

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Sistema de cómputo para el análisis y diseño óptimo de redes de distribución de agua potable.
<i>Autor / Adscripción</i>	Velitchko G. Tzatchkov Jorge Izurieta Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 11(2): 55-63
<i>Fecha de publicación</i>	1996
<i>Resumen</i>	Se presenta un nuevo sistema de cómputo, que automatiza y optimiza el diseño de redes de agua potable, con las siguientes posibilidades: digitalización, análisis estático y dinámico, selección óptima de los diámetros, diseño de cruceros, cálculo del costo, despliegue de los resultados en tablas y gráficas, isolíneas, superficies piezométricas, impresión de los resultados, dibujo de planos del proyecto ejecutivo. El sistema divide al plano de la localidad en un mosaico de segmentos según la escala deseada, con lo cual puede procesar proyectos de ciudades grandes en escalas de proyecto ejecutivo.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1265

Sistema de cómputo para el análisis y diseño óptimo de redes de distribución de agua potable

Velitchko G. Tzatchkov
Jorge Izurieta

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Se presenta un nuevo sistema de cómputo, que automatiza y optimiza el diseño de redes de agua potable, con las siguientes posibilidades: digitalización, análisis estático y dinámico, selección óptima de los diámetros, diseño de cruceros, cálculo del costo, despliegue de los resultados en tablas y gráficas, isolíneas, superficies piezométricas, impresión de los resultados, dibujo de planos del proyecto ejecutivo. El sistema divide al plano de la localidad en un mosaico de segmentos según la escala deseada, con lo cual puede procesar proyectos de ciudades grandes en escalas de proyecto ejecutivo. El sistema corre dentro de AutoCAD 12. Para el cálculo hidráulico de la red se utiliza la solución de Newton-Raphson con incógnitas en las cargas piezométricas de los nodos. En el análisis dinámico se ejecuta el cálculo hidráulico para cada hora del día considerando la variación de la demanda y el llenado y vaciado de los tanques. La selección de los diámetros se realiza por un procedimiento de enumeración de variantes, guiándose por el cumplimiento de las condiciones hidráulicas de velocidades admisibles y presión requerida.

Palabras clave: sistema de cómputo, análisis y diseño, redes de distribución, agua potable, automatización, solución Newton-Raphson, planos a escala.

Introducción

Existe una gran cantidad de programas de cómputo para el cálculo hidráulico de redes de distribución desarrollados en diversos países con diferentes grados de complejidad, (Wood, 1991; CYBERNET, 1992; Walski, *et al.*, 1990). Algunos de ellos solamente se pueden aplicar al análisis de flujo permanente (análisis estático), otros realizan también análisis de periodos extendidos (análisis dinámico), y unos pocos, (Walski, *et al.*, 1990), incluyen el diseño de costo mínimo (determinación de los diámetros de los tramos nuevos). Recientemente el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, ha desarrollado los siguientes tres programas:

- AH (Análisis hidráulico). Ejecuta un análisis estático de la red
- AHPE (Análisis hidráulico de periodos extendidos). Realiza un análisis dinámico de la red con una curva de variación de la demanda proporcionada por el usuario. Se incluye el análisis del llenado y vaciado de tanques en la red

- DR (Diseño de redes). Selecciona los diámetros en los tramos nuevos de la red, cumpliendo con las condiciones de presión mínima en todos los nodos, velocidad máxima en los tramos y costo mínimo de las tuberