completo implica que la validez de la información es temporal y que esta tendrá que ser reevaluada y actualizada periódicamente.

Estos mismos datos depurados son empleados como referencia para la calibración de la red a la cual alimenta. Debe garantizarse simultaneidad entre la recolección de los datos a partir de los cuales se genera la curva de modulación y las mediciones de campo usadas en el proceso de calibración. También debe existir simultaneidad entre los periodos de facturación usados para estimar el consumo micro y el periodo de análisis macro.

El caudal medio calculado a partir de la serie promedio diaria puede ser utilizado para determinar el caudal medio diario de consumo característico del distrito el cual, al compararse con el total facturado, indica el índice de agua no contabilizada IANC del sector.

El proceso para la determinación de las curvas de modulación comprende:

- Descarga de los datos durante el periodo de análisis con fecha-hora y la serie de datos de interés, adaptándolos al formato preestablecido.
- Identificación y eliminación de series con datos no representativos.
- Creación de una tabla con fecha y hora para los datos seleccionados cada minuto.

- Para cada minuto se determina la media, varianza y límites de confianza (El **amb** adoptó un intervalo con 2 desviaciones para una confiabilidad del 95% en una Distribución Normal) (Uniandes, 2006).
- Se discriminan las series de todos los días, días ordinarios y fines de semana.
- Eliminación de los datos identificados por fuera de las bandas establecidas.
- Determinación de las nuevas medias, varianzas y límites de confianza. Se establece la serie promedio diaria.

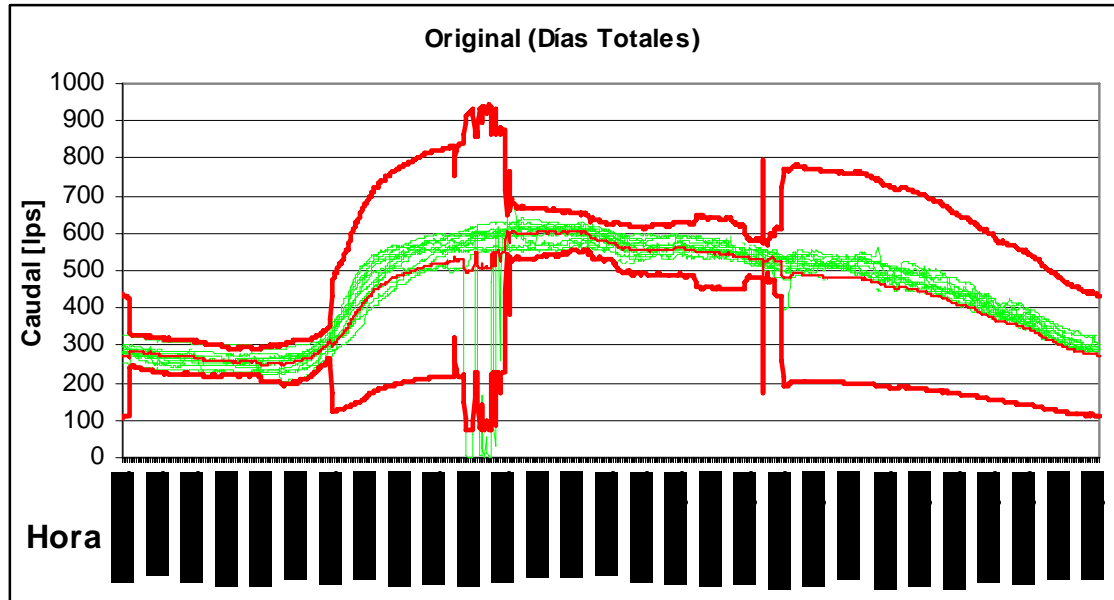
Con el fin de no afectar la validez de los datos recolectados se debe tener en cuenta las siguientes observaciones (Uniandes, 2006):

- El proceso de depurado se realiza dos veces como máximo con el fin de no afectar la validez estadística de los datos.
- Para garantizar la Distribución Normal de los datos, deben procesarse series con al menos 25 registros diarios válidos.
- Los datos de presión o caudal con los cuales se calibra la red provienen de la serie promedio resultante de este análisis estadístico, es decir que en campo pueden registrarse datos por fuera de estos intervalos.
- Es recomendable conservar las series de las bandas con el fin de calibrar el modelo dentro de un intervalo.

La **Figura 8** y **Figura 9** muestran el efecto que tiene la eliminación de datos no representativos en la amplitud de las bandas de confianza y el comportamiento de la serie promedio.

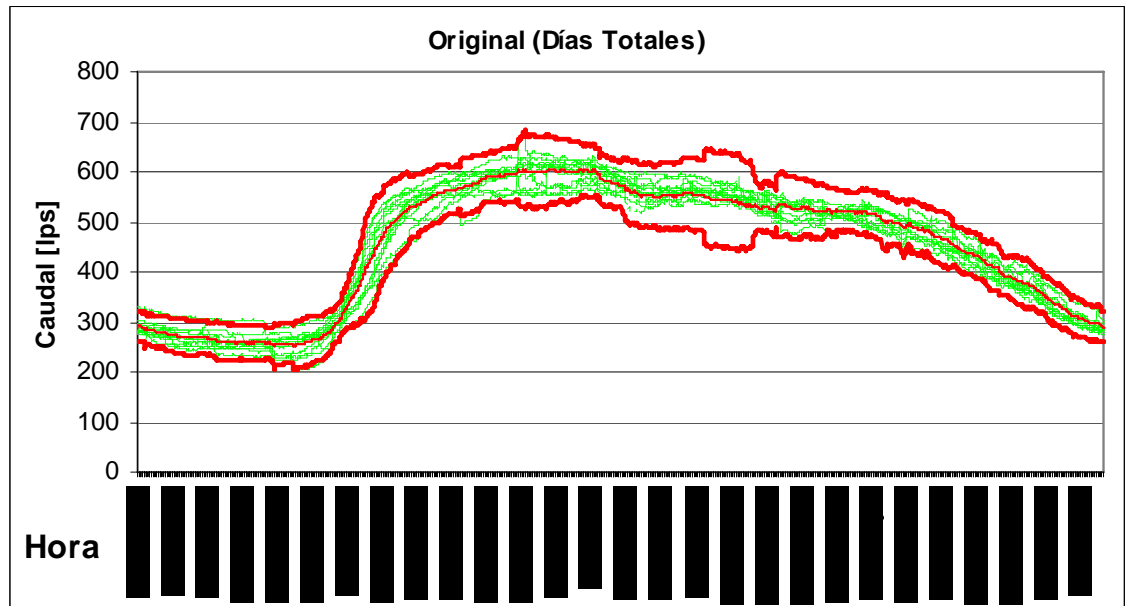
Fue necesario obtener las series promedio de comportamiento del Tanque Estadio, caudalímetro de San Francisco, caudalímetro de bombeo El Carmen-La Cumbre, nivel del tanque La Cumbre, salida tanque San Juan y Girón Mayor.

Figura 8. Caudal de Salida Tanque Estadio con Filtrado Manual



Fuente: Base de Datos SCADA amb.

Figura 9. Caudal de Salida Tanque Estadio Filtrado No. 2 con Bandas



Fuente: Base de Datos SCADA amb.

MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES Para poder generar el modelo digital de terreno es necesario procesar la información cartográfica disponible. El **amb** cuenta con el Plano Aerofotogramétrico Digital de Bucaramanga generado por la empresa Fotogrametría Analítica Limitada FAL Ltda.

Las planchas FAL corresponden a una proyección cartesiana con origen en el vértice geodésico denominado “Girón” al que se le asignaron sus coordenadas Gauss, con origen en el Observatorio Astronómico de Bogotá y disminuidas en N 1.200.00 y E 1.000.000, o sea N 76,643.50 m y E 97.236,74 m.

Las distancias se encuentran reducidas al horizonte 931 m de altitud sobre el nivel del mar. Las cotas de los puntos de control utilizadas para la restitución fotogramétrica están referidas al nivel medio del mar por medio de curvas de nivel cada 2 metros.

El proceso de filtrado, unificación y generación de superficie comprende:

- Filtrado manual de layers correspondientes a las curvas de nivel.
- Generación de segmentos no incluidos en las planchas.
- Acople del conjunto de planchas en un solo archivo
- Herramientas de AutocadMap para crear y corregir la topología:

Eliminar pseudo nodos

Extender líneas cortas

Eliminar elementos cortos

Eliminar elementos duplicados

Transforma líneas y arcos a polylíneas

Transforma segmentos consecutivos de líneas y polylíneas a una polylínea

Detectar errores de topología (Es recomendable verificar la topología como red y como polígono)

- Corrección manual de errores detectados
- Herramientas Autodesk Land Desktop para modelar en 3D:

Asignación de elevaciones a curvas de nivel

Verificación de cotas mediante perfiles y vistas 3D

Definición de límites de superficie

Definición de altura máxima y mínima de extrapolación

Definición de quiebres topográficos y cuencas (si aplica)

Definición de Weeding Factors (Creación y eliminación de vértices por longitud y deflexión límite)

Visualización de la superficie por medio de mallas rectangulares o triangulación

Visualización tipo Render

- Las ruta para los comandos de las aplicaciones de Autodesk son:

Map / Tools / Drawing Cleanup

Map / Topology / Create

Terrain / Terrain Model Explorer / Create Surface

Terrain / Terrain Model Explorer / Build Surface

Terrain / Surface Display / Settings

Terrain / Surface Display / 3D faces

View / Render / Render

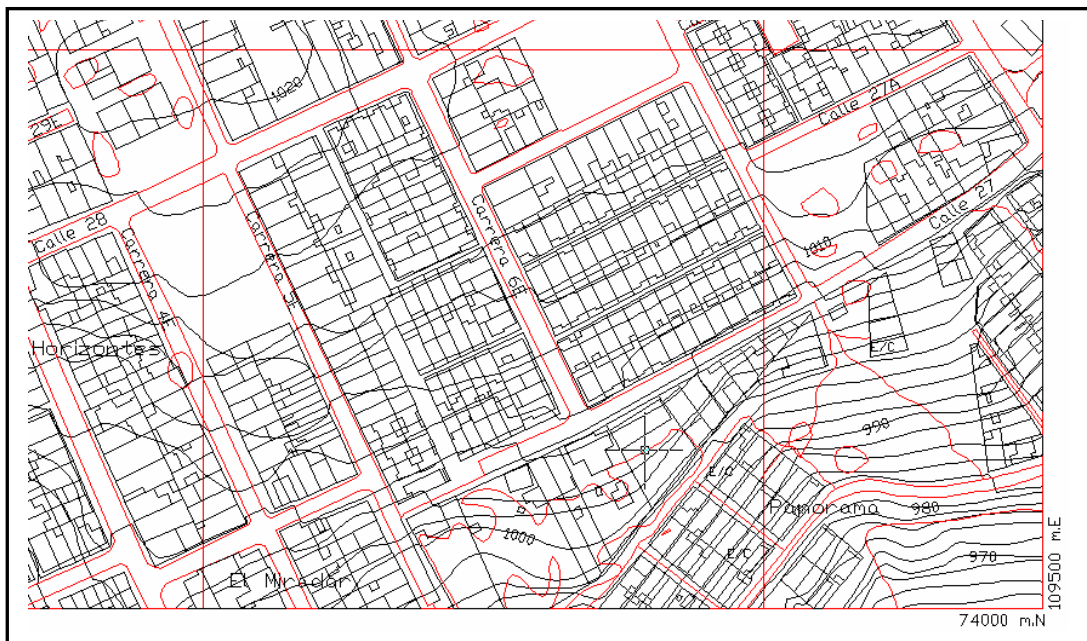
Es necesario aclarar que la superficie está construída una vez se han asignado las curvas de nivel y la polylínea límite, aunque esta no haya sido visualizada.

Las superficies visualizadas mediante el software Autodesk Land pueden ser de tres tipos: Quick View, 3D Faces o Polyface Mesh. El comando empleado para la visualización de las superficies de Girón y La Cumbre fue Polyface Mesh que crea una malla triangular en tercera dimensión, compuesta por caras 3D que se comportan como una sola unidad. Ver

Figura 12 y Figura 13.

