

Optimización de redes abiertas a presión, utilizando el modelo de las redes parciales sucesivas. Programa de computador utilizando la plataforma AutoCAD

ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ

Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Profesor de la Maestría en Ingeniería Civil y de la Especialización en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

ÁLVARO HERNÁN CARDONA

Ingeniero sanitario de la Universidad del Valle. Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

ERNESTO RIVEROS OSPINA

Ingeniero Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Artículo recibido: 9/06/2008
Evaluación par interno: 15/10/2008
Aprobado: 17/10/2008

Resumen

En el diseño de redes abiertas de distribución a presión se deben satisfacer, de acuerdo con unas necesidades, las condiciones de suministro establecidas.

La primera condición que se impone es garantizar, desde el punto de vista del diseño hidráulico, el suministro de los caudales y las presiones mínimas exigidas en los puntos de toma de la red.

La segunda condición que impone la selección de la solución definitiva es que, satisfechas las condiciones hidráulicas (caudales y presiones), la red diseñada debe ser aquella cuyo costo es mínimo. La evaluación simultánea de los parámetros hidráulicos y los costos de la red convierten el análisis del sistema en un problema de optimización, en el que satisfechos los condicionantes hidráulicos se asegura que la red, de todas las posibles, es de costo mínimo.

La solución de este tipo de problemas, en particular el de las redes abiertas a presión, se hace generalmente mediante técnicas de programación lineal que exigen la utilización de un computador. El desarrollo de este modelo de redes abiertas es semejante al desarrollo que tiene un árbol y parte del punto del tallo donde termina la raíz (punto de suministro). Desde este punto comienzan una serie de derivaciones o ramales que se inician en un nodo y donde las tuberías que se desprenden se asemejan a las ramas que terminan en el siguiente nodo.

En este trabajo, utilizando para la optimización el método de las redes parciales sucesivas, se desarrolla una nueva aplicación que se

ha implementado en el ambiente gráfico AutoCAD, para facilitar el manejo de la red y el análisis de los resultados. El programa diseñado toma cada uno de los elementos y los maneja como un objeto específico, que se relacionan mediante tuberías y nodos de suministro y derivación.

El modelo se dividió en dos partes principales: las características sobre tuberías comerciales, que se presentan de acuerdo con los diámetros (costos, rugosidad y velocidades máximas y mínimas permitidas) y la topología de la red abierta (representada por tramos de tubería y nodos). La información correspondiente a las tuberías se implementó en un archivo de Excel y la información de la red en el ambiente de AutoCAD, utilizando así el potencial más relevante de cada uno de los paquetes usados.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de cálculo y diseño en las diferentes áreas de la ingeniería requieren el uso cada vez más frecuente del computador, de tal manera que se ha hecho necesario el desarrollo de programas aplicativos especializados, con el fin de mejorar el desempeño y obtener un producto que satisfaga todas las necesidades planteadas.

Desde que se introdujo el uso del computador en los trabajos de ingeniería se han incorporado varias técnicas de programación. Así por ejemplo con el lenguaje Fortran se realizaban programas por módulos, cada uno encargado de hacer cálculos específicos. Con el avance de la programación, e incentivado por el Windows, se popularizó el uso de objetos y eventos en la programación. Adicionalmente, las librerías y muchas otras herramientas de programación facilitan el desarrollo de programas más específicos.

Entre las técnicas de programación se desarrolló una para el manejo de la información que se conoce con el nombre de “árboles binarios”. Esta técnica de programación avanzada se complementa con otra técnica de programación llamada “recursividad”, que facilita el manejo de datos y cálculos.

Tomando como base conceptual el método de optimización de redes parciales sucesivas, se utilizan las técnicas de programación mencionadas, implementadas en AutoCAD mediante el lenguaje VBA (*Visual Basic for Applications*). Se desarrolla así un programa en el que el ambiente gráfico y la máquina de base de datos propios del AutoCAD cumplen un papel importante, permitiendo al usuario dibujar e ingresar la información de la red en un archivo DWG.

