

Metodología para la Definición de Planos Óptimos de Presiones

Saldarriaga, Juan

Ingeniero Civil, MSc.

Profesor Titular Universidad de los Andes, Director del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: jsaldarr@uniandes.edu.co.

Jurado, César Mauricio

Ingeniero Sanitario, MSc.

Investigador Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: c-jurado@uniandes.edu.co

XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología

Sociedad Colombiana de Ingenieros

Bogotá, D.C. 22, 23 y 24 de mayo de 2008

Resumen. Se implementó una metodología desarrollada por la Universidad de los Andes para la definición de un plano óptimo de presiones en una red de distribución de agua potable en un sector hidráulico importante de la ciudad de Bucaramanga, el denominado "Distrito Estadio". Su objetivo fundamental es uniformizar y reducir la superficie de presiones para disminuir el Agua No Contabilizada. La metodología, que incluye la calibración del modelo hidráulico correspondiente, probó ser bastante útil al detectar zonas de la red con tendencias bastante definidas a presentar pérdidas técnicas o comerciales, además de encontrar errores topológicos, conexiones entre sub-sectores de la red y fallas en micro y macro-medición. Mediante un programa de sectorización e instalación de válvulas reductoras de presión, se logró reducir las presiones pasando por regímenes de presión alto, medio y bajo, los cuales a su vez sirvieron para validar el modelo calibrado.

Palabras Clave. Calibración, simulación redes de distribución. Pérdidas técnicas, pérdidas comerciales.

1. Introducción

Uno de los aspectos más importantes que deben considerarse durante la operación y el mantenimiento de cualquier sistema de distribución de agua potable está relacionado con el manejo y el control de la energía disponible en cada uno de sus tramos, la cual hace posible el transporte y la distribución del agua a todos los sitios en donde se encuentren los suscriptores.

Si la energía disponible en las redes es muy pequeña, entonces se presentarán deficiencias en el servicio, las que serán más visibles por aquellos usuarios que se encuentren topográficamente en los sitios más altos y alejados, especialmente durante las horas pico, en donde se maximiza el consumo. Por otro lado, si la energía disponible es demasiado alta, se someterá el sistema a presiones de servicio innecesariamente elevadas, las cuales propician la aparición de daños y la disminución de la vida útil de los elementos que componen el sistema.

Es de esta forma, que se hace indispensable para todos los sistemas de distribución, contar con un equilibrio exacto entre la energía de entrada a la red y la energía que realmente se requiere para atender la demanda de todos suscriptores, para garantizar así un funcionamiento óptimo de las mismas. Este concepto se conoce con el nombre de Plano Óptimo de Presiones.

El concepto de Plano Óptimo de Presiones es relativamente nuevo a nivel mundial, debido en gran medida, a que hasta hace tan solo unos quince años no se disponía de las herramientas operativas y de modelación suficientes para reproducir el comportamiento real de las redes de distribución. De igual forma, el interés por preservar la integridad de los elementos que conforman el transporte y el suministro del agua potable, así como la preocupación por minimizar la cantidad de agua perdida y administrar eficientemente las empresas prestadoras del servicio, ha tomado gran importancia solo durante los últimos años. Dentro de la investigación y desarrollo de este proceso, la Universidad de los Andes ha jugado un papel protagónico, debido a la gran cantidad de investigaciones que se han desarrollado de forma conjunta con las empresas administradoras de los sistemas de distribución de agua potable de algunas de las ciudades más importantes del país. A través de dichos trabajos se han desarrollado procesos, algoritmos, metodologías y programas que han permitido alcanzar resultados verdaderamente satisfactorios, que se han reflejado en ventajas operativas y económicas.

2. Determinación del Plano Óptimo de Presiones dentro de la Gestión integral de Redes

El crecimiento desmedido de las ciudades en las últimas décadas ha provocado un aumento acelerado en el tamaño y por ende en la complejidad de los sistemas de distribución de agua potable. Esta situación, sumada a los elevados costos de operación de las redes y a la escasez cada vez mayor del recurso, han obligado a las empresas prestadoras del servicio a buscar estrategias y metodologías que optimicen todos sus procesos, de forma tal que se cubran todas las necesidades del presente y además se tenga

información suficiente para anticiparse con un bajo nivel de incertidumbre a los acontecimientos futuros. Este proceso se conoce como Gestión Integral de Redes.

La determinación del Plano Óptimo de presiones de una red de distribución corresponde a uno de los elementos más importantes dentro del desarrollo de la Gestión Integral de Redes, ya que a través de éste se optimiza el funcionamiento hidráulico del sistema; además sus resultados y productos intermedios sirven de entrada a otros procesos que se utilizan para facilitar la corrección de los daños que suceden en la red, prevenir los que se puedan presentar y obtener indicadores que ayuden al seguimiento y toma de decisiones operativas y de diseño (Figura 1).

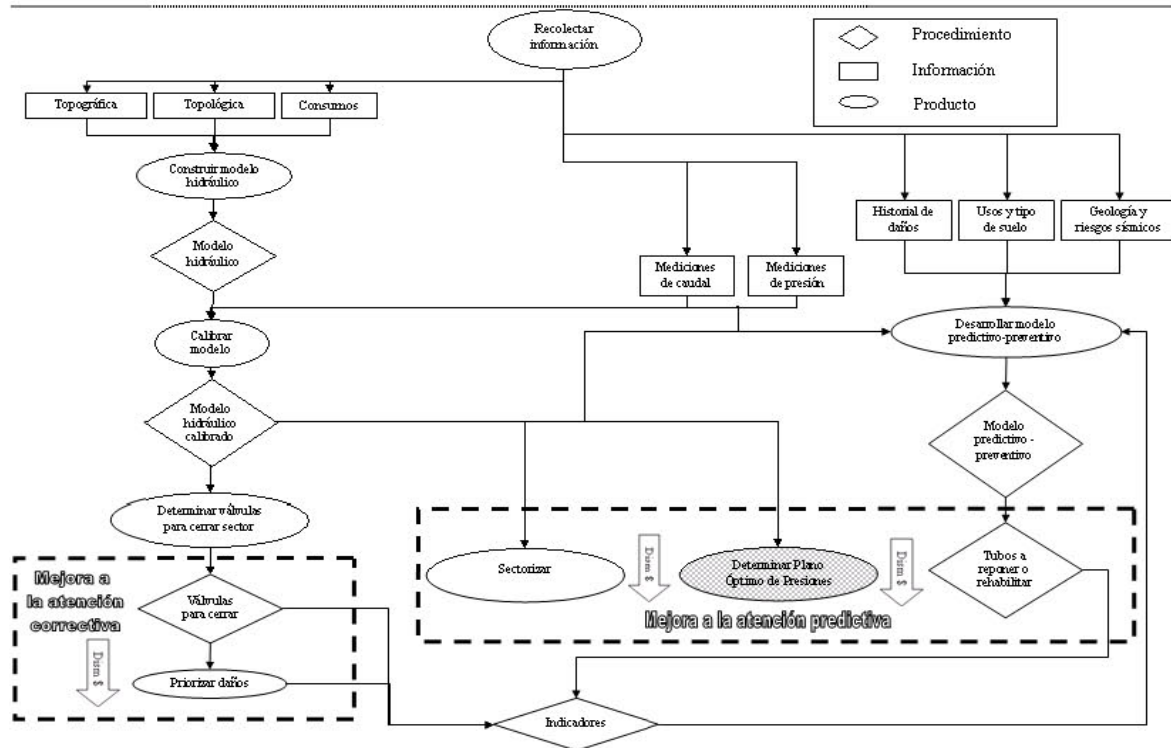


Figura 1. Algoritmo para alcanzar la Gestión Integral de Redes de Distribución.

Actualmente se desarrolla de forma conjunta entre el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. y la Universidad de los Andes un convenio de investigación y desarrollo, al interior del cual se han venido adelantando distintos proyectos encaminados a implementar el concepto de la Gestión Integral de Redes, en el acueducto de la ciudad.

Uno de los primeros pasos que se realizaron durante este proceso fue la implementación del Plano Óptimo de Presiones de un sector muy importante de la ciudad conocido con el nombre de Distrito Estadio. En éste se encuentran ubicados unos 35,000 suscriptores pertenecientes a todos los estratos sociales, los cuales se abastecen mediante 5,324 tuberías fabricadas en distintos materiales como Acero, Hierro Fundido, Hierro Galvanizado, Hierro Dúctil, Concreto Reforzado y PVC. Las redes pertenecientes al Distrito Estadio se estudiaron a partir de 20 puntos de medición de presión ubicados en los sitios hidráulicamente más representativos del sector y 4 medidores de caudal localizados a la salida de los tanques Estadio (encargado

de alimentar el sistema), Bienestar, Regadero (que se alimentan del Tanque Estadio y suministran agua potable a otra zona de la ciudad) y en la Glorieta de San Francisco, que se utilizó como punto de control de las demás medidas.

A continuación se describen en detalle cada una de los pasos que se adelantaron durante el desarrollo del Plano Óptimo de Presiones de esta red, de acuerdo con el algoritmo presentado en la Figura 1.

3. Pasos para la determinación de un Plano Óptimo de Presiones

3.1. Recolección y procesamiento de información

Corresponde a la etapa más importante dentro de la determinación del Plano Óptimo de Presiones de cualquier sistema de distribución, ya que durante ésta se recopilan los datos que sirven de soporte para la modelación hidráulica y para la toma de decisiones. Su importancia radica en el hecho en que la calidad y cantidad de la información influye directamente en la confiabilidad y eficacia de los resultados encontrados.

La información necesaria para la elaboración de un Plano Óptimo de Presiones de una red de distribución se clasifica de acuerdo con su naturaleza en: Topológica, topográfica, de micromedición y de macromedición. Si bien la recopilación de información es una de las primeras actividades que deben adelantarse, su desarrollo se extiende a lo largo de todo el proyecto debido a la naturaleza dinámica de las variables que influyen en el comportamiento de una red de distribución.

- **Información topográfica:** Conformada por planos, esquemas o imágenes encargadas de reproducir la forma y elevación del terreno en el que se encuentran ubicadas las tuberías. En el caso del Distrito Estadio, la información topográfica consistió en una serie de planos en formato *.dwg provenientes de distintas fuentes como el Instituto Geográfico Agustín Codazz (IGAC) y consultores privados, los cuales tenían información de curvas de nivel, cuya información de elevación estaba consignada en un texto ubicado sobre las respectivas líneas. Para convertir estos archivos bidimensionales en elementos de trabajo tridimensionales fue necesario un proceso de edición y ajuste, logrando así construir la superficie presentada en la **Figura 2**.

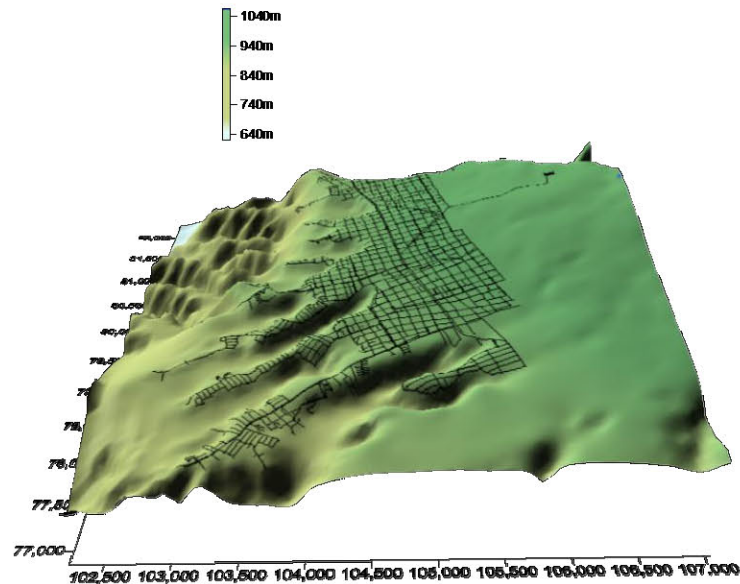


Figura 2. Superficie topográfica del distrito estadio.

- **Información topológica:** Encargada de representar cada uno de los elementos que componen el sistema de distribución, la información topológica se obtiene a partir de diferentes fuentes como planos digitales, impresos, apuntes, archivos planos. En el caso del Distrito Estadio, la mayor parte de la información topológica se obtuvo a partir del sistema de información del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. a través de archivos magnéticos.
- **Información de micromedición:** Consiste en la lectura de los medidores de caudal ubicados a la entrada de los predios de cada uno de los suscriptores de la red. A lo largo de este proceso es normal que se presenten inconsistencias en algunas mediciones, por lo que es necesario realizar un proceso de depuración y corrección de algunas situaciones. Para afrontar esta situación, la Universidad de los Andes desarrolló una herramienta llamada **MICROMIDE** la cual se encarga de corregir las inconsistencias que se puedan presentar. Algunas de las situaciones más comunes, son aquellas mediciones cuyos valores reportados son excesivamente elevados para el tipo de uso que reporta el suscriptor, o aquellos usuarios que reporten consumos negativos; en cuyos casos se asigna el promedio histórico asociado a cada cuenta.
- **Información de macromedición:** Dentro de esta categoría se agrupa el conjunto de mediciones de presión y caudal que se realiza a lo largo y ancho de la red de distribución para su monitoreo y seguimiento. Las mediciones deben realizarse de forma continua, para lo cual se utilizan sensores electrónicos de alta precisión que permiten medir y conocer con gran detalle la evolución del sistema frente a cualquier cambio en la operación. Sin embargo, debido a la complejidad de los sistemas de distribución y a la duración de los períodos de muestreo (que en ocasiones puede ser de varias semanas), la información recolectada en campo debe ser sometida a un proceso de depuración para encontrar así el comportamiento más significativo en cada punto. Para lograr lo anterior, la Universidad de los Andes desarrolló una herramienta que filtra y procesa los datos recolectados en campo y

encuentra el los valores promedio de las mediciones de campo. Dicho programa se conoce con el nombre de **PROCESADOR DE SERIES**.

Como se aprecia en la Figura 3, el programa elimina los eventos poco representativos o los errores de medición que se encuentran alejados del comportamiento típico y crea una banda de confianza al interior de la cual se encuentra la mayoría de los datos.

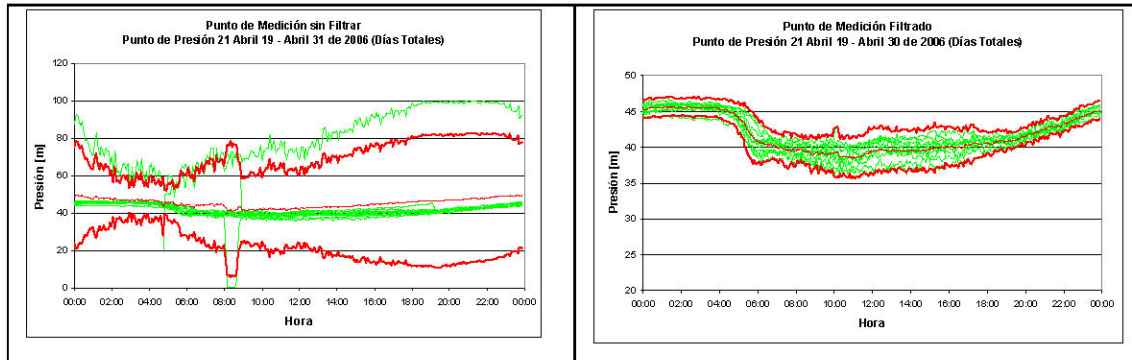


Figura 3. Comparación entre una medición de presión sin filtrar y luego de ser procesada.

Como se mencionó anteriormente, al interior de la red del Distrito Estadio se instaló un total de 4 medidores de caudal y 20 de presión, los cuales permitieron establecer perfectamente el balance de masa y energía de las diferentes zonas a través de los distintos estados de operación a los que fue sometido.

3.2. Montaje del modelo hidráulico

Elaborado a partir de la información topográfica, topológica de micromedición y de macromedición, el modelo hidráulico constituye una herramienta indispensable en el diseño y operación de todo sistema de distribución de agua potable, ya que permite estimar con precisión el efecto y alcance de cualquier modificación o ajuste planteado. El proceso de transformación de la información de entrada en un modelo hidráulico operativo es un trabajo dispendioso compuesto por varias etapas, para las cuales la Universidad de los Andes ha desarrollado algunos programas que facilitan su elaboración.