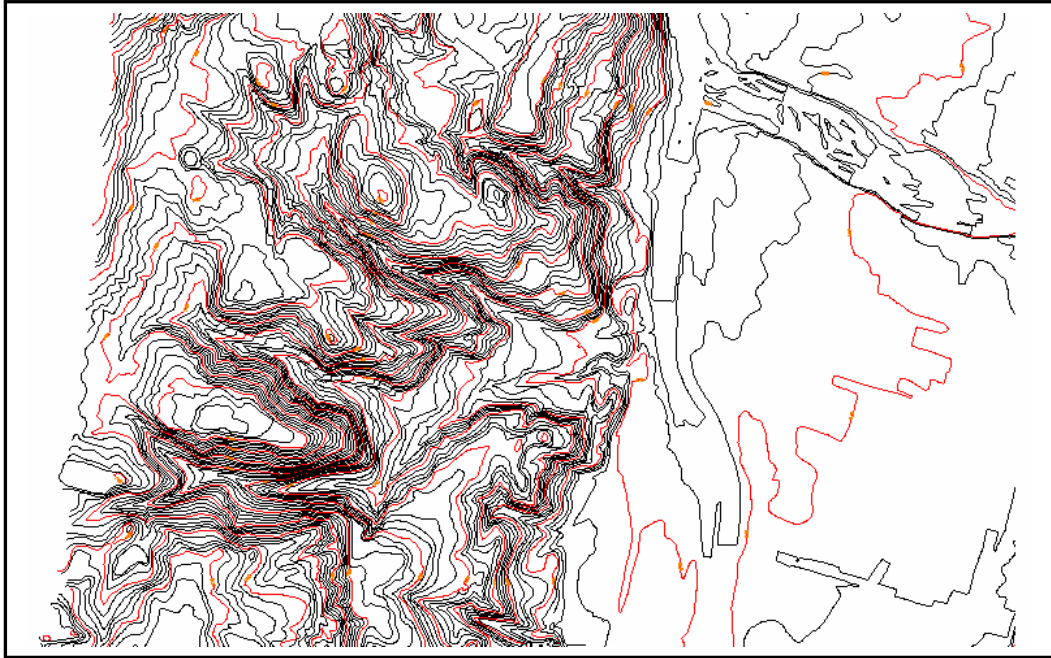
Aunque no se visualice la capa generada por triangulación o la vista en Render, el proyecto de Autodesk contiene la información de la superficie en la carpeta DTM correspondiente, generada por el programa en la carpeta del proyecto.

Figura 10. Cartografía Sector Barrio La Cumbre



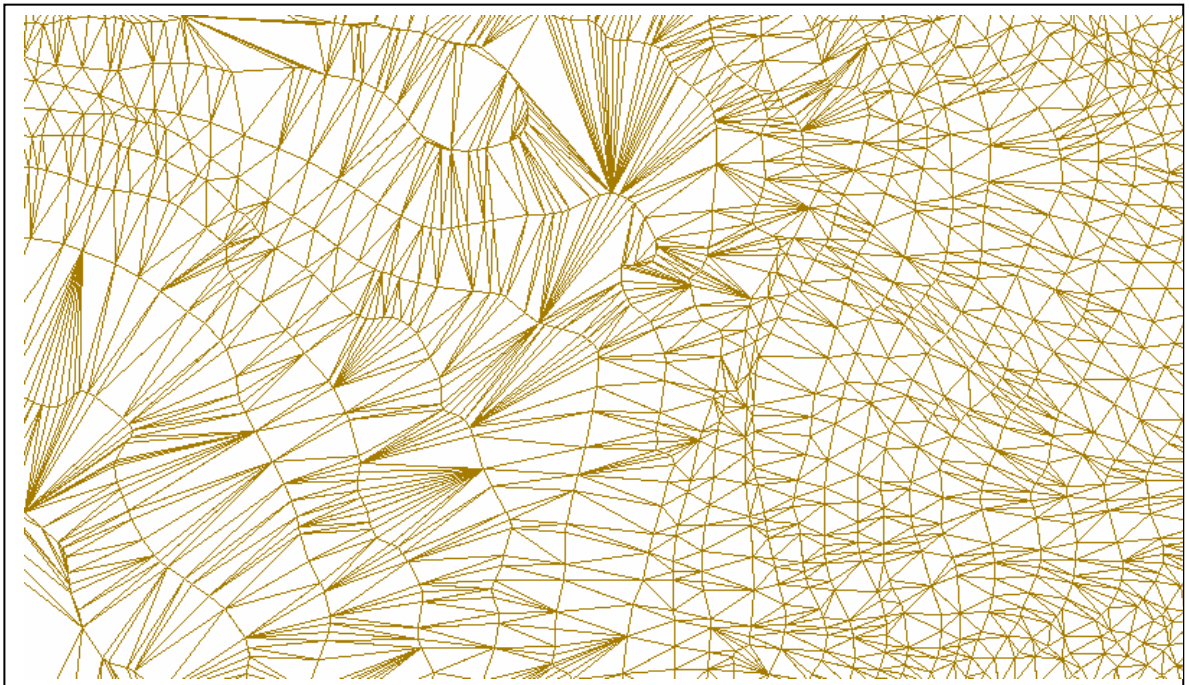
Fuente: Planchas FAL amb. El autor.

Figura 11. Topografía Sector Barrio La Cumbre



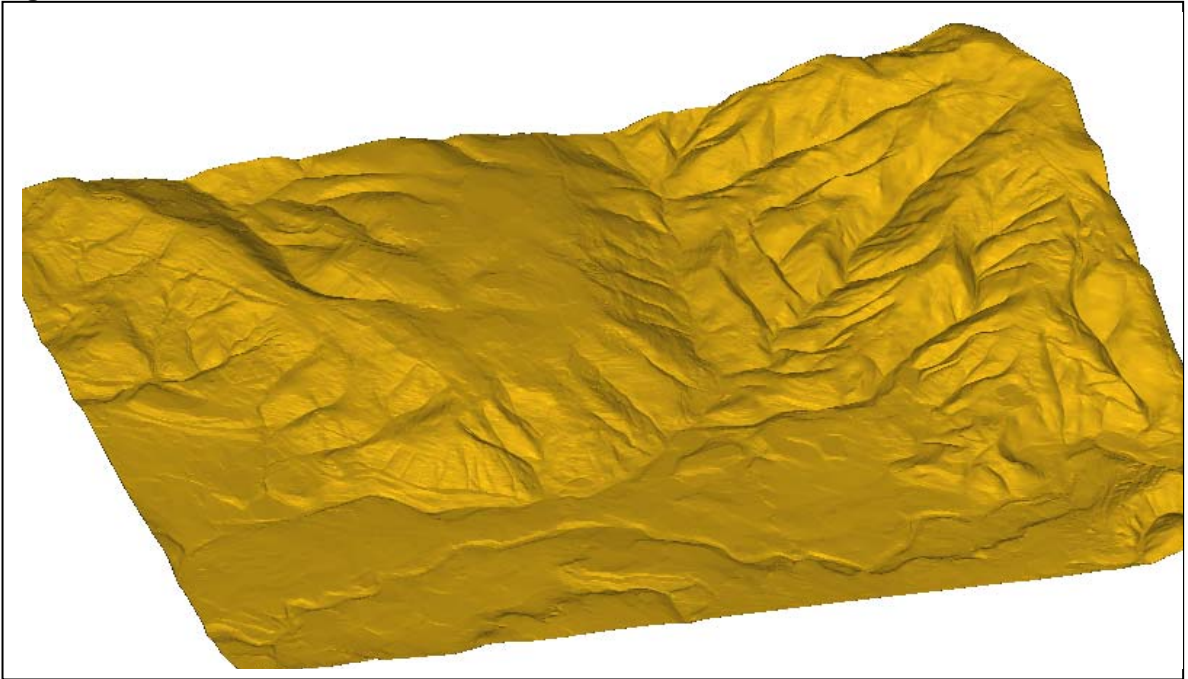
Fuente: Filtrado Planchas FAL amb. El autor.

Figura 12. Superficie en Malla Triangular Sector Barrio La Cumbre. Vista 2D.



Fuente: Autodesk Land 2005. El autor.

Figura 13. Visualización Render de la Meseta de La Cumbre



Fuente: Autodesk Land 2005. El autor.

MONTAJE DEL MODELO HIDRÁULICO

El montaje del modelo hidráulico en el software EPANET empleando la interfaz gráfica del programa es un procedimiento sencillo y es posible aplicarlo al simular redes de distribución de dimensiones medianas. Sin embargo, el trazado de la red de un distrito completo resulta bastante extenso y es posible generar errores durante el proceso. Hay que tener en cuenta que el montaje no requiere únicamente el trazado de la red, es necesario incluir cada una de las características de los tramos que la conforman.

Las herramientas como el mapa de fondo ofrecidas por EPANET pueden ser empleadas para cargar una imagen satelital o un registro de planos digital como base para realizar el trazado de la red. Sin embargo, estas imágenes deben ser escaladas de acuerdo a la ventana de visualización del software y la asignación

de propiedades sigue siendo un procedimiento manual y repetitivo. La ruta para acceder a esta opción desde el menú de EPANET es:

Ver / Mapa de Fondo / Cargar

Esta opción soporta imágenes de tipo *bmp, *emf, y *wmf, siendo estas ultimas las más recomendables por conservar su resolución original.

Figura 14. Fragmento de Archivo Tipo *.inp

[PIPES]									
;ID	Nudo1	Nudo2	Longitud	Diametro	Rugosidad	Perd Men	Estado		
8152	6838	6957	8.744	54.5436	0.000285	0.087	Open	;	
8151	6957	6770	83.546	54.5436	0.000285	0.835	Open	;	
8150	6952	731	3.536	80.4100	0.0003	0.035	Open	;	
8149	6770	6924	45.378	103.4300	0.0003	0.454	Open	;	
8148	1070	3300	132.985	54.5436	0.000285	1.33	Open	;	
8147	3274	6956	32.904	54.5436	0.000285	0.329	Open	;	
8146	6956	6955	3.184	54.5436	0.000285	0.032	Open	;	
8145	6955	6908	8.341	54.5436	0.000285	0.083	Open	;	
8144	3263	3265	30.949	80.3564	0.000285	0.309	Open	;	
8143	6760	3322	2.175	54.5436	0.000285	0.022	Open	;	
8142	6903	3328	42.114	37.9747	0.000285	0.421	Open	;	
8141	244	3394	81.438	54.5436	0.000285	0.814	Open	;	
8140	244	3294	5.437	54.5436	0.000285	0.054	Open	;	
8139	6908	3267	90.888	80.3564	0.000285	0.909	Open	;	
8138	3295	3296	3.451	80.3564	0.000285	0.035	Open	;	

Fuente: Modelo EPANET Distrito Estadio amb.

El empleo del archivo *.inp representa una gran ventaja, pues al tratarse de un archivo plano este es fácilmente modificable desde cualquier procesador de texto u hoja de calculo. Este archivo permite trabajar el modelo como un conjunto de bases de datos agrupadas en un archivo plano con extensión *.inp que puede ser cargado en EPANET por medio de la ruta:

Archivo / Importar / Red

También cabe la posibilidad de generar el archivo *.inp a partir de la información registrada en un proyecto tipo SIG. La Universidad de los Andes ha desarrollado una serie de macros que permiten generar y exportar de forma automatizada las bases de datos relacionadas con cada elemento gráfico de un proyecto en Autodesk Land a partir de la nomenclatura estandarizada de layers con que cuenta el **amb**.

Autodesk Land Desktop es un programa basado en AutoCAD y las herramientas de Autodesk Map que permite crear, modificar, analizar y exteriorizar información de proyectos relacionados con el manejo del terreno. Este software puede ampliar sus capacidades por medio de extensiones como Civil 3D. El orígrama permite asignar tablas de características a cada objeto representado en un archivo *.dwg, trabajando como un sistema de información geográfica. El programa almacena las características en tablas individuales denominadas Object Data; por medio de rutinas en Visual Basic es posible consultar estas tablas y exportar la información asociada al objeto a un formato de archivo plano tipo *.inp soportado por EPANET.

El procedimiento necesario para generar el modelo hidráulico en EPANET a partir del catastro de redes registrado en un archivo *.dwg por medio de Autodesk Land comprende los siguientes pasos:

- Montar el archivo *.dwg con el catastro de redes corregido y sin elevaciones en un proyecto de Autodesk Land.
- Modificar la nomenclatura de los layers de modo que en su nombre se indique el diámetro, material y demás características conocidas con un formato estándar. Por ejemplo: TU10-AC-98, que representa todos los tramos de asbesto cemento de 10 pulgadas instalados en el año 1998.

- Llenar la tabla Object Data de cada segmento con características idénticas. Este proceso puede ser programado en una rutina VBA, al **amb** cuenta con el programa Pipe_Data.dvb desarrollado por el CIACUA de la Universidad de los Andes. La rutina reconoce el nombre de los layers estandarizados y por medio de un contador asigna un identificador al tubo, desglosa el nombre de la capa y llena los campos de diámetro, material y longitud.

- Es necesario verificar que los nodos compartidos por varias tuberías tengan un mismo identificador para todos los tramos. Esta tarea también puede ser realizada por una rutina VBA, el **amb** usa el programa Selec.tubos.dvb que se encarga de crear los nodos de la red e ingresarlos al Object Data de las tuberías, asignando un ID único a cada nodo.

- Una vez creados y numerados los nodos como puntos civiles (con ID, altura y nomenclatura) se dividen en puntos de tanques y puntos de nodos. Contando con los grupos de puntos definidos y la superficie cargada desde el menú Terrain (procedimiento explicado anteriormente) se hace el cruce de la superficie con la capa de puntos para así asignar la elevación a cada nodo de la red.

- Las tuberías con sus características asignadas deben quedar incluidas en una sola capa, eliminando todas las capas originales. Estos tramos ya deben contar con un nodo inicial y final asignado. Luego se exporta la información que caracteriza a cada nodo y tubería a un archivo de texto con el fin de construir el archivo *.inp. El **amb** emplea la macro recorrrtabla.dvb creado por el CIACUA que selecciona uno a uno los elementos asignando en un archivo plano su ID, coordenadas, diámetro y material.

- Se incluye en el archivo *.inp la demanda para cada nodo, calculada previamente como la suma del consumo de todos los usuarios próximos. Es necesario también dar las propiedades al tanque del distrito pues este es exportado como un nodo más de la red.
- El modelo queda generado al importar el archivo *.inp en EPANET siguiendo la ruta Archivo / Importar / Red. Es necesario realizar una verificación general de conectividad por medio de la modelación de calidad del agua simulando emisores contaminantes en nodos del distrito. Cualquier modificación gráfica que se realice al modelo queda incluida en un nuevo archivo *.inp exportable desde la ruta Archivo / Exportar / Red.

1.4.4. PASO 4: MEDICIONES PRELIMINARES DE CAUDAL Y PRESIÓN

Al contar con un modelo preliminar resulta más eficiente determinar los puntos definitivos de macromedición. El modelo brinda un esquema de funcionamiento aproximado y puede usarse como sujeto de prueba para distintas hipótesis de configuración de la red.

Dado el alto costo que implica la instalación de equipos de macromedición, estos deben ubicarse de forma estratégica, recolectando la mayor cantidad de información con el menor número de puntos. Puede resultar económicamente viable contar con medidores portátiles que pueden ser instalados en distintos puntos de la red una vez cumplida su función.

Es recomendable plantear los puntos de medición de caudal aguas arriba de la red de distribución, con el fin de tener una estimación del porcentaje de agua no contabilizada en el subsector al comparar con el consumo total facturado. Los

puntos de medición de presión deben instalarse tanto aguas arriba como aguas abajo dentro del sector de estudio, con el fin de determinar las pérdidas de energía del sector y contar con una mejor referencia para la calibración del modelo.

Las mediciones de caudal y presión deben ser recolectadas durante por lo menos un mes y deben coincidir con uno de los períodos de facturación de la empresa (Uniandes, 2006). Esto con el fin de calcular un IANC coherente y de ejecutar el proceso de calibración de forma que el caudal demandado por los usuarios y el caudal de salida medido en los tanques sean simultáneos.

La configuración de medidores de caudal para los distritos San Juan y Girón Mayor permite determinar el consumo generado por la zona industrial y por la zona urbana de forma independiente, permitiendo caracterizar el patrón de consumo y porcentaje de pérdidas propio de cada uso. Es recomendable elaborar un esquema de operación muy general, que muestre de forma gráfica el funcionamiento de la zona de estudio, sus fuentes, conducciones, tuberías matrices, estado de válvulas, etc.

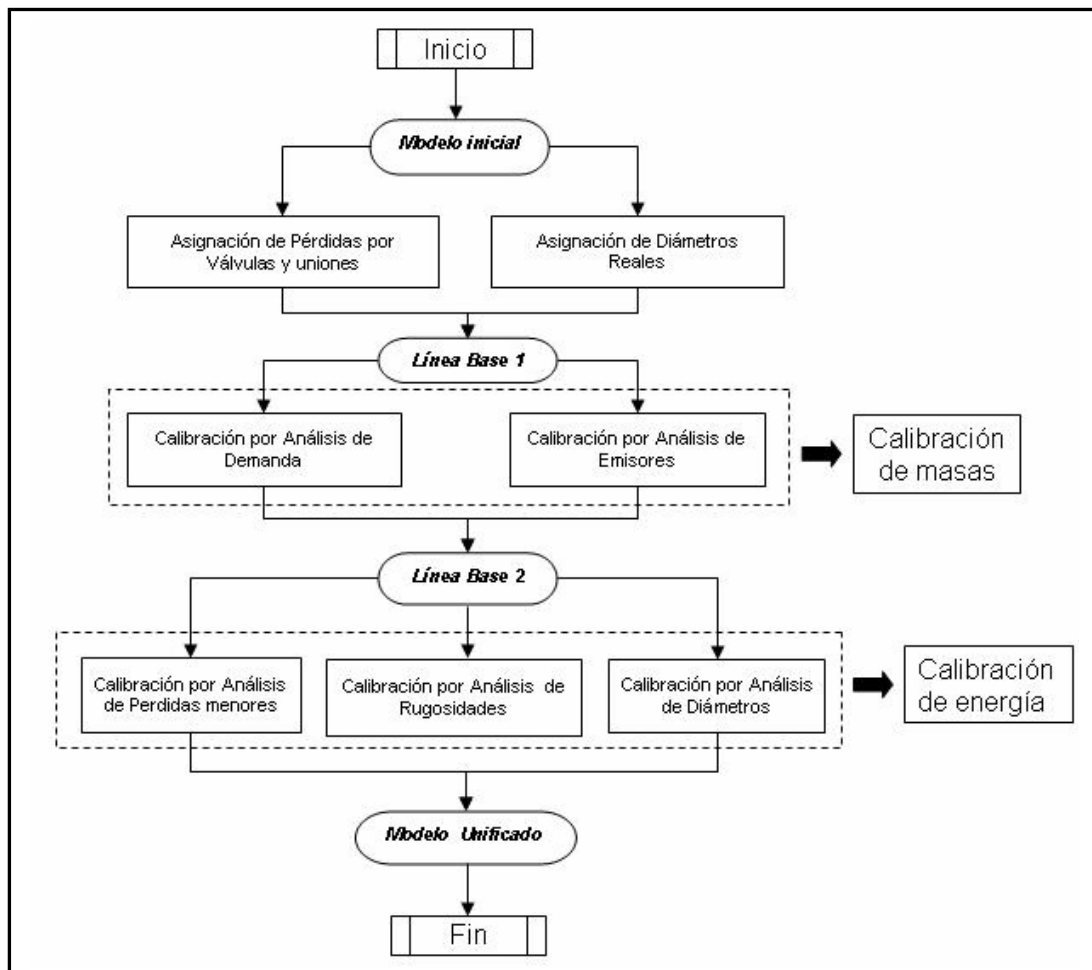
1.4.5. PASO 5: CALIBRACIÓN DEL MODELO PRELIMINAR

El objetivo de tener un modelo calibrado es el de contar con una herramienta que permita verificar las condiciones de servicio en cualquier escenario de operación hidráulica. El modelo preliminar es confrontado con las mediciones de campo con el fin de ajustar sus propiedades hidráulicas, este modelo se valida con mediciones de caudal y presión realizadas bajo un régimen de presión distinto al empleado para su calibración.

Es posible que durante esta etapa se determine necesaria la instalación de nuevos puntos de macromedición, para lo cual resulta útil el uso de las estaciones móviles.

Partiendo del Modelo Hidráulico inicial en EPANET (Red de distribución con elevaciones y consumos asignados a los nodos) se desarrollan tres fases hasta llegar al Modelo Final.

Figura 15. Diagrama de Flujo del Proceso de Calibración



Fuente: Informe de Desarrollo POP Uniandes.

Como un primer ajuste se asigna a cada tramo de tubería el diámetro real que corresponda según el valor nominal y el material. Simultáneamente se asigna una estimación de pérdidas a los tramos con el fin de representar el efecto de válvulas y uniones. Este se incluye mediante el coeficiente adimensional **k** de la ecuación:

$$h_L = k \frac{V^2}{2g}$$

Ecuación 2

En el caso del distrito Estadio se establecieron coeficientes de orden de 0.01 para tuberías de PVC, 0.016 para Polietileno y 0.02 para otros materiales; adicionando 0.2 en aquellos tramos que contienen válvulas, según “Hidráulica de Tuberías” de Juan Saldarriaga. Una vez asignadas estas características se alcanza un modelo más ajustado denominado **Línea Base 1**.

El modelo **Línea Base 2** se genera al ajustar las curvas de masas. Dicho proceso se realiza mediante la introducción de emisores (simulación de una fuga) y el incremento de la demanda base para simular fugas y conexiones clandestinas, respectivamente. Para realizar estos ajustes se utilizan hipótesis basadas en la influencia del estrato socioeconómico, susceptibilidad del suelo a deslizamientos y asentamientos, microzonificación sísmica, la presencia de altas presiones en la red y otros parámetros como el material, la topología y la distinción entre zona rural y urbana aplicados a sub sectores del distrito.

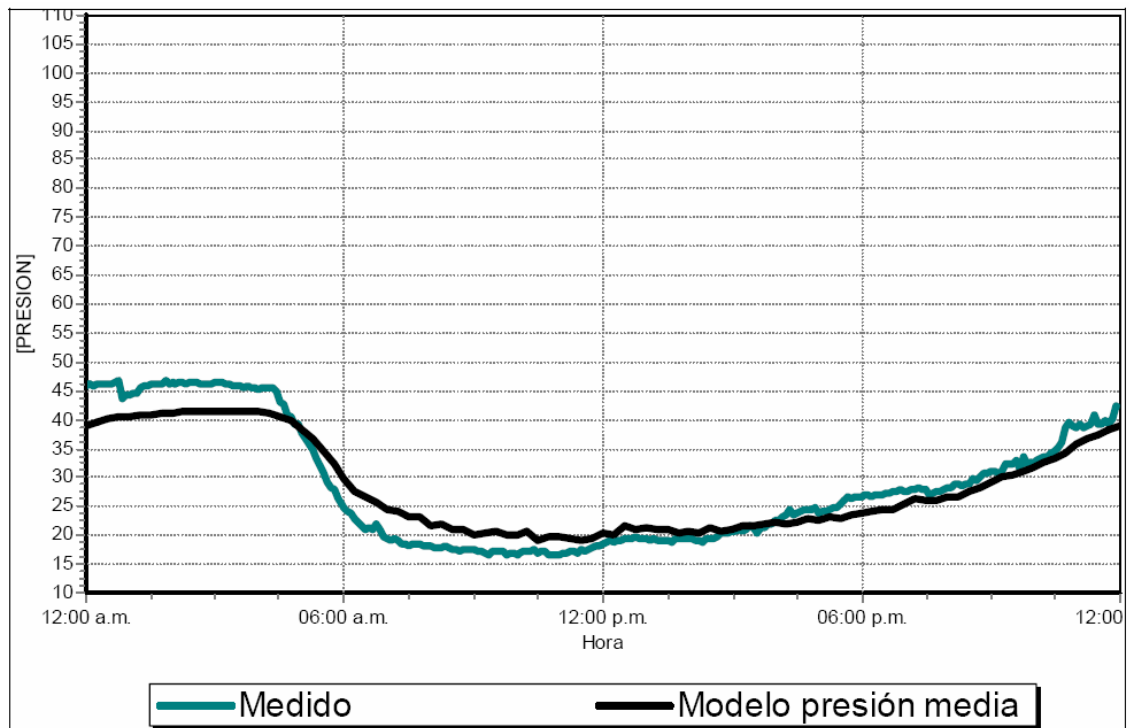
A partir del modelo Línea Base 2 se realiza la construcción del modelo definitivo, al analizar la variación de los coeficientes de pérdidas menores, los diámetros y las rugosidades, de manera independiente. En esta fase se ajusta la curva de energía del modelo, analizando cada parámetro individualmente. Estos cambios tienen una mayor influencia en la topografía de la superficie de presiones que sobre la distribución y magnitud de los caudales; sin embargo, siempre se debe

tener en cuenta que existe una relación entre el caudal de los emisores y la presión en la red.

Se desarrollan 3 modelos hasta Línea Base 2, una para cada uno de los regímenes de presión (alto, medio y bajo). Al unificar los criterios obtenidos en los análisis individuales se construye el **Modelo Unificado**, el cual cuenta con la calibración definitiva.

La Universidad de los Andes ha desarrollado el programa CALIBRA que permite plantear diversas hipótesis de calibración y comparar el ajuste obtenido de forma gráfica. Este programa corre el modelo en EPANET para cada una de las hipótesis una vez estas se han planteado.

Figura 16. Series de Presión Medida y Presión del Modelo



Fuente: Informe Final POP Estadio Uniandes amb.

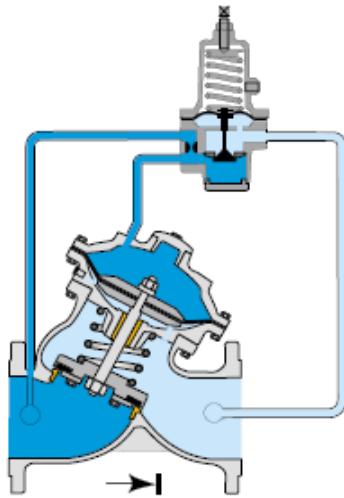
1.4.6. PASO 6: OPERACIONES DE CAMPO

Con el fin de obtener un modelo digital confiable y caracterizar la red de distribución bajo distintos regímenes de presión es necesario establecer tres rangos de trabajo. La Universidad de los Andes recomienda implementar 3 regímenes de presión (alto, medio y bajo) que deben tener una duración mínima de 1.5 meses durante los cuales se mantendrá la presión estable y se realizarán macromediciones continuas y micromediciones de consumo casa 2 semanas.

El régimen de presión alto corresponde a la operación tradicional de la red, durante la cual se montó el modelo inicial, se tomaron las mediciones preliminares y se desarrolló la calibración del modelo. El régimen medio presenta presiones reducidas, las mediciones realizadas sirven como patrón de validación y corrección del modelo calibrado; si el modelo no predice con una precisión aceptable el comportamiento de la red al cambiar el régimen de presión es necesario plantear nuevas hipótesis de calibración. El régimen bajo es el estado final de la red con presiones reducidas al mínimo posible, representa el estado óptimo de operación de la red y las mediciones realizadas sirven como validación del modelo calibrado.

El cambio de régimen de presión se realiza regulando la presión de entrada al distrito, instalando y modificando la operación de las válvulas reductoras o reguladoras instaladas en cada sector hidráulico; el uso del modelo hidráulico calibrado es una herramienta útil para definir las operaciones de campo a implementar.

Figura 17. Esquema de Funcionamiento de Válvula Reguladora Tipo.



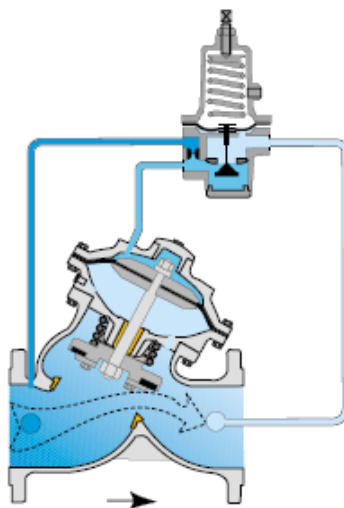
Posición cerrada

La válvula piloto ajustable cerrada atrapa la presión de la línea en la cámara superior de control. La mayor fuerza resultante lleva a la válvula a la posición de totalmente cerrada y proporciona un cierre hermético a prueba de goteo.



Posición de modulación

La válvula piloto percibe las variaciones de presión en la línea y se abre o se cierra según corresponda. Controla la presión acumulada en la cámara superior de control, lo que hace que la válvula principal module a una posición intermedia y mantenga la presión en el valor predefinido.



Posición abierta

La válvula piloto abierta libera la presión de la línea desde la cámara superior de control. La acción de la presión de la línea sobre la cámara inferior y el disco de cierre lleva a la válvula a la posición abierta.

Fuente: Catálogo BERMAD Válvulas de Control Hidráulico.

Debido a que se cuenta con el modelo hidráulico digital se pueden plantear una gran cantidad de hipótesis de funcionamiento de la red (refuerzos, reposiciones, sectorización, válvulas reductoras y de regulación); las modificaciones en su operación y la posible incertidumbre presentada en las predicciones calculadas pueden llevar a plantear el reposicionamiento de los macromedidores instalados, así como la instalación de nuevos puntos de control y registro.

- **SECTORIZACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN** El proceso de sectorización comprende dos etapas bien definidas: una primera etapa de oficina básicamente de planeamiento, seguida de una etapa en terreno en la cual se desarrolla el trabajo programado de obras civiles y materialización completa de la sectorización.

Las actividades de oficina se concentran en el conocimiento de la zona de estudio y en la aplicación de la información disponible. Se definen las diferentes entidades de sectorización que en orden jerárquico son: sector, subsector, distrito y subdistrito. Los primeros constituyen zonas extensas de servicios cuyos límites obedecen la disposición general de la malla, los segundos corresponden a zonas de trabajo con límites normalmente abiertos. El subdistrito constituye la unidad básica de sectorización y puede ser completamente aislado con el cierre simultáneo de las válvulas límite.

Los criterios considerados en la definición de una sectorización óptima son (Jiménez, 2003):

- La disposición de la malla hidráulica en general.
- El límite de cada sector debe elegirse de tal manera que seccione la menor cantidad posible de tuberías de la red.

- Los límites deben en lo posible conformar áreas de forma regular con trazos rectos para facilitar la identificación de los usuarios.
- Debe evitarse el cierre de válvulas en tuberías de diámetros superiores al mínimo definido para la red matriz.
- Adecuar los límites a los accidentes geográficos tales como ríos y cambios topográficos importantes evitando el cruce de tuberías.
- Adecuar los límites a las construcciones y obras importantes como canales, líneas férreas, avenidas, etc. evitando el cruce de tuberías.

- Cuando se trace un límite por áreas no urbanizadas, este se debe ajustar a accidentes geográficos que orientarán en el futuro la distribución urbanística.
- Limitar el número de tuberías de suministro, dejando aquellas con diámetros suficientes para entregar el caudal requerido por cada entidad, sin desmejorar las condiciones de servicio que prevalecían antes de la suspensión de las alimentaciones menores.
- Los sectores deben considerar y en lo posible armonizar con los límites entre estratos socioeconómicos.
- Los sectores no deben dividir manzanas con líneas imaginarias o irreales de difícil materialización.
- Tener en cuenta la disposición de cuencas o subcuencas hidrográficas de drenaje.

Las actividades de campo, orientadas por el estudio previo, requieren inicialmente una verificación de la topología de la red. Los detalles de las esquinas son de vital importancia, debe definirse la configuración detallada de todos los accesorios y aclarar los empates y el alineamiento real de la red.

Esencialmente, las obras civiles desarrolladas son la ubicación e instalación de nuevas válvulas con el fin de lograr el aislamiento de los sectores definidos. Puede ser necesario renovar válvulas defectuosas o inoperables, así como la instalación de tapones o empates para adaptar la red a las condiciones planteadas en oficina. También es necesario instalar elementos de seguridad para la protección de los elementos montados.

• **PUNTOS DE AFORO Y MEDICIÓN DE PRESIONES**

Con el fin de calibrar los modelos de simulación hidráulica y a partir de estos controlar la prestación del servicio, es necesario conocer la distribución de caudal y las características del plano de presiones de la red. En esta etapa es necesario establecer un cronograma detallado de las micromediciones a realizar y determinar las fechas y medidas a implementar para modificar el régimen de presión de la red.

El número de instalaciones de macromedición depende del esquema hidráulico de la red de distribución. La ubicación de las macromedidores puede hacerse preferiblemente en derivaciones de la red matriz, o bien sobre tuberías matrices, en cuyo caso es necesario verificar las velocidades mínimas de trabajo y valorar las desviaciones que por esta causa pudieran ocasionarse en la medición.

El punto de medición debe cumplir con lo siguiente (Jiménez, 2003):

- La longitud recta aguas arriba y aguas abajo debe cumplir con las especificaciones definidas por los fabricantes de los equipos de medición.

- La velocidad del agua en el punto de medición debe ser superior a la mínima. Es óptima si es superior a 0.3 m/s.
- Se deben revisar los niveles óptimos requeridos para una medición de precisión (factores hidráulicos, electrónicos y geométricos).
- Previamente debe confirmarse el tipo de flujo existente, para garantizar la condición de tubo lleno, o el que corresponda según el equipo a utilizar.

Los objetivos buscados con la realización de las mediciones son:

- Calibrar el modelo hidráulico del sector.
- Medir los caudales de entrada y salida para calcular el IANC.
- Medir el caudal mínimo nocturno para el estudio de pérdidas por fugas o consumos nocturnos.
- Actualizar los factores de demanda para el diseño de redes.
- Determinar el histograma de caudales distribuidos en los sectores y distritos para los fines de semana, semana y todos los días.
- Calcular los consumos medio, máximo y mínimo de la zona y los periodos de ocurrencia.

El proceso de ubicación de los puntos de medición de caudal se realiza en dos etapas: la definición de las alimentaciones de las zonas al minimizar el número de entradas y salidas al implementar la sectorización; y la localización exacta del punto de medición en campo escogiendo el sitio más adecuado respetando las

condiciones técnicas de los instrumentos incluyendo la localización de los aparatos propiamente dichos y los soportes de energía.

La instalación de puntos de medición de presión en la red de distribución permite verificar las condiciones de servicio durante la medición de la zona estudiada y realizar la calibración del modelo hidráulico. La ubicación de los puntos de presión se define según:

- La ubicación de los puntos de entrada y salida de las zonas medidas.
- Sobre la red de distribución menor con el fin de obtener pérdidas de carga significativas.
- En puntos donde se presenten presiones extremas mínimas y máximas (el modelo preliminar puede predecir estos puntos).

1.4.7. PASO 7: ANÁLISIS DE CONSUMO

Dependiendo del uso predominante en el sector de estudio el consumo promedio de los usuarios puede verse o no afectado por la presión en la red de distribución. Es recomendable estudiar la evolución del consumo micro y macro medido al reducir la presión del sector.

Al considerar un aparato aislado es evidente que el consumo es directamente proporcional a la presión, por ejemplo el tiempo que lleva lavarse las manos es independiente de la presión mientras que la velocidad de salida del flujo aumenta. Por ello es de esperarse que en zonas comerciales y residenciales donde los usuarios están directamente conectados a la presión de la red de distribución (edificios de menos de 4 pisos), su consumo disminuya con la presión.

El Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados CIACUA de La Universidad de los Andes tiene la hipótesis de que en sectores en los cuales los usuarios son predominantemente edificios de más de cuatro pisos que cuentan con un sistema de presión propio independiente de la red de distribución y que han instalado un by-pass en el tanque de almacenamiento, el consumo medio puede incrementarse con la reducción en la presión de la red, pues esto implicaría un mayor trabajo del equipo de presión y por ende un mayor presión media de distribución interna.

Los resultados obtenidos en esta fase pueden emplearse para revalidar el consumo asignado a los usuarios incluidos en el modelo calibrado. Es recomendable elaborar un registro de evolución de presión y consumo en la red a medida que se realiza la conversión de un régimen de presión a otro, caracterizando esta relación para distintos sectores dentro del distrito.

Con la experiencia llevada a cabo en el distrito Estadio se encontró, que al analizar las lecturas de micromedición de consumo, el volumen demandado por los usuarios no varió al pasar del régimen de presión alta al de presión media, sin embargo si se redujo alrededor del 6% con el cambio a régimen bajo. Cabe destacar que aunque la facturación pudo verse reducida en un bajo porcentaje, el resultado más significativo es la disminución de la presión promedio de los nodos correspondientes al distrito Estadio en 15.72 m.c.a, pasando de una media de 49.40 m en el régimen antiguo, a 33.68 m en el régimen actual. Los efectos favorables asociados a esta reducción de presión compensan ampliamente la disminución de consumo.

1.4.8. PASO 8: MODELOS POR ESCENARIOS

Con el fin de evaluar todas las posibles condiciones críticas a las que puede verse sometida la red, se recomienda montar un modelo para cada régimen de presión, escenario de operación (propuestos) y para los días entre semana y fines de semana..

El montaje de los modelos por escenarios puede presentar el impacto que tiene la variación en la modulación del consumo que se presenta los fines de semana, estos modelos pueden arrojar hipótesis de calibración no consideradas en el modelo preliminar.

Para cada uno de estos modelos es necesario considerar la variación de:

- Presión en la fuente de suministro del sector.
- Setting (parámetro de operación) de las válvulas reguladoras instaladas.
- Patrones de consumo en los usuarios y de variación de energía en las fuentes.
- Caudal de demanda media en las fuentes de consumo.
- Parámetros de calibración como los coeficientes de emisores y multiplicadores de demanda.

1.4.9. PASO 9: MODELO DEFINITIVO

Este paso consiste en el refinamiento y la calibración del modelo hidráulico definitivo de la red de distribución como un complemento del paso cinco. El

desarrollo de las etapas de operaciones de campo, análisis de consumo, y los modelos por escenarios permiten definir características de la red no identificadas o modificadas respecto a las asignadas en el modelo preliminar.

Puede ser necesario reajustar los factores de demanda para los diversos sectores con el fin de obtener una distribución de caudal coincidente con las mediciones de campo realizadas en los procesos de calibración y validación. Los factores modificadores de la demanda definitivos deben llevar a un balance de masas general donde se pueda calcular el índice de agua no contabilizada correspondiente al distrito y una estimación del índice propio de cada zona dentro del mismo.

La calibración definitiva del modelo respecto a las energías (medidas como la pérdida de presión en el proceso de distribución) debe considerar la variación del diámetro de las tuberías dentro de los rangos admitidos y en función del material, así como de la rugosidad y pérdidas menores de cada tramo. Cabe volver a mencionar la importancia de caracterizar el sector de estudio no solo desde el punto de vista operativo de la hidráulica; datos como la fecha de instalación de los servicios, historia urbanística, características del suelo, reposición de redes de servicios en general, entre otros, pueden servir de guía en el momento de plantear sectores con alta presencia de emisores, diámetros reducidos, conexiones clandestinas, y demás parámetros de calibración.

El resultado de esta etapa es el mejor modelo ajustado a las condiciones de campo, calibrado en base a las mediciones preliminares, y validado con los registros generados en los nuevos regímenes de presión. En base a este modelo se plantean los diversos esquemas de operación de la red, refuerzo y reposición de redes, y se diseña la localización y configuración de nuevas estaciones de regulación de presión.

1.4.10. PASO 10: OPTIMIZACIÓN DE PRESIONES Y REDUCCIÓN DEL IANC

El modelo hidráulico calibrado puede emplearse como un indicador del porcentaje de agua no contabilizada debido a pérdidas técnicas y comerciales de forma independiente. Si se anulan los factores multiplicadores de demanda y conservamos el caudal calculado por micromedición el modelo considerara únicamente el agua facturada y el agua perdida operacionalmente, luego la diferencia entre el caudal medio de salida del tanque de este nuevo modelo y el caudal del modelo calibrado corresponde a la cantidad de agua perdida comercialmente. El volumen no contabilizado generado por perdidas técnicas se calcula de forma similar al suponer que no hay flujo por emisores (fugas), el caudal medio de salida del tanque de este modelo incluye el volumen facturado y el consumido por conexiones clandestinas, la diferencia entre este valor y el correspondiente al modelo calibrado es el agua no contabilizada generada por perdidas operativas.