Los archivos DWG pueden contener fácilmente el levantamiento topográfico o una imagen 1:1 de la zona donde se debe diseñar la red de distribución. El diseñador dispone de la información topográfica para trazar la red de tuberías, de acuerdo con las características topográficas del terreno.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LAS REDES COLECTIVAS DE RIEGO

El dimensionamiento hidráulico de las primeras redes colectivas de riego se hizo mediante cálculos hidráulicos de tanteo y comprobación. Los condicionantes básicos de diseño eran la cota piezométrica disponible en el punto de alimentación de la red y el caudal de servicio que debía circular por cada ramal. Era evidente que estos condicionantes dejaban el problema indeterminado, permitiendo el dimensionamiento de un gran número de soluciones.

La necesidad de contar con una metodología de cálculo adecuada surgió al comprobar las grandes diferencias de costo que existían entre una y otra solución

adoptada. Debido a lo anterior, se desarrollaron técnicas y normas que permitían un mejor y más rápido ajuste que la metodología de los tanteos indeterminados, pero dichas soluciones seguían estando lejos de la solución óptima. A este segundo grupo de metodologías se las denominó métodos aproximados, cuyos principales criterios condicionantes eran la velocidad máxima recomendable del fluido y el ordenamiento del cálculo de los ramales.

Los métodos de aproximación se remplazaron rápidamente por métodos más eficientes que, además buscaban la solución más económica. Entre estas últimas técnicas se desarrollaron métodos de optimización de redes abiertas a presión, tales como el de la pérdida de carga constante, la programación lineal, los métodos de Labye - Lechapt, el método discontinuo de Labye - Lechapt, el método discontinuo de Labye, las redes parciales sucesivas, la programación dinámica y la condición de óptimo de Lagrange.

FUNDAMENTO DEL MÉTODO DE LAS REDES PARCIALES SUCESIVAS

El método de las redes parciales sucesivas es un método de optimización que evalúa una red abierta a presión desde el punto de alimentación de la red (cabecera de la red) hasta los puntos terminales (cola de la red), desarrollado por Alfredo Granados.

Para llevar a cabo este método de optimización, se debe realizar un proceso inverso al que se efectúa normalmente en el diseño hidráulico de redes a presión. Por lo general el proceso normal de cálculo de redes se lleva a cabo desde los puntos terminales y hacia el punto de alimentación de la red. Se establece de acuerdo con los requerimientos, el caudal, la presión de servicio requerida, el diámetro y las pérdidas de energía de cada tramo, hasta llegar al punto de inicio de la red para determinar posteriormente la cota piezométrica con que debe contar el sistema en este punto para satisfacer en forma adecuada los requerimientos que se tienen a lo largo de la red.

El método de optimización de las redes parciales sucesivas toma como punto de partida la cota piezométrica del punto de inicio de la red, y a partir de este dato determina mediante iteraciones sucesivas el diámetro óptimo con el costo mínimo para cada uno de los tramos evaluados, verificando constantemente

que el caudal y la presión requeridos por los puntos de toma o derivación cumplan con las especificaciones del diseño. Una vez obtenido el diámetro óptimo de un tramo, se da paso al análisis del tramo siguiente aguas abajo, siguiendo los procedimientos tenidos en cuenta para el tramo o los tramos anteriores y así sucesivamente, hasta analizar todos los tramos que componen la red en estudio.

El método se basa en el hecho de que cada iteración realizada en cualquier tramo de la red da como resultado la mejora de las condiciones hidráulicas en cada uno de los tramos de la red que se vean afectados por la variación de dicho tramo en particular.

Lo anterior equivale a establecer que para el proceso de selección de tramos con gradiente óptimo, si se parte de una cota piezométrica fija en el origen, en la red de estudio de cada estado de cálculo se puede prescindir de todos aquellos tramos situados aguas abajo de la primera toma deficitaria de cada ramal. En esta forma nace el concepto de *red parcial*, definida como aquella subred que, partiendo de la cabecera, finaliza en cada posible trayecto en el primer nodo que no verifica las condiciones de presión estipuladas.

El método de optimización parte, entonces, de una solución inicial en la que todos los tramos que conforman la red tienen las velocidades máximas posibles, de acuerdo con los diámetros comerciales disponibles para el diseño de la red. Calculado el caudal que discurre por cada uno de los tramos de la red, se le da a cada tramo un diámetro tal que la velocidad del fluido esté en el límite o en el valor más próximo a éste, por debajo de la velocidad máxima admisible. Este predimensionamiento se realiza desde el punto de toma o de suministro hasta la derivación más alejada o el punto final de cada ramal y corresponde a la solución más económica, que no siempre satisface hidráulicamente las necesidades de cada punto de toma o derivación. Esta red se denomina la solución previa.

Establecida esta solución previa y como se trata de mejorar la presión en los puntos deficitarios de la red, el proceso de optimización se inicia desde el punto de toma hacia el punto final de la red, y para cada caso, el tramo o tramos que siguen al punto de toma tendrán diámetros comerciales disponibles para los que la velocidad no superará el valor máximo establecido en la solución previa, lo cual implica unas ventajas para llevar a cabo el proceso de optimización. Entre

las ventajas que se tienen en este proceso se destacan las siguientes:

- Se parte de un sistema muy próximo a la solución óptima y, por tanto, se tendrá la solución final en un proceso iterativo relativamente corto.
- Permitirá, al encontrar la solución óptima, definir los diámetros comerciales mínimos requeridos y, por tanto, obtener la solución más económica posible.

De acuerdo con lo que se ha presentado, a partir de la red previa (red cuyos tramos tienen las velocidades máximas) se delimita la primera red parcial, la cual está compuesta por el conjunto de tramos que constituyen los trayectos que desde la cabecera conducen por cada ramal al primer nodo de abastecimiento y en el cual se debe tener muy presente que la presión final de un tramo debe ser superior a la presión requerida por los nodos o puntos de toma localizados aguas abajo del tramo estudiado. La red parcial finaliza en aquel nodo en el que no se cumple esta condición. Es necesario, entonces mejorar la presión en este punto deficitario, reduciendo las pérdidas de energía de cualquiera de los tramos ubicados aguas arriba de este punto.

Como parte fundamental del proceso de optimización se debe evaluar el costo marginal de la mejora de la presión conseguida en un tramo mediante la sustitución de un diámetro por su inmediatamente superior, es decir, que para un tramo específico con características hidráulicas definidas con un costo unitario P_1 y pérdidas de energía h_{f-1} , el gradiente de cambio que expresa la sustitución del diámetro 1 por el diámetro 2 con costo unitario P_2 y pérdidas de energía h_{f-2} se expresa así:

$$C = \frac{P_2 - P_1}{h_{f-2} - h_{f-1}} = \left| \frac{\Delta P}{\Delta h_f} \right|$$

El gradiente de cambio C es el índice que señala el encarecimiento unitario que sufre la red cuando se efectúa, en un tramo, la sustitución de un diámetro por otro inmediatamente superior. Al ser C creciente con el diámetro, el cambio óptimo de un diámetro siempre se hará por el inmediatamente superior, ya que cualquier otra combinación sería siempre económicamente más desfavorable.

SISTEMA OPERATIVO

El punto de partida para el análisis de una red por medio del método de las redes parciales sucesivas es el esquema topológico de la red, con los tramos numerados ordenadamente desde el tramo inicial hasta el tramo final. A cada tramo y a cada nudo se les deben conocer las características geométricas e hidráulicas (diámetros, rugosidades, caudales y presiones).

Una vez establecida la cota piezométrica del punto de abastecimiento, se comienza a hacer el cálculo por los tramos que siguen o se derivan del nodo inicial. En estos tramos se debe comprobar que los diámetros empleados tienen la máxima velocidad especificada en los criterios de diseño y que la presión en los nodos existentes aguas abajo sea igual o superior a la requerida en cada uno de ellos. En el caso de que se cumpla este primer objetivo, se continúa analizando tramos aguas abajo hasta que en alguno de los nodos ubicados aguas abajo no se cumpla la especificación de presión mínima requerida o hasta que se llegue al tramo final del ramal en estudio. A este primer tramo analizado se le conoce como “primera red parcial”, ya que es la primera red que se aborda en el cálculo hidráulico.

En esta primera red parcial en algún punto no se están cumpliendo las condiciones hidráulicas requeridas por el sistema. Para superar esta primera red parcial es necesario mejorar la presión en este punto deficitario mediante la modificación del diámetro, por su inmediatamente superior, en uno o varios tramos ubicados aguas arriba del nudo deficitario, sacrificando el costo de la red y teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- En un ramal en que la presión requerida no se obtiene, el gradiente de cambio óptimo C' es el mínimo de los valores C correspondientes a cada uno de los tramos componentes del sistema desde el nodo de abastecimiento o inicial hasta el nodo de derivación que se esté analizando.

$$C' = \min (C_1, C_2, C_3, \dots, C_n)$$

- En una ramificación con varias derivaciones con déficit de carga (ramales en paralelo), el gradiente de cambio óptimo equivalente C'_e del conjunto es igual al valor acumulado de los C'_i correspondientes a cada uno de los ramales derivados con déficit de carga.

$$C'_e = (C'_1 + C'_2 + C'_3 + \dots + C'_n)$$

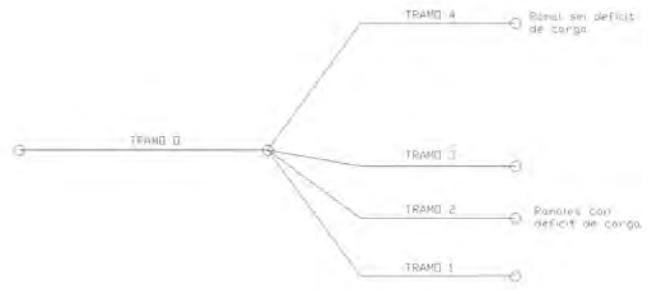


Figura 1. Esquema ilustrativo de una red principal y de redes secundarias.

Es decir, para este último caso se debe evaluar el gradiente de cambio del ramal principal y el gradiente de cambio de los tramos paralelos aguas abajo del ramal principal, y el menor gradiente que se obtenga será la solución óptima buscada.

Las modificaciones de los diámetros óptimos de un tramo se realizan en una proporción adecuada que permita igualar las presiones exigidas en alguno o algunos de los terminales deficitarios (sin sobrepararlos). Así, si el cambio óptimo corresponde a un tramo principal, este cambio debe realizarse en una proporción tal que iguale la presión del menos exigente de las derivaciones, lo que permite pasar a la siguiente red parcial. Si el cambio óptimo corresponde a los ramales derivados, se modificará el tramo seleccionado en cada uno de ellos. Sólo se efectuará el cambio total del diámetro cuando con ello no se rebase la presión exigida aguas abajo.

El procedimiento descrito anteriormente se debe repetir para cada red parcial del sistema hasta completar la totalidad de las redes componentes del sistema.

La aplicación operativa del método de las redes parciales sucesivas se resume en un conjunto de normas generales que recopilan las bases fundamentales del método:

- En ningún tramo de la red se puede superar la velocidad máxima establecida en los criterios de diseño.
- La presión al final de un tramo debe ser siempre igual o superior a la exigida en cualquier punto aguas abajo.

- El cálculo de la red se debe hacer siempre de cabeza a cola, dimensionando, para la solución previa, cada tramo con el menor diámetro comercial admisible.
- Se define por red parcial aquella de máximo avance posible en todas sus ramificaciones, hasta encontrar un tramo en cada ramal que no verifique la condición mínima de presión exigida.
- El paso de una red parcial a otra consecutiva mayor se realiza aumentando uno o varios diámetros de sus tramos aguas arriba, hasta cumplir estrictamente con el valor de la presión en alguno o algunos de los que previamente no la verificaban. Los tramos en que se aumenta el diámetro son aquellos en los que se recupera la pérdida de carga excedente al menor costo posible ($\Delta P/\Delta H$ mínimo).
- En la determinación de los tramos óptimos de cambio de diámetro influye la posición de estos en la red. Para mejorar las pérdidas de carga da igual aumentar el diámetro en un tramo de aguas arriba de una ramificación, que en la totalidad de los ramales derivados que tienen déficit de carga.

BASE CONCEPTUAL DE LA PROGRAMACIÓN DEL MÉTODO DE LAS REDES PARCIALES SUCESIVAS.

Para el desarrollo de la aplicación de las redes parciales sucesivas se ha utilizado la programación por objetos y eventos en el lenguaje Visual Basic de Windows, en formatos con botones, ventanas de entradas de datos, menús de selección donde se controla la tecla tabuladora, el cursor del ratón y las teclas que se opriman. Esta programación permite agrupar en una variable objeto, funciones, subrutinas, procedimientos, variables de enteros, reales que pueden ser visibles o invisibles al usuario del objeto.

El uso del lenguaje Visual Basic para aplicaciones (VBA), de Microsoft, permite también programar los productos de Autodesk como AutoCAD, con lo cual es posible disponer de una herramienta gráfica para el manejo de la geometría de la red. Mediante Excel es posible almacenar toda la información sobre precios y características físicas de las tuberías comerciales.