- **Revisión de errores topológicos:** Comúnmente los planos de los elementos de las redes de distribución fueron construidos como meros elementos gráficos, cuya única función es representar la ubicación espacial de los elementos ubicados en terreno. Sin embargo cuando se quiere construir un modelo hidráulico, se requiere que todos los elementos simulados estén muy bien representados, por lo que debe hacerse un análisis detallado de su estado en los planos. Para realizar esta tarea, la Universidad de los Andes desarrolló en Autocad Land un programa que evalúa todas las tuberías de las redes, encontrando gran cantidad de errores como falta de tuberías entre accesorios o falta de nodos en algunos tramos, lo que ocasionará problemas en la simulación hidráulica (ver Figura 4).

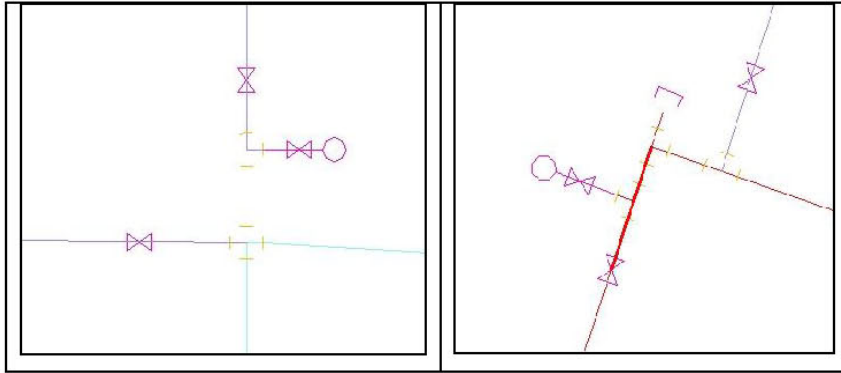


Figura 4. Errores topológicos típicos en los planos de una red de distribución.

- **Construcción del archivo *.INP:** Una vez se depuran y corrigen los errores topológicos del plano de las redes, se procede a transformar los planos topológicos y topográficos de todo el sistema en un archivo *.INP (que contiene el modelo hidráulico), mediante el uso de un programa en Autocad Land, desarrollado por la Universidad de los Andes que consolida y procesa toda la información (Ver Figura 5).

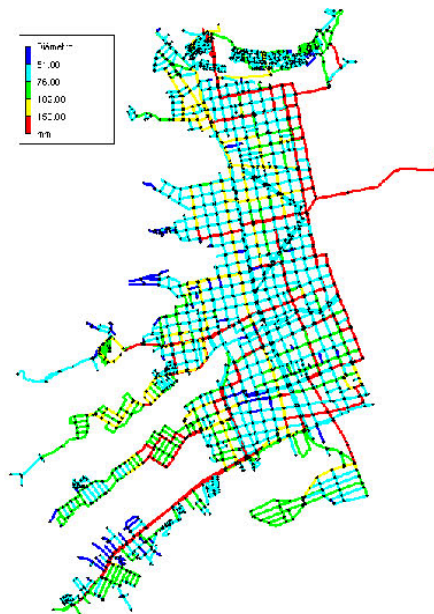


Figura 5. Modelo hidráulico del Distrito Estadio.

- **Asignación de demandas y patrones de consumo:** Para asignar los consumos que cada uno de los suscriptores reportados ejercen sobre el sistema, la Universidad desarrolló un programa llamado **ASIGNA** que procesa los caudales producto de la micromedición y los distribuye a los nodos de consumo del modelo de acuerdo con su ubicación geográfica. El resultado de este programa es un plano en el que se representan los usuarios y el sitio de la red al que fueron asignados sus consumos, conocido como Plano Estrella. De igual forma, para representar la variación de la demanda a lo largo de todo el día, se construyen patrones de consumo a partir de los resultados de la macromedición de caudal a la entrada de las zonas.

3.3. Calibración del modelo hidráulico

Si bien el modelo hidráulico construido hasta el momento, se encuentra elaborado con información muy completa y exacta, existe un conjunto de variables que gobiernan su comportamiento, las cuales deben ser ajustadas para garantizar que éste reproduzca correctamente el comportamiento medido en campo y pueda ser utilizado como herramienta operativa. La calibración de los modelos de los sistemas de distribución es un problema de tipo NP Duro, debido a lo cual se requieren métodos especiales para lograr una buena aproximación a su respuesta. Para afrontar esta problemática, el CIACUA (Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes) ha desarrollado durante los últimos años gran cantidad de estudios, a través de los cuales se han encontrado resultados importantes, en las redes en que se ha implementado.