Una vez identificados los factores y localización de las pérdidas de agua es posible plantear un programa de detección de fugas con geófono y campañas de reposición de redes. Los sectores con factores de mayoración de la demanda considerables pueden incluirse en un plan de legalización y localización de conexiones clandestinas.

Es importante destacar que una vez se ha implementado la sectorización hidráulica en la zona de estudio debe conservarse el esquema de operación planteado, no se debe manipular el estado de las válvulas sin previo conocimiento y aprobación de la división de distribución

Con base en los resultados del modelo hidráulico se determina el caudal y manejo de presión requerido para la selección y diseño de nuevas estaciones de control de presión. A continuación se presentan los parámetros a tener en cuenta para la instalación de las estaciones en base al estudio y modelo arrojado por el POP (Jiménez, 2003):

- La estación reguladora consta de la instalación de la válvula junto con una serie de accesorios que facilitan el mantenimiento y mejoran la operación del sector. La estación tipo incluye válvulas de compuerta aguas arriba y abajo de la válvula, filtro, unión universal, reducción excéntrica, válvula de globo, válvula ventosa y un by pass.
- Con el fin de minimizar problemas asociadas con la descalibración es recomendable instalar las estaciones de regulación cada 35 metros de diferencia de nivel de tal manera que al salir de servicio un válvula de control intermedia las tuberías aguas abajo no soporten presiones muy superiores a los 70 mca.
- El valor de presión que debe reducirse en una estación controladora, para efectos prácticos y control de cavitación, no puede ser mayor a $2/3$ de la presión aguas arriba. En caso de requerirse una reducción mayor a la sugerida es conveniente instalar estaciones en serie.
- En todos los casos el procedimiento de diseño debe incluir la revisión de la curva de operación de la válvula con el fin de evitar condiciones de cavitación.
- Las dimensiones de la válvula a instalar depende de los valores de consumo críticos, para su selección el diámetro máximo recomendado es el de un diámetro comercial menor al de la red principal, y por

recomendaciones de mantenimiento dentro del rango de tres a seis pulgadas.

- La normalización del tamaño de la válvula indica las tuberías sobre las cuales se recomienda instalar la estación, estas corresponden a líneas de conducción o tuberías matrices de la red de distribución. De acuerdo a las dimensiones de la válvula se recomienda (no a manera de restricción) la instalación sobre tuberías de 4 a 8 pulgadas.
- Si se requiere regular presiones en tramos con caudales mayores a los admisibles para una válvula de seis pulgadas se deben diseñar brazos paralelos.
- En casos en los que solo se requiere un brazo debe construirse un by pass a la válvula con tubería de menor diámetro con una unión universal para desmontaje. Donde se requiere más de un ramal, cada ramal complementario funciona como by pass del anterior.
- La adecuada operación y protección de los equipos y accesorios que conforman cada una de las estaciones de regulación implica la construcción de cajas en concreto reforzado y mampostería.

Cada sector de estudio es único y presenta características propias que deben ser analizadas de forma independiente. La implementación de la metodología para definir un plano óptimo de presiones y reducir el índice de agua no contabilizada debe permanecer en un constante cambio y mejoramiento, aunque el desarrollo debe llevar una secuencia definida, el énfasis que se debe dar a cada uno de los pasos aquí descritos depende las particularidades encontradas en la zona de estudio.

1.4.11. RESULTADOS ESPERADOS

Con la implementación de la metodología para la definición del plano óptimo de presiones para un sector de estudio se espera alcanzar los objetivos planteados respecto al manejo de presiones, así como todas las consecuencias benéficas asociadas de forma indirecta. Así, los resultados esperados con el desarrollo de la metodología acá planteada son:

- Obtener una cartografía actualizada del urbanismo y del catastro de redes, siendo este un requisito para el montaje del modelo preliminar, el cual se valida en el proceso de calibración y desarrollo del modelo definitivo.
- Definir una sectorización hidráulica óptima, que se ajuste a la morfología de la zona y que permita realizar operaciones de campo con una población afectada reducida y advertida con anterioridad.
- Contar con un modelo digital actualizable, que ha sido validado y que cuenta con la información mas reciente del catastro de redes. Este modelo puede funcionar como base de diseño para modificaciones futuras de la red.
- Reducir el volumen de agua no contabilizada al disminuir la presión de salida por las fugas no detectables.
- Disminuir las pérdidas de agua generadas por fugas detectables, como las relacionadas con estallidos de tuberías.

- Identificar sectores con posibles conexiones clandestinas y submedición al verificar en campo las hipótesis de calibración del modelo definitivo.
- Identificar sectores con un porcentaje elevado de pérdidas por fugas, al verificar en campo las hipótesis de calibración del modelo definitivo.
- Plantear campañas de legalización de suscriptores y reposición de redes en base a la referenciación de los sectores problemáticos.
- Caracterizar cada distrito, y los subsectores donde sea posible, con un IANC propio, definiendo con este su estado hidráulico en general.
- Caracterizar cada distrito con patrones de consumo propios, diferenciando consumos de tipo residencial, industrial, por estratos, presión en la red, etc. Pueden evaluarse los factores K de modificación de consumo para diseño en cada sector.
- Aumentar la vida útil de las tuberías al verse sometidas a presiones menores.
- Disminuir la demanda de recurso humano generada por reparaciones de daños en sectores vulnerables a las altas presiones.
- Caracterizar de forma detallada cada uno de los distritos de la red con el fin de integrarlos en un solo modelo del área de servicio. En este modelo se puede evaluar el impacto generado por cualquier operación de campo, advirtiendo a la población al mantener informado el Call Center de la empresa. El modelo general permite conocer todos los parámetros hidráulicos de la red de distribución.

2. CONTRIBUCIÓN EN LA ELABORACIÓN DEL PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES Y REDUCCIÓN DE AGUA NO CONTABILIZADA EN EL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA

Las actividades descritas a continuación pretenden presentar un informe de desarrollo de la práctica empresarial llevada a cabo en la Gerencia de Operaciones del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga durante el segundo semestre del 2006. Se presentan las actividades realizadas como practicante de la empresa haciendo énfasis en aquellas relacionadas con la definición del plano óptimo de presiones.

2.1. VERIFICACIÓN DEL CATASTRO DE REDES Y URBANISMO

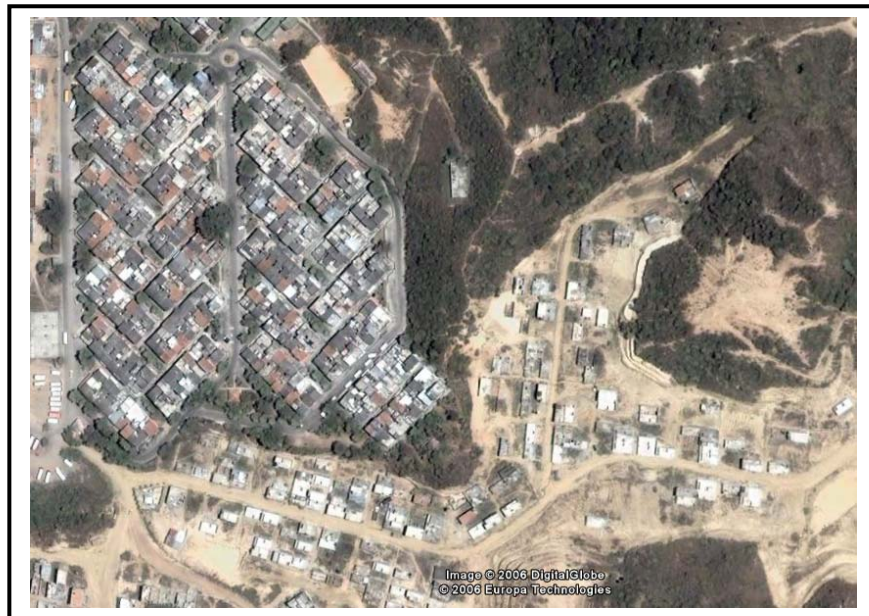
Como un primer paso para el montaje del modelo es necesario verificar la veracidad y totalidad del catastro de redes. Dado el desarrollo constante en el Municipio de Girón, el urbanismo ha sufrido modificaciones significativas en los últimos años.

Las primeras actividades consistieron en identificar nuevos asentamientos legales e ilegales en los distritos de presión San Juan y Girón Mayor; así como corregir el urbanismo con que cuenta el acueducto en su base de datos. A partir de una cartografía completa del urbanismo de la zona es posible caracterizar el catastro de redes del distrito de una forma más confiable.

Las herramientas empleadas para realizar estas actividades fueron:

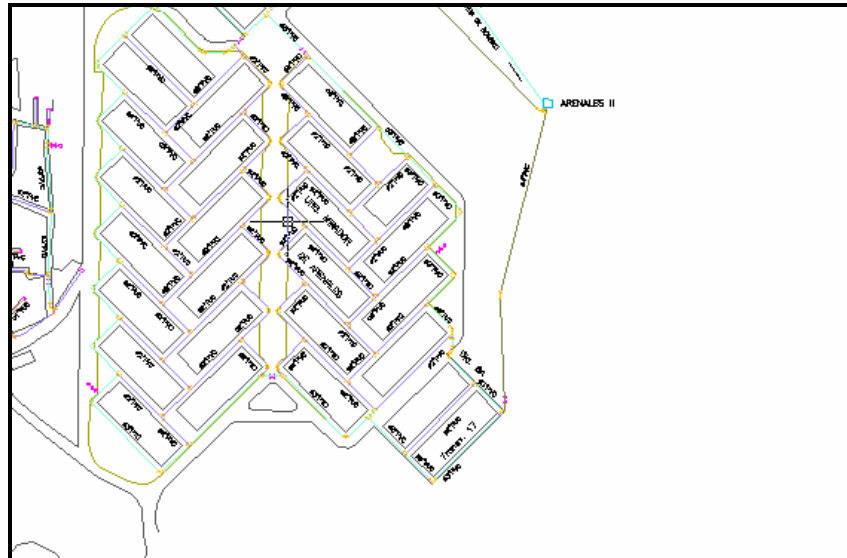
- Plan de Ordenamiento Territorial de San Juan de Girón 2000-2009. Centro de Estudios Regionales. Universidad Industrial de Santander.
- Registro de disponibilidades aprobadas dentro del municipio de Girón **amb.**
- Plano: Zona de Desastre, Lotes Analizados y Asentamientos Subnormales. Alcaldía San Juan de Girón. Marzo 2005.
- Plano: Localización Esquemática de Tanques y Conducciones. Gerencia de Planeación y Proyectos. **amb.**
- Plano: Catastro de Redes Municipio de Girón. Gerencia de Operaciones. **amb.**
- Plano: Localización de Distritos de presión y tanques. Gerencia de Operaciones. **amb.**
- Plano: Catastro de Redes Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. Gerencia de Operaciones. **amb.**
- Google Earth: Fotos satelitales de uso libre disponibles en la web.

Figura 18. Urbanización Mirador de Arenales. Zona Sur Municipio de Girón.



Fuente: Google Earth

Figura 19. Red de distribución zona sur del Municipio de Girón



Fuente: Catastro de redes amb.

La Figura 18 y Figura 19 son una muestra de nuevos asentamientos identificados en el municipio de Girón. En el transcurso de la fase de actualización del catastro se encontraron sectores legalizados con redes construidas que no habían sido incluidos en la base de datos. En caso de identificar asentamientos sin red de distribución, estos son considerados en el modelo como posibles demandas clandestinas.

El proceso de verificación, corrección y actualización de la base de datos cartográfica fue aplicado al barrio la Cumbre y al municipio de Girón. Al iniciar el montaje del modelo hidráulico preliminar se cuenta con un registro aceptablemente actualizado de la red, sin embargo el proceso es continuo y puede ser incluido al modelo incluso en su fase final (archivo *.inp). Las verificaciones en campo son también una herramienta importante para la actualización de la información, especialmente en lo que concierne al estado de válvulas y disposición de cruces de tuberías.

En vista de la necesidad de actualizar y corregir el catastro de redes existentes, el **amb** determinó contratar personal encargado de corregir los errores topológicos de la red y el urbanismo actual en el sistema SIIDAR. Este sistema es una herramienta que permite descargar en cualquier momento el urbanismo, catastro de redes y la cartografía en general, la cual se encuentra en constante actualización.

La importancia de la herramienta SIIDAR radica en la posibilidad de extender la validez del modelo desarrollado al incluir las modificaciones hechas a la red, de esta forma es posible revalidar el modelo cada vez que la red sufra modificaciones significativas.

2.2. MODELACIÓN DIGITAL DEL TERRENO

Para poder generar el modelo digital de terreno es necesario procesar la información cartográfica disponible. El **amb** cuenta con el Plano Aerofotogramétrico Digital de Bucaramanga generado por la empresa Fotogrametría Analítica Limitada FAL Ltda.

Las planchas corresponden a una proyección cartesiana con origen en el vértice geodésico denominado “Girón” al que se le asignaron sus coordenadas Gauss, con origen en el Observatorio Astronómico de Bogotá y disminuidas en N 1.200.000 y E 1.000.000, o sea N 76,643.50 m y E 97.236,74 m.

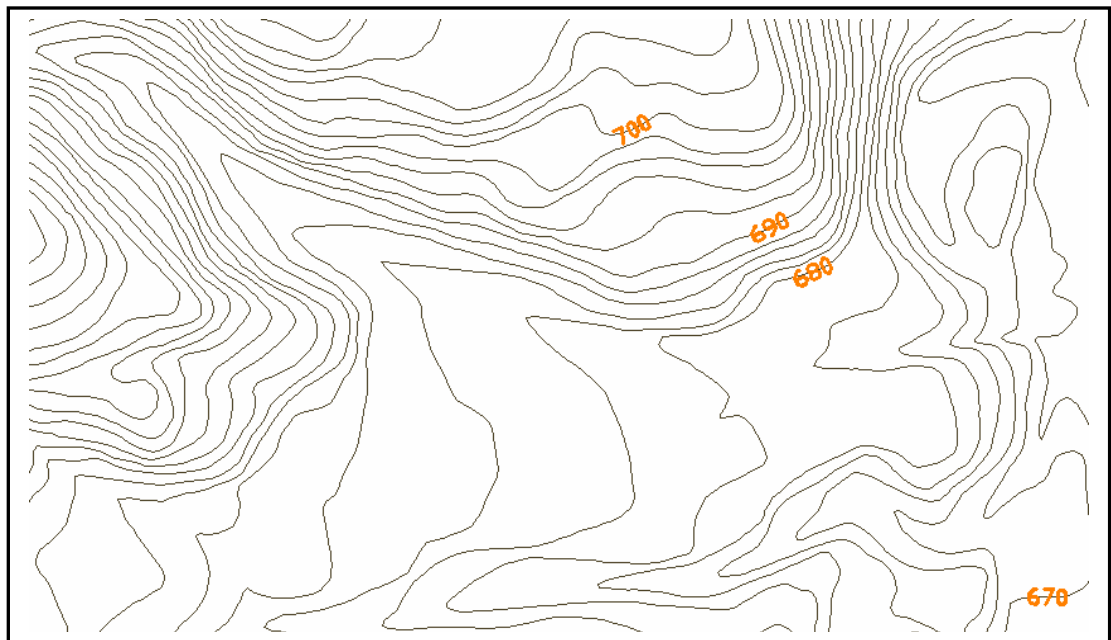
Las distancias se encuentran reducidas al horizonte 931 m de altitud sobre el nivel del mar. Las cotas de los puntos de control utilizadas para la restitución fotogramétrica están referidas al nivel medio del mar.

Se generaron las superficies correspondientes al barrio La Cumbre y al Municipio de Girón a partir de las curvas de nivel referenciadas cada 2 metros de las planchas FAL:

Tabla 1. Planchas FAL para Generación de MDE

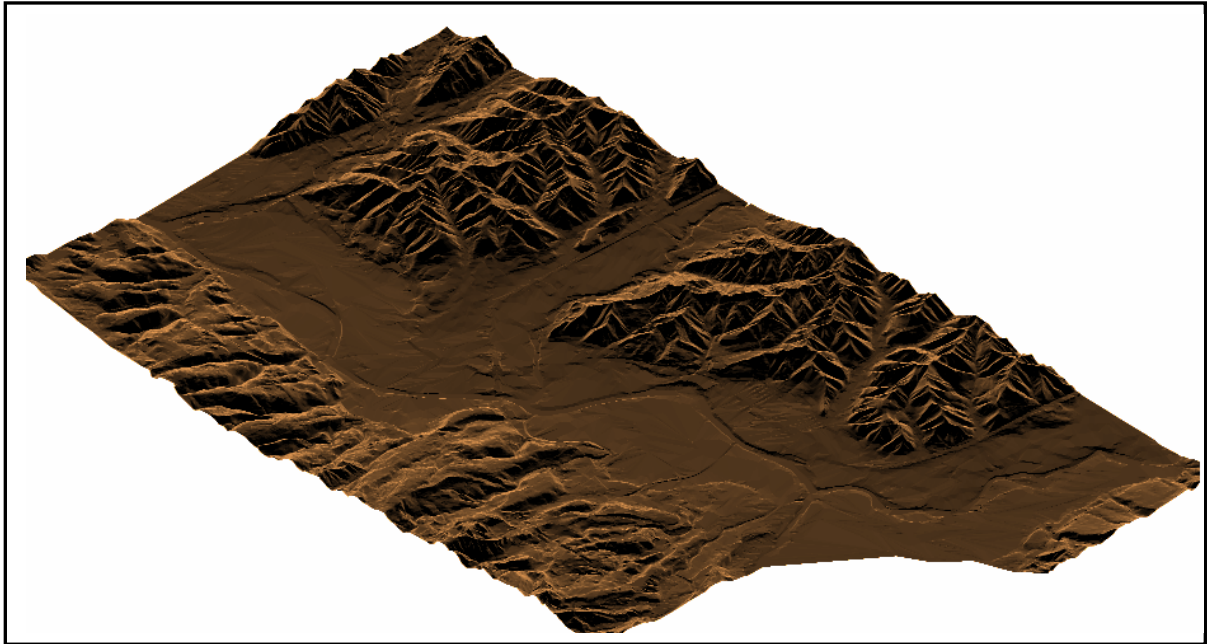
Planchas Municipio de Girón	Planchas Barrio La Cumbre
E37	F53
E38	F54
E47	F63
E48	F64
E57	
E58	
E67	
E68	

Figura 20. Planchas FAL Municipio de Girón



Fuente: Planchas FAL amb.

Figura 21. Visualización Render del municipio de Girón



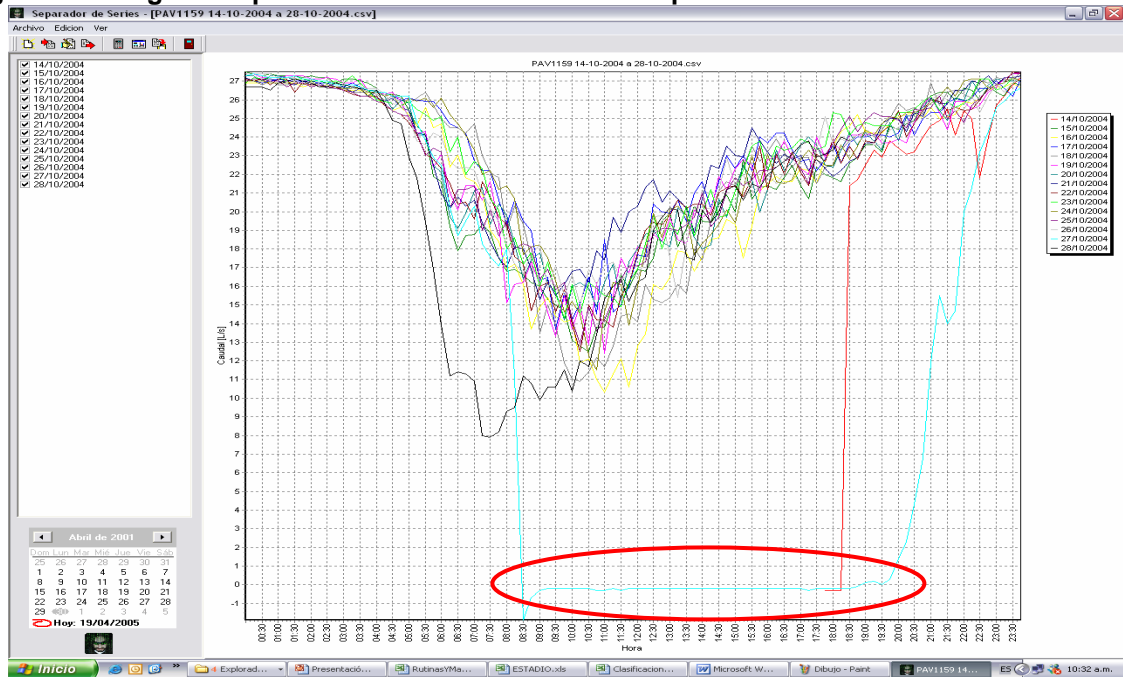
Fuente: Autodesk Land 2005. El autor.

2.3. CURVAS DE MODULACIÓN DEL CONSUMO

Con el fin de definir el comportamiento característico diario de consumo para todos los días de la semana, se recolectaron los datos de caudal de salida de los tanques de interés. El **amb** cuenta con un registro histórico generado a partir del sistema SCADA de los tanques de la red.

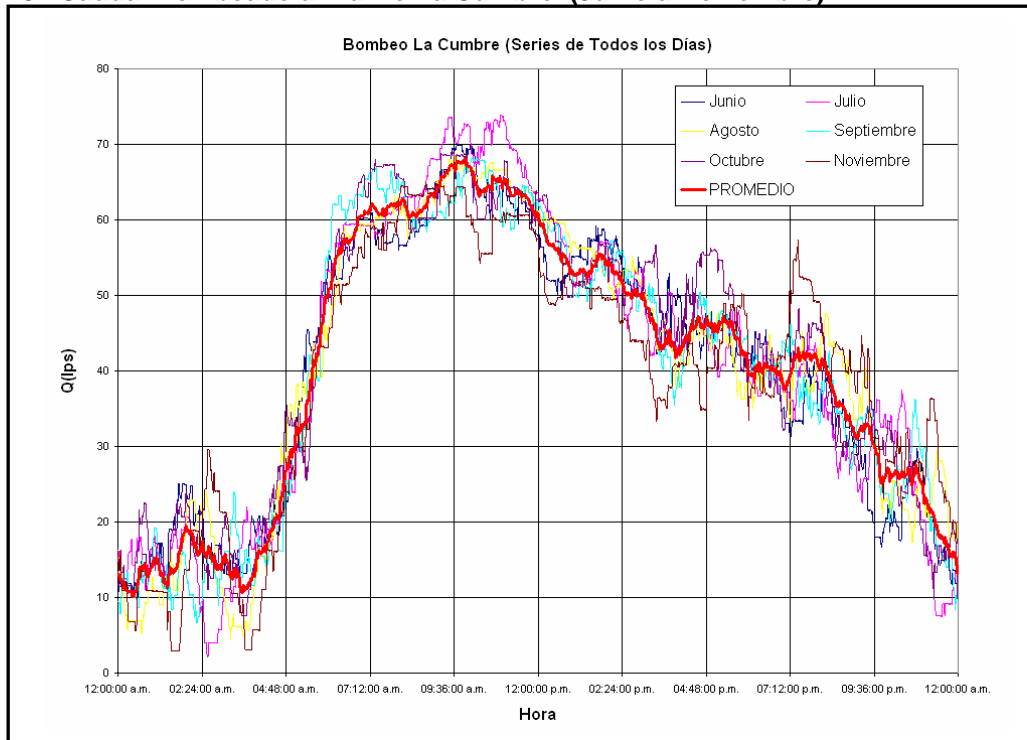
La información disponible presenta periodos de comportamiento irregular debido a las alteraciones en la demanda generadas por el cierre y reapertura de válvulas para reparación y renovación de redes, la alimentación de un tanque dependiente o mantenimiento de equipos; por esta razón es necesario realizar un depurado manual de los datos existentes.

Figura 22. Registro Típico de Presión con Datos No Representativos



Fuente: Separador de Series Uniandes, Informe III amb.

Figura 23. Caudal Bombeado al Barrio La Cumbre (Junio a Noviembre)



Fuente: Excel Datos SCAD. El autor.

2.4. INTERVENTORÍA DE CALIBRACIÓN DEL MODELO DISTRITO ESTADIO

El proceso de calibración del modelo digital comprende la modificación de los diversos parámetros característicos del sistema hasta llegar a un ajuste razonable entre las predicciones del modelo y las mediciones en campo de presión y caudal. El proceso de ajuste se realiza en tres regímenes de presión (alto, medio y bajo) cuyos resultados se unifican una vez se haya alcanzado una aproximación aceptable.

La interventoría consistió en la revisión del informe de calibración presentado por la Universidad de Los Andes identificando factores particulares empleados en el proceso. En esta inspección se encontró:

- Factores multiplicadores de demanda de 2, 2.5, 3 y 7 asignados a los barrios Granada, Girardot, Nariño; Santander, Don Bosco, 23 de Junio; San Rafael, y Cinal. Esto representa una alta presencia de demandas clandestinas o submedición.

El multiplicador de 7 corresponde a los barrios Comuneros y Mutualidad los cuales se encuentran localizados a la entrada hidráulica del distrito. Aunque este indicador resulta alarmante se verificó en campo que era ocasionado por una desconfiguración geométrica en la instalación del medidor de caudal, el cual sobrevaloraba el caudal transportado en un promedio de 40 lps, indicando pérdidas comerciales ficticias y un IANC elevado.

Los factores de 2 a 3 se atribuyeron a que el registro de micro medición empleado en la modelación no cubrió por completo la demanda propia de los subscriptores del sector. Se consideró la posibilidad de que el rechazo

de los consumos que no se ajustaran al histórico pudiera generar este efecto, al calcular la diferencia entre caudal de las mediciones crudas y el filtrado se encontró una variación cercana al 5%.

Actualmente se realiza la identificación y caracterización de los usuarios con grandes consumos en el distrito así como los correspondientes a los subsectores del Norte, con el fin de determinar si sus registros fueron filtrados en el proceso.

- Se incluyeron modificaciones a los diámetros reales asignados a las tuberías con el fin de representar la posible variación porcentual de los diámetros internos que sufren las tuberías, debido a la circulación del agua. Estos factores van desde 0.990 a 1.010.
- Se plantean posibles tramos con fugas significativas en los barrios Transición, San Cristóbal, Campo hermoso y Chorreras de Don Juan. Se espera una confirmación de esta hipótesis en la presentación del informe final.
- Dentro de los resultados definitivos obtenidos a través del análisis por rugosidades se destaca la poca variabilidad de las tuberías plásticas y de acero, y el aumento considerable de la rugosidad de las tuberías metálicas (excepto el acero) y de concreto.
- En cuanto a la inclusión de pérdidas menores se identificaron coeficientes ***k*** de 15, 20 y 40 asignados a tramos con posibles válvulas truncadas y a aquellos sobre los cuales se instalaron estaciones reguladoras. También se modificaron los coeficientes en las tuberías con mayor caudal o mayor velocidad a la entrada de los sectores.

Actualmente está abierta la discusión acerca de las posibles causas del desfase entre los caudales macro y micro medidos en el distrito y el efecto que este puede tener en la validez del modelo. Además de la hipótesis de la micromedición también se considera la desconfiguración de un macromedidor en la red.

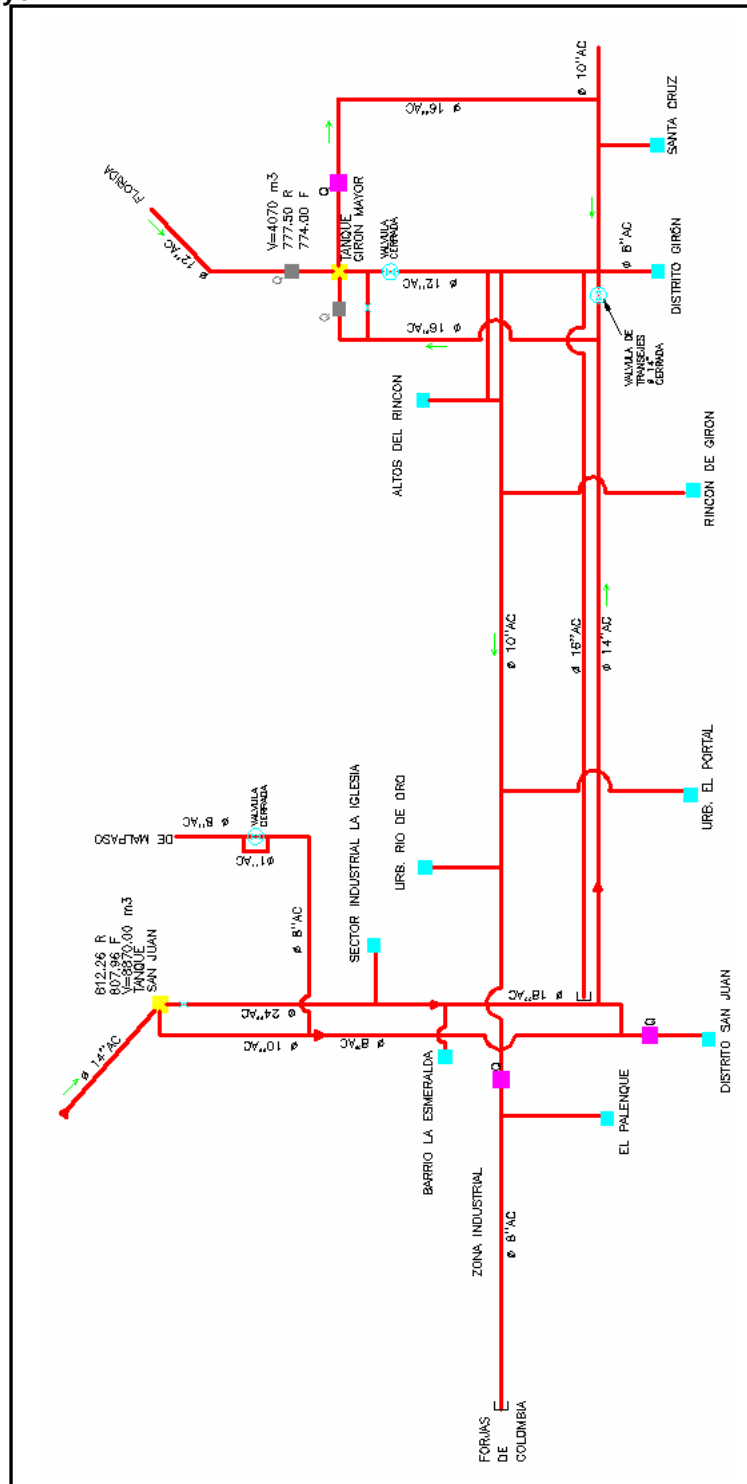
2.5. CONFIGURACIÓN DE MACROMEDIDORES DISTRITOS SAN JUAN Y GIRÓN MAYOR

En la fase inicial de la determinación de las operaciones de campo para los distritos San Juan y Girón Mayor es necesario localizar de forma precisa la posición de los macromedidores de caudal. El sitio de escogencia debe propiciar las condiciones, hidráulicas, electrónicas y geométricas necesarias para que el medidor registre con la precisión requerida ofrecida por el fabricante.

En cuanto a la operatividad, fue necesario trazar un esquema de funcionamiento que indique las tuberías de conducción y tuberías matrices de distribución, las fuentes de alimentación, localización de los reservorios y las principales salidas de abastecimiento. El diagrama indicado en la Figura 24 corresponde a los distritos de San Juan y Girón Mayor que cubren la zona urbana del municipio de Girón y la denominada Zona Industrial.

La configuración propuesta de 3 macromedidores está fundamentada en las siguientes razones:

Figura 24. Esquema de Operación y Localización de Macromedidores en los Distritos San Juan y Girón Mayor.



Fuente: Base de Datos amb.

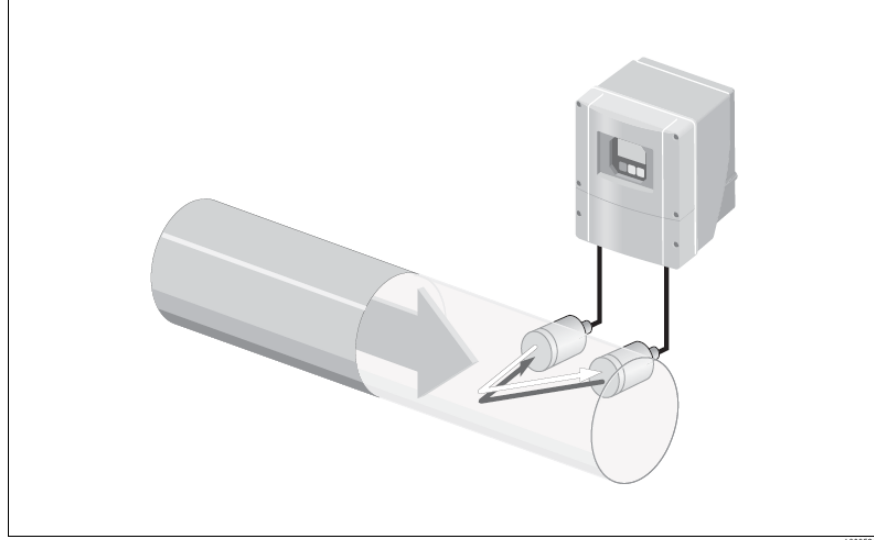
- Es posible caracterizar la curva de modulación de consumo a la salida de ambos tanques, obteniendo la curva de comportamiento de los usuarios residenciales e industriales del municipio.
- Se determinará una indicie de agua no contabilizada para los consumidores del tanque San Juan, tanque Girón Mayor, usuarios del casco urbano y de la zona industrial de forma independiente.
- Existen condiciones hidráulicas propicias para la instalación de los equipos y para la construcción de las cámaras de seguridad.

2.5.1. SISTEMAS DE MACROMEDICIÓN DE FLUJO

Los sistemas de medición ultrasónica de flujo operan bajo el principio de diferencia de tiempo de transito. Una señal acústica ultrasónica es transmitida en ambas direcciones desde uno de los sensores de medición. Como la velocidad de propagación de la onda se hace menor cuando esta viaja contra la dirección del flujo que en la dirección del flujo, una diferencia de tiempo de transito se genera. Esta diferencia es directamente proporcional a la velocidad del flujo. En condiciones de cero flujo el sensor recibe la señal sin retraso.

El macromedidor calcula el caudal a partir del área de la sección transversal y la diferencia de tiempo de transito medida. Adicionalmente al caudal, el sistema mide la velocidad del sonido en el líquido, esta puede ser empleada para distinguir entre diferentes líquidos o como una medida de calidad del producto. El proceso de calibración inicial puede ser llevado a cabo de forma sencilla siguiendo las aplicaciones instaladas en el dispositivo.

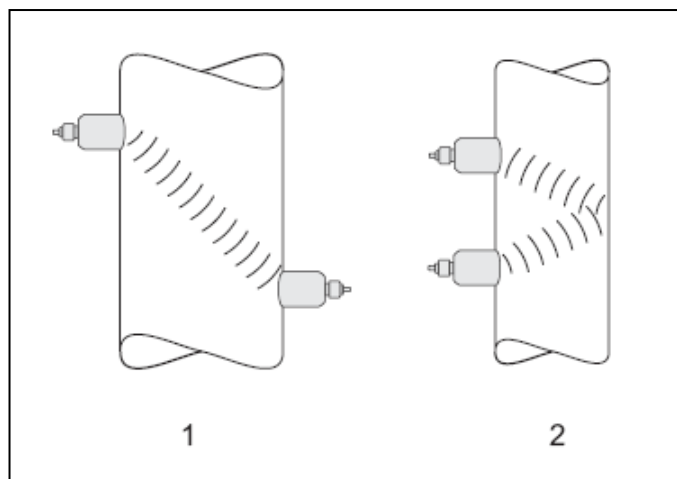
Figura 25. Esquema de Medidor de Flujo Ultrasónico



Fuente: Endress + Hauser

Para obtener una medición acertada, la señal ultrasónica necesita un tiempo mínimo de propagación de la señal. Los medidores estándar ofrecen cuatro posiciones distintas de travesas, hay que tener en cuenta que entre mas puntos de deflexión existan, mas decrece la fuerza de la señal. Por esto, con el fin de mantener una buena calidad de señal, se debe escoger la configuración que conservando la longitud mínima especificada implique el menor número de puntos de deflexión.

Figura 26. Configuración con uno y dos travesos.



Fuente: Endress + Hauser. Manual de Operación.

2.6. REVISIÓN DE PROYECTOS HIDRÁULICOS

Como practicante de la Gerencia de Operaciones en el **amb**, se desarrollaron actividades de apoyo dentro de las cuales se destaca la revisión de Proyectos Hidráulicos. Para los casos en que amerite la presentación del proyecto, se revisan cada uno de los ítems planteados y su correspondencia con la disponibilidad aprobada; cualquier observación se registra en un formato y se remite al Ingeniero de Disponibilidades. Junto con el formato de evaluación, se presenta el concepto; determinando en común acuerdo si el proyecto debe ser corregido o aprobado para proceder a la visita de inspección. Cada proyecto revisado, aprobado o no, se registra en la base de datos.

Para aprobar una solicitud de servicio el **amb** exige la presentación de un proyecto hidráulico en los casos en que:

- El número de viviendas sea mayor a 3
- El número de pisos es mayor de 3
- Requiere construirse red
- El área comercial a desarrollar es mayor a 200 m²
- Cualquier otro caso que determine el acueducto.

La revisión de un proyecto hidráulico básico debe incluir los siguientes ítems:

Descripción general:

- No. de pisos, oficinas, apartamentos o unidades de vivienda con su número de alcobas.
- Descripción de la configuración del Sistema Hidráulico utilizado
- Descripción hidráulica interna de la vivienda o viviendas tipo (Zonas con puntos de agua y sus aparatos)

- Indicación de los Métodos de Cálculo utilizados y normas técnicas aplicadas
- Especificaciones técnicas de tuberías, válvulas y accesorios e indicar la norma técnica que cumple cada uno.

Determinación y cálculo de:

- Número de habitantes y dotación
- Consumos unitarios, consumos totales, caudales medios, máximos y mínimos
- Conteo y sumatoria de unidades de gasto
- Cálculo de la acometida y medidor de control
- Cálculo del volumen de reserva y diseño de el (los) tanque(s)
- Diseño de la red interna de los apartamentos tipo (aparatos, red de agua fría y caliente) y determinación del apartamento crítico. Cálculo del coeficiente de simultaneidad.
- Diseño de la red de distribución del edificio (montante, tallo distribuidor, etc.)
- Cálculo del sistema de bombeo (caudales, alturas dinámicas, NPSH, potencia de la bomba, tuberías de succión e impulsión) y selección de las bombas.
- Diseño del equipo hidroneumático (si se encuentra en el sistema seleccionado)
- Diseño red de servicio para áreas comunes (si éstas existen).

Planos:

- Planta de localización que referencia el proyecto con los urbanismos vecinos.
- Señalización del sitio donde se proyecta hacer el empalme con las redes de la ciudad, indicando además la cota del terreno y la presión, datos previamente consultados en la División de Distribución del Acueducto.