Teniendo en cuenta las ayudas disponibles y el proceso operativo de cálculo establecido en las redes parciales sucesivas para el desarrollo del programa se establecieron objetos, funciones o subrutinas, árboles

multimodales que definieron el algoritmo base con las siguientes características:

- Objetos básicos

Objeto tubo. Guarda toda la información relacionada con un tramo de la red (nudo inicial y final, longitudes, diámetros, presión, velocidades, etc.)

Objeto nodo. Almacena la información correspondiente al punto de suministro de la red (localización, cota topográfica y cota de alimentación) y a los puntos de conexión de los tramos de ésta.

Con esta estructura, el algoritmo se ha dividido en tres partes básicas: entrada de datos, procesamiento de la información y salida de datos.

La entrada de información de nodos y tuberías se hace directamente en el ambiente gráfico de AutoCAD, y una vez definidas las coordenadas, la información restante se introduce mediante un cuadro de diálogo.

El procesamiento de la información se hace mediante una subrutina que permite, de cabeza a cola, realizar el recorrido de la red para los valores de caudales y presiones. Mediante condicionales se desarrolla el proceso operativo de las redes parciales sucesivas.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROGRAMA

La operación del programa es muy sencilla. La interfaz gráfica con AutoCAD le permite al usuario realizar directamente el dibujo e ingresar la información de la red que se quiere calcular y optimizar.

Una vez instalado el programa de optimización de redes abiertas a presión, el acceso se hace desde AutoCAD mediante el comando PGRD, que activa la pantalla inicial que se presenta en la figura 2.

Al continuar con la ejecución del programa se presenta una segunda pantalla (figura 3), en la que se presenta el menú disponible para dibujar la red, ingresar toda la información geométrica, hidráulica y de costos de las tuberías y de la red, mostrar la información mediante tablas o gráficos, y efectuar el proceso de cálculo y optimización del sistema.



Figura 2. Pantalla inicial del programa de optimización de redes abiertas, el cual se ejecuta desde AutoCAD.

En este menú principal, el ingreso de los datos se debe iniciar con los nodos de la red; empieza con el nudo de suministro y se continúa ordenadamente, hasta los puntos terminales, con todos los nodos que permiten configurar los tramos y los ramales de la red. Cada vez que se inserta un nodo, se despliega un cuadro en el que se ingresa la información sobre la cota, presión y caudal.

En la opción “mostrar información” es posible seleccionar la información que se desea visualizar en AutoCAD (por ejemplo, la identificación de cada nodo).

En la figura 4 se presentan algunos de los recuadros que permiten ingresar y manejar la información de la red.

Una vez que se han finalizado el dibujo de la red y el ingreso de la información, es necesario acceder a la base de datos mediante la opción del menú “evaluar costos”. Se despliega una hoja de Excel en la que se encuentra toda la información relacionada con los precios unitarios de la tubería, de la instalación, velocidades máximas, que se debe actualizar de acuerdo con los requerimientos de la red que hay que optimizar.

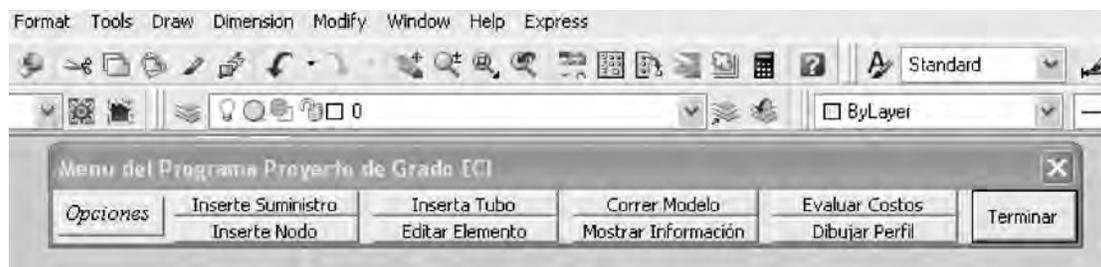


Figura 3. Pantalla con el menú principal desplegable. En este menú se presentan todas las opciones que brinda el programa para optimizar redes abiertas a presión.