Uno de los resultados más importantes encontrados a lo largo de dichos estudios es el desarrollo de una metodología estructurada, que analiza y clasifica las variables que influyen en el problema de acuerdo con sus características y efectos sobre el sistema (ver Figura 6).

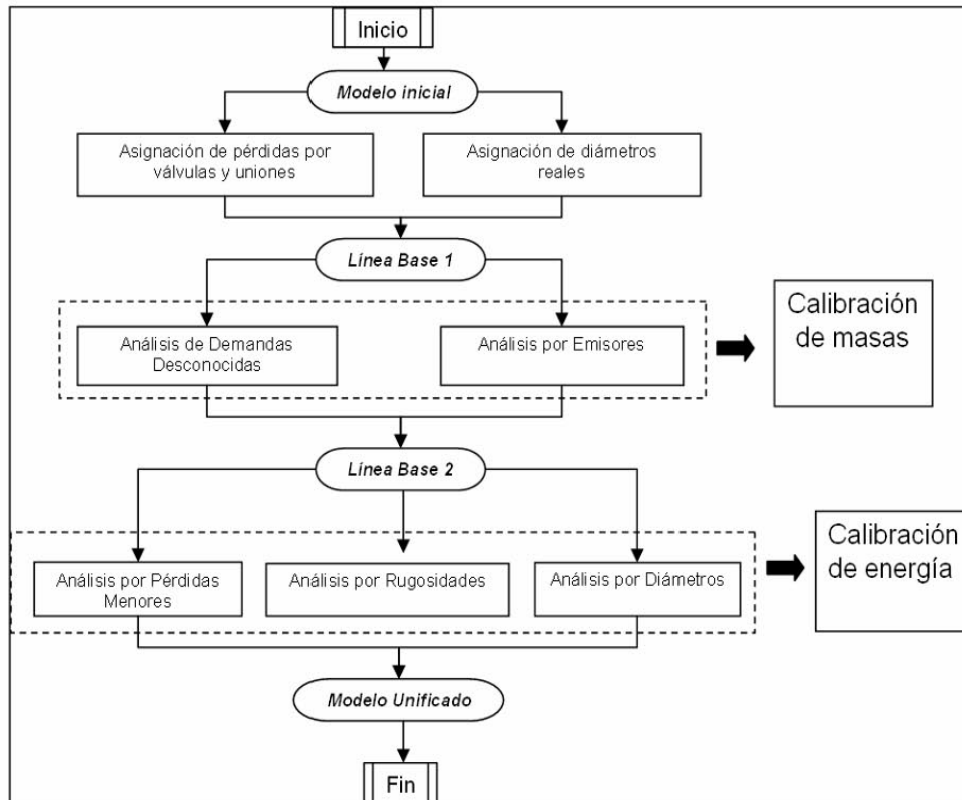


Figura 6. Algoritmo de calibración del CIACUA.

Una de las características más importantes de este algoritmo de calibración es que analiza inicialmente las variables que influyen en el transporte de masas del sistema en busca de problemas asociados tanto a pérdidas comerciales (análisis por Demandas Desconocidas) como a pérdidas técnicas (análisis por Emisores). Una vez estudiado el efecto de éstas sobre la red de forma independiente, se procesan de forma

conjunta, cuyos resultados se fusionan en el modelo Línea Base 2. Este modelo se encuentra en capacidad de reproducir correctamente la evolución de los caudales en los diferentes sectores del sistema y presenta una buena aproximación del comportamiento de las presiones, las cuales serán analizadas en los análisis por Diámetros, Rugosidades y Pérdidas Menores; para ser finalmente ajustadas en el Modelo Unificado. El CIACUA utiliza diferentes métodos para el desarrollo de los distintos análisis para cada una de las variables mencionadas, las cuales van desde un simple rastreo manual, hasta la exploración a través de técnicas de Inteligencia Artificial como los Algoritmos Genéticos.