- De las viviendas: planos arquitectónicos con la ubicación real de las tuberías de agua fría y agua caliente y numeración de los nodos de la ruta crítica, de los diferentes pisos
- Cuadro de especificaciones técnicas de las tuberías y accesorios
- Especificaciones técnicas de equipos
- Cuadro resumen de los medidores a instalar con su nomenclatura
- Detalles de la instalación y anclaje de la tubería y sus accesorios
- Detalle de instalación de aparatos sanitarios
- Esquema de acometida e instalación domiciliaria.
- Tanques de almacenamiento y cuarto de bombas con todas sus conexiones.

Generalidades:

- El proyecto hidráulico en su totalidad debe cumplir con las normas vigentes del Acueducto, así como con las normas nacionales e internacionales vigentes según su aplicación.
- Las memorias de cálculo y los planos deben entregarse por duplicado en archivo duro y una copia en archivo digital (los planos se entregarán en AutoCAD versión 2000 o superior). La segunda copia impresa se devolverá al urbanizador luego de su aprobación o para que implemente las correcciones que surjan con la revisión del proyecto.
- El tamaño de todos los planos es de 100x70 cm.
- Los detalles deben ser reales y a escala (la cual debe ser la adecuada para la interpretación del plano).
- La información en los planos debe estar completa y acorde con los requerimientos.
- La identificación de nudos en los planos, memorias y cuadros de cálculo deben corresponder entre sí.
- Los cuadros de cálculos deben estar completos.
- Fotocopia de la disponibilidad del servicio aprobada y vigente.

Los criterios para el cálculo del volumen del tanque hidroacumulador fueron discutidos pues no existe un método unificado de estimación en la normatividad actual. Las metodologías evaluadas fueron:

- BARNES de Colombia. Manual Práctico BARNES.
- IHM Sistemas de Presión de Agua. Manual del usuario: Instrucciones de Instalación Operación y Mantenimiento.
- HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ. Diseños Hidráulicos, Sanitarios y de gas en Edificaciones. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- SAMUEL MELGUIZO. Fundamentos de Hidráulica e Instalaciones de Abasto en las Edificaciones. Facultad de Arquitectura. Departamento de Construcción.

La revisión de los proyectos se fundamentó en criterios de ingeniería reconocidos y en las normas:

- Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Ras – 2000.
- Normas Técnicas. Diseño y Presentación de Proyectos de Redes de Acueducto en Edificios y Urbanizaciones.
- Código Colombiano de Fontanería. Norma Técnica Colombiana NTC 1500. ICONTEC.
- Código para el Suministro y Distribución de Agua para Extinción de Incendios en Edificaciones. Norma técnica Colombiana NTC 1669. ICONTEC.

Como complemento a la revisión de proyectos hidráulicos llevada a cabo, se realizó un acompañamiento a las visitas de inspección necesarias para la aprobación del servicio y las cuales son realizadas por el Ingeniero de Disponibilidades.

Simultáneamente a la evaluación de los proyectos, se realizó una edición de las Normas Técnicas del Acueducto con el fin de obtener una edición corregida, mejorada y reducida que incluya exclusivamente los requerimientos mínimos exigidos por el **amb** para la aprobación de proyectos hidráulicos.

2.7. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA SCADA

Como parte de la introducción a la práctica se presentó el funcionamiento del Centro de Control y del sistema SCADA. Este sistema consiste de una serie de terminales remotas, una red de comunicaciones, un centro de control y un software con interfaz gráfica el cual permite monitorear y controlar equipos remotos.

A partir de la información registrada en el centro de control se puede visualizar el estado general de la red, conociendo los niveles de los tanques, caudales y presiones en algunas conducciones del sistema. La información se recoge en ciclos de encuesta (Polling) generados cada minuto a cada una de las estaciones remotas o por medio de transmisiones desde y hacia las estaciones en operaciones de control. El centro de control cuenta con un registro histórico de cada uno de los parámetros evaluados en cada ciclo, el cual permite definir tendencias de consumo y presión en la red. Al contar con información en tiempo real, el centro de control maneja alarmas que pueden ser notificadas a través de cualquiera de los medios de la red de comunicaciones (Radio, Microondas, Fibra óptica, Wirelines, etc.).

Con la implementación del sistema SCADA la red de distribución se encuentra bajo constante monitoreo y administración. Los resultados son evidentes, por ejemplo: al tener un control constante y preciso del nivel del agua en los tanques

se puede plantear una distribución del recurso en horas de bajo consumo evitando por completo las pérdidas por rebose de los mismos. La reducción en el índice de aguas no contabilizada IANC que ha logrado el **amb** (alrededor del 28%) se debe en gran parte a la sistematización de su red de distribución obtenida con el SCADA.

El SCADA en el Centro de Control es una herramienta esencial para la obtención del plano óptimo de presiones, permite corroborar el catastro de redes de los distintos distritos (operaciones de verificación de continuidad), planificar operaciones de campo, y proporciona el registro histórico de macromedición de caudales y presiones. La base de datos proporcionada por el SCADA conforma la base para calibración del modelo hidráulico, junto con los registros de micromedición tomados exclusivamente para el proyecto. Con la implementación de nuevos equipos para la obtención del POP, se complementará la información registrada en el Centro de Control.

2.8. CAPACITACIONES Y CONFERENCIAS

En el transcurso de la práctica empresarial fue posible asistir a las conferencias relacionadas con la implementación del plano óptimo de presiones, así como algunos temas diversos tratados en distintos eventos. En orden cronológico estas fueron:

- Informe Ejecutivo: Optimización de Presiones Distrito Estadio a cargo de Juan Saldarriaga Director CIACUA Universidad de Los Andes.
- Proyecto Regulación del Río Tona Bajo “El Futuro del Agua en el Área Metropolitana”.

- Jornada Académica “Medio Ambiente, Recursos Naturales y Servicios Públicos Domiciliarios”.
- Exposición “El derecho al Agua”.
- Conferencia BEST Colombia. BERMAD Water Control Solutions.
- Durman Esquivel: FlowGuardGold Tubos y accesorios de CPVC resistentes al alto impacto.
- SIKA: Productos 2007 Rehabilitación de Plantas de Tratamiento
- Introducción al Sistema SIIDAR. División de Sistemas **amb**.
- Gerencia de Operaciones **amb**: Metrología
- Informe Final: Plano Óptimo de Presiones Distrito Estadio a cargo de Juan Saldarriaga Director CIACUA Universidad de Los Andes.
- Georeferenciador **amb**.

De la misma forma, se desarrollaron dos cursos de capacitación enfocados al montaje y calibración de modelos hidráulicos, y la obtención del Plano Óptimo de Presiones en el Distrito Estadio:

La primera capacitación, llevada a cabo en las instalaciones del **amb**, consistió esencialmente en instruir al personal de la empresa en el manejo del software aplicado al montaje y calibración de un modelo hidráulico representativo de un distrito. Las clases se llevaron a cabo los días 22, 23, 28 y 29 de Agosto; y fueron dirigidas por el Msc. Ingeniería Civil Alex Mauricio González, consultor **amb** del Plano Óptimo de Presiones del Distrito Estadio.

La segunda corresponde al curso de divulgación ofrecido por la Universidad de los Andes como parte del convenio para el desarrollo del Plano Óptimo de Presiones. El curso se llevó a cabo los días 28 y 29 de Noviembre en las instalaciones de MultiTECH Cabecera; y fue dirigido por los ingenieros César Mauricio Jurado y César Alberto Niño, asistentes graduados del equipo de trabajo del CIACUA de la Universidad de los Andes.

CONCLUSIONES

La metodología para la optimización de presiones es una herramienta eficaz para reducir el porcentaje de agua no contabilizada en una red de distribución; el uso del modelo hidráulico calibrado y validado puede emplearse como un indicador del porcentaje de agua no contabilizada debido a pérdidas técnicas y comerciales de forma independiente, definiendo la patología asociada con cada sector y las medidas a tomar para su solución. La disminución gradual del IANC y de la presión promedio en el distrito Estadio (reducida en 15.72 m) soportan la validez del procedimiento.

Aunque el proceso requerido para obtener la distribución óptima de presiones implica una gran labor de campo y oficina, los beneficios asociados con su ejecución compensan la inversión realizada. Dentro de los beneficios planteados cabe resaltar la caracterización detallada del sector de estudio mediante un modelo hidráulico, la adopción de una sectorización hidráulica eficiente y la reducción del IANC; este último generando ahorro económico que puede compensar la inversión en un corto periodo de tiempo.

La aplicación de la metodología para la obtención de una distribución de presiones óptima puede ser extendida a cualquier red de distribución siempre y cuando se cuente con los instrumentos de macromedición necesarios para generar la base de datos requerida por el proceso de calibración y validación del modelo hidráulico. De la misma forma, es esencial contar con la cartografía del urbanismo para el trazado del catastro de redes incompleto y el montaje en general del modelo hidráulico.

Se debe advertir que cada zona de estudio tiene características particulares, por ello es necesario conocer el sector desde distintas perspectivas con el fin de establecer prioridades en el proceso de montaje y calibración. Información como la susceptibilidad del suelo a deslizamientos o la distribución socioeconómica pueden servir de fundamento para generar hipótesis de calibración referentes a la asignación de pérdidas de caudal por fugas y a la inclusión de conexiones ilegales.

La definición de los puntos de instalación de estaciones reguladoras e instrumentos de macromedición debe ajustarse a un a serie de parámetros de forma que se monitoree y regule el sector con el menor numero de dispositivos posible. Igualmente, es recomendable ajustar la sectorización del distrito a los principios expuestos en el contenido del libro, de modo que se garanticen las condiciones necesarias para una regulación de presión eficiente.

RECOMENDACIONES

La definición del plano óptimo de presiones en la red de distribución del área metropolitana de Bucaramanga es un proyecto al cual la Escuela puede vincularse y aprovechar como medio de investigación en el montaje y validación de modelos hidráulicos. Las diversas áreas de la ingeniería que abarca este estudio pueden dar partida a proyectos de investigación multidisciplinarios aplicando conceptos de Ingeniería Civil, Mecánica y de Sistemas.

Los procesos involucrados en la exportación de cartografía digital para el montaje del modelo hidráulico requieren la utilización de una serie de rutinas repetitivas y en ocasiones complejas; es recomendable unificar estas rutinas en una sola aplicación que minimice las labores manuales de edición del usuario, reduciendo la posibilidad de fallas en el proceso. El uso de software diferente al aquí referido debe considerarse, pues existen en el mercado distintos programas con herramientas y aplicaciones que pueden resultar apropiadas para el tema de estudio.

La instalación de equipos macromedidores dentro de los subsectores del distrito es tan importante como el monitoreo de sus condiciones de entrada, esto permite asignar con precisión los factores modificadores de la demanda y las fugas durante el proceso de calibración del modelo hidráulico. Una base de datos incompleta del registro de usuarios también puede llevar a hipótesis de calibración erradas que sobrestimen las pérdidas por conexiones clandestinas.

El proceso de calibración del modelo hidráulico no debe apuntar a un ajuste exacto de un curva patrón definida ya que el comportamiento real de la red es variable; debe establecerse un rango de confiabilidad aceptado como parámetro de calibración. Se recomienda un intervalo de confiabilidad del 95% calculado para una distribución Normal.

El criterio empleado en la selección de los datos que definen la curva de modulación del consumo hace que su validez sea temporal, es recomendable recopilar una serie de datos más extensa que caracterice el comportamiento del consumo para diversos escenarios de análisis, como lo son las temporadas de lluvia y verano.

BIBLIOGRAFÍA

BARNES de Colombia. Manual Práctico: Equipos Hidroneumáticos. Bogota: Barnes de Colombia; 1995.

COLOMBIA. MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Resolución No. 1096/2000 de Noviembre de 2000, por la cual se adopta el Reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Bogotá: Ministerio de Desarrollo Económico; 2000.

GONZALEZ, Alex Mauricio. Montaje y Calibración de Modelos Hidráulicos Digitales. En: Capacitación Tecnológica; 2006 Septiembre; Bucaramanga: amb; 2006.

JIMÉNEZ ALDANA, MAURICIO. La sectorización hidráulica como estrategia de control de pérdidas en sistemas de acueducto, Colección Biblioteca Técnica del Acueducto, Acueducto Agua y Alcantarillado de Bogotá, 2003.

JURADO, Mauricio. Metodología para la Definición de Planos Óptimos de Presiones y Reducción de Agua No Contabilizada. En: Curso de Divulgación Universidad de los Andes; 2006 Octubre; Bucaramanga: amb; 2006.

MELGUIZO, Samuel. Fundamentos de Hidráulica e Instalaciones de Abasto en las Edificaciones. Segunda Parte. Medellín: Universidad Nacional de Colombia; 1979.

RODRÍGUEZ, Héctor Alfonso. Diseños Hidráulicos, Sanitarios y de Gas en Edificaciones. Primera Edición. Bogota: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería; 2003.

SALDARRIAGA, Juan. Metodología para la Definición de Planos Óptimos de Presiones y Reducción de Agua No Contabilizada. En: Informe Final Universidad de los Andes; 2006 Octubre; Bucaramanga: amb; 2006.

UNIANDES. Metodología Para la Definición de Planos Óptimos de Presiones y Reducción de Agua No Contabilizada: Informe Final. Bogota: Universidad de los Andes; 2006.