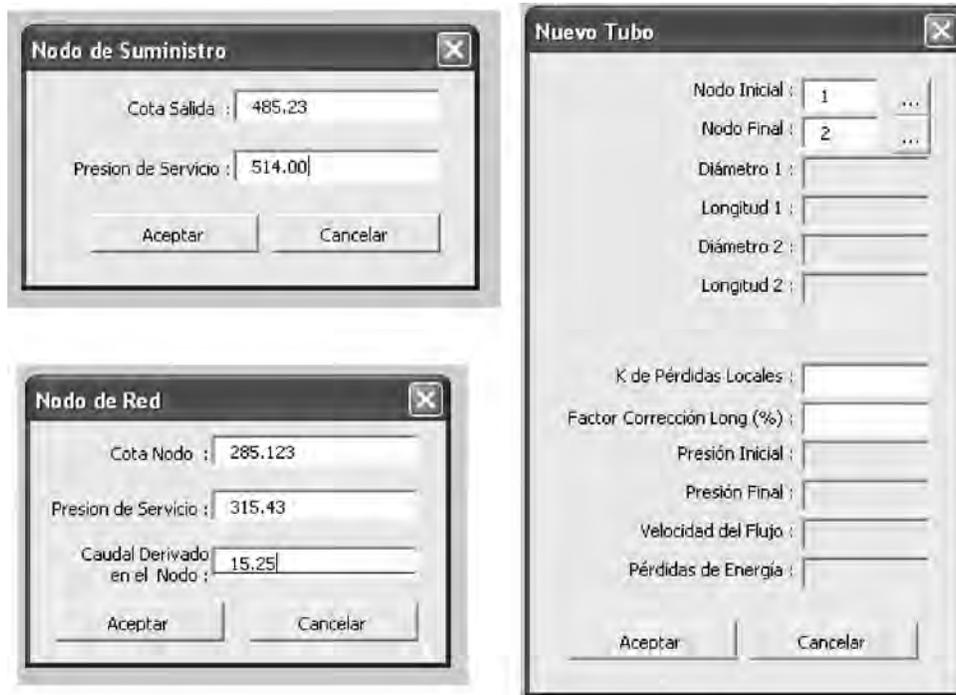


Figura 4. Algunas ventanas que maneja el programa de optimización de redes abiertas para el ingreso de la información.

Finalizada esta última etapa del programa, se realiza el proceso de optimización de la red utilizando el menú “correr modelo”. El resultado final de este proceso del programa determina, para los caudales exigidos en los diferentes tramos, el diámetro de cada tramo y la presión disponible en cada nudo para la red, cuyo costo es mínimo. La información que arroja el modelo se puede presentar mediante tablas o gráficamente y queda consignada en un archivo .dat.

En la figura 5 se presenta el esquema de una red abierta, dibujada en AutoCAD y analizada con esta nueva herramienta de optimización.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo *optimización de redes abiertas* a presión, de los que existen muy pocos para uso de dominio público, es una moderna y poderosa herramienta de cálculo hidráulico en la que la solución final corresponde a la red de costo mínimo de todas las posibles soluciones. Es útil en el diseño de sistemas para suministro de agua potable en edificaciones, redes de incendio, redes de suministro de agua potable en la zona rural y redes colectivas de riego.

En la actualidad, el diseño de estos sistemas se realiza para cumplir solamente con los requerimientos de caudales y presiones y se dejan a un lado los costos de construcción, mantenimiento y operación de ésta.

En este modelo que se presenta a la comunidad y cuyo proceso de optimización utiliza el método de las redes parciales sucesivas, el diseño de una red es integral porque aparte de cumplir con los requerimientos hidráulicos, asegura que la red diseñada es de costo mínimo.

Desde el punto de vista hidráulico el modelo es versátil, evalúa pérdidas de energía debidas a la fricción utilizando diferentes ecuaciones como Darcy, Manning y Hazen Williams. Igualmente, de acuerdo con las características de las redes abiertas, el modelo está en capacidad de definir caudales, teniendo en cuenta la simultaneidad de funcionamiento de los puntos de toma.

Desde el punto de vista gráfico, el diseño óptimo de una red viene acompañado con la obtención de los planos correspondientes en formato DWG.