Para la calibración de las redes del Distrito Estadio, se dividió el sector en un conjunto de 20 zonas de acuerdo con su comportamiento hidráulico, a los cuales se les estudió la respuesta del modelo frente a la variación de los parámetros de calibración mencionados. De este proceso se destaca la necesidad de agregar Demandas Desconocidas a algunas zonas y Emisores a otras, para ajustar las curvas de masa y energía medidas en campo. En la Figura 7 se presenta la división que se realizó a la zona y los factores multiplicadores de la demanda y coeficientes de emisor que fueron necesarios para completar el proceso de calibración.

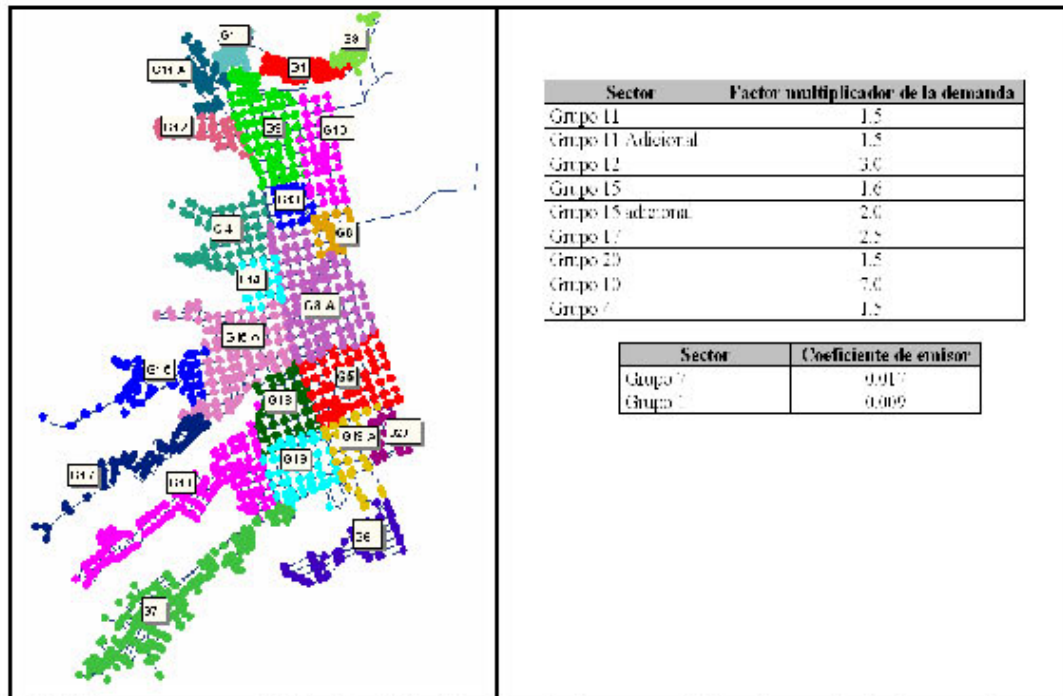


Figura 7. División en grupos del Distrito Estadio y los factores multiplicadores de la demanda y coeficientes de emisor utilizados en la calibración.

3.4. Variación en el régimen de presión

La implementación de un Plano Óptimo de Presiones es un proceso que debe desarrollarse de forma paulatina, de modo tal que se pueda hacer un seguimiento a la respuesta del sistema frente a los cambios de presión. Igualmente este proceso permite establecer la relación entre la disminución del Índice de Agua No Contabilizada (IANC) y la variación de la presión, lo cual es un indicativo de la presencia de pérdidas técnicas.

En el caso del Distrito Estadio se instaló un total de tres estaciones reguladoras de presión a través de las cuales se crearon tres regímenes de presión conocidos como presión alta, media y baja.

3.5. Validación del modelo hidráulico

Si bien a través del proceso de calibración se logra reproducir adecuadamente las mediciones de presión y caudal encontradas en campo, es necesario realizar un análisis posterior a través del cual se garantice que la configuración de la red obtenida no sea una respuesta local que sólo represente adecuadamente un grupo de mediciones. Para lograr esto en el modelo del Distrito Estadio, se utilizaron las mediciones obtenidas durante los regímenes de presión medio y bajo para validar los resultados de la calibración, realizada con las mediciones del régimen de presión alto. Los resultados encontrados en esta fase fueron satisfactorios, lo cual da plena confianza en el empleo del modelo hidráulico en cualquier labor.