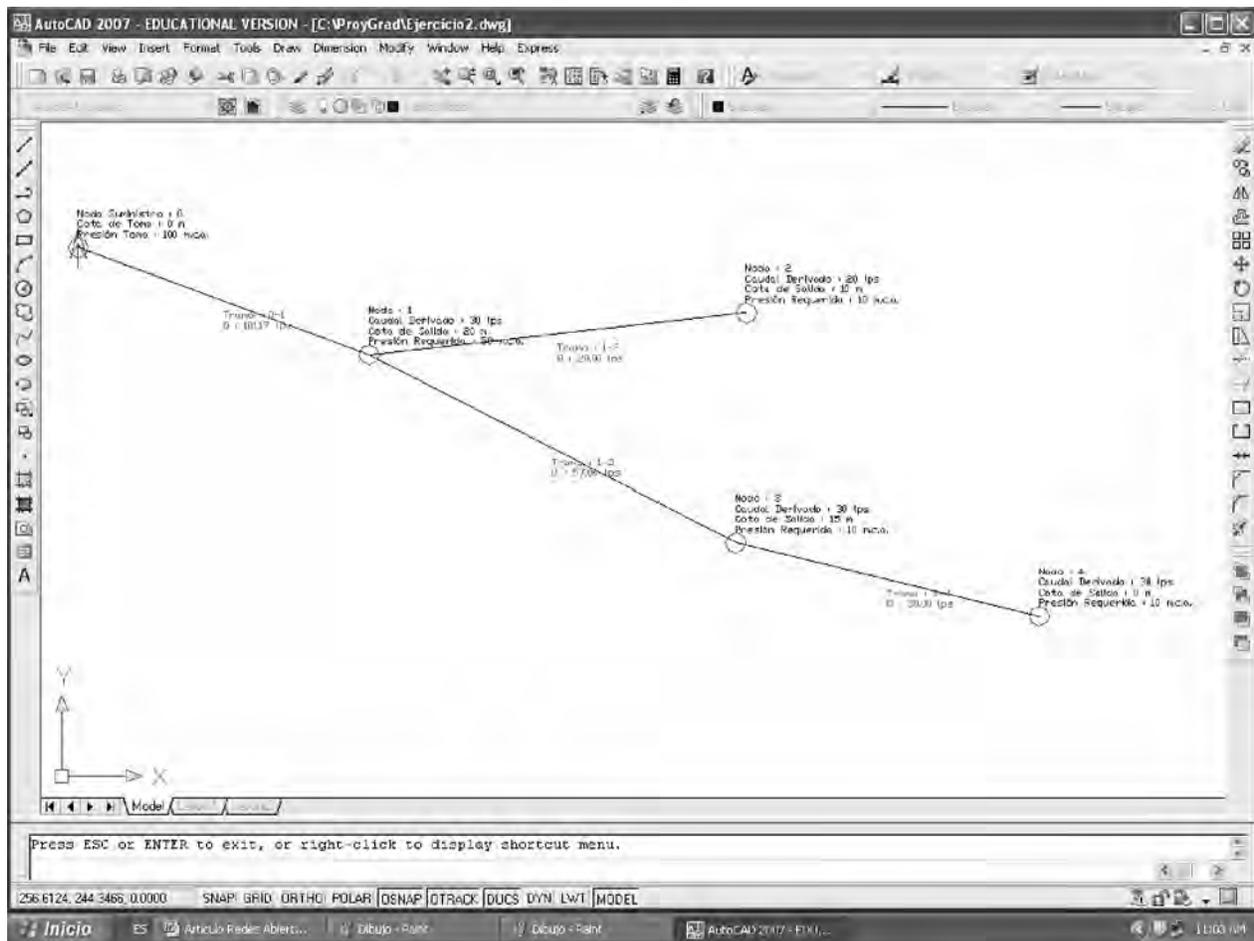


Figura 5.

BIBLIOGRAFÍA

- Redes Colectivas de Riego a Presión (1986). *ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*. Madrid.
- Técnica y Tecnología del Riego por Aspersión (1981). España: Ministerio de Agricultura.
- Un méthode de recherche opérationnelle pour l'étude des réseaux d'irrigation sous pression. Girette.
- Rodríguez Díaz, Héctor Alfonso. *Diseños hidráulicos, sanitarios y de gas en edificaciones*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Labye-Lechapt. Méthodes permettant de déterminer les caractéristiques optimales d'un réseau de distribution de'eau. Boletín 50.
- Design of optimal hydraulics Networks (1968). Jacoby.
- Rodríguez Díaz, Héctor Alfonso. Apuntes del curso Sistemas a presión de la Maestría en Ingeniería Civil y de la Especialización en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente de la Escuela.