3.6. Materialización del Plano Óptimo

Una vez establecido el régimen de presión bajo y con la ayuda del modelo hidráulico calibrado y validado de las redes, el siguiente paso a desarrollar es establecer el conjunto de actividades y obras que deben realizarse para todos los nodos de la red tengan la menor presión posible, garantizando la correcta prestación del servicio durante todo momento. En la actualidad el CIACUA utiliza una amplia variedad de técnicas y análisis para determinar cuáles son los cambios que deben implementarse para alcanzar este objetivo. Algunos de los análisis aplicados se basan en el estudio del comportamiento hidráulico de cada una de los elementos que conforman el sistema, mediante el cual es posible establecer reposiciones o conexiones que permiten ajustar la distribución de presiones y optimizando el comportamiento de la red. Otros análisis se basan en conceptos de energía, como es el caso del Índice de Resiliencia, el cual fue definido por Todini (2000) como la relación entre el poder por unidad de peso disipado por la red de acueducto y el poder por unidad de peso disponible para ser disipado.

4. Resultados encontrados en el Distrito Estadio

A continuación se presentan algunos de los resultados más destacados encontrados durante el desarrollo del Plano Óptimo de Presiones del Distrito Estadio.

- **Construcción y calibración del modelo hidráulico de la zona:** A partir de toda la información recopilada se construyó un modelo detallado de todo el Distrito Estadio, el cual podrá ser utilizado en el futuro como herramienta operativa en la toma de decisiones.
- **Detección de errores de lectura en el medidor principal:** Durante el proceso de calibración del modelo hidráulico se detectó un desbalance muy importante en los caudales reportados por los medidores y los valores arrojados por el modelo. Para corregir esta situación se encontró que era necesario incrementar las demandas del Grupo 10 del modelo 7 veces (ver Figura 7), lo que representa la presencia de un problema grande de micromedición, un fraude considerable o un error de

macromedición. Después de descartadas las dos primeras posibilidades se revisó por parte del **amb** el comportamiento del medidor ubicado a la salida del Tanque Estadio y se encontró descalibrado en la cantidad que sugería el modelo.

- **Detección de errores topológicos:** Durante el proceso de construcción y calibración del modelo hidráulico se encontraron inconsistencias en los valores medidos y los simulados debido a la presencia de conexiones y elementos desconocidos hasta el momento por la empresa, que afectaban el comportamiento hidráulico de las redes.
- **Ubicación tentativa de problemas técnicos y comerciales:** A partir del proceso de calibración se ubicaron factores multiplicadores de la demanda y coeficientes de emisor en distintos sectores de la red, de acuerdo con las mediciones de campo y los resultados del modelo hidráulico. A partir de estos resultados, el amb adelantó algunos procesos de inspección en campo, encontrando una cantidad considerable de fugas en inmediaciones del grupo 7, tal como lo había reportado el modelo.
- **Disminución del las presiones:** Como resultado directo de la implementación de las estaciones reguladoras de presión al interior del sistema, se logró una disminución muy significativa en las presiones de los nodos, la cual en promedio se encuentra sobre los 20 m.c.a.; aunque en algunas zonas, durante las horas de menor consumo, se alcanzaron valores cercanos a los 40 m.c.a.

5. Bibliografía

- CIACUA, "Informe final del Proyecto Plano Óptimo de Presiones del Distrito Estadio de la Red de Distribución del Municipio de Bucaramanga", Bogotá, 2006.
- Saldarriaga Juan, "Hidráulica de Tuberías", McGraw-Hill, Bogotá Colombia, 2007.
- Rossman Lewis, User's manual EPANET, USA, EPA, 1999.
- CIACUA, "Informe final del proyecto Plano Óptimo de Presiones de los Municipios de Andalucía, Ansermanuevo, Bolívar, Bugalagrande, Candelaria, Ginebra, Guacarí, La Cumbre y Toro.", Bogotá, 2006.
- Sisa, Augusto. "Análisis de parámetros para la calibración de redes de tuberías con algoritmos genéticos". Tesis de maestría, Universidad de los Andes, 2003.
- Salas, Daniel. "Evaluación de métodos de inteligencia artificial para calibración de redes de acueducto". Tesis de maestría, Universidad de los Andes, 2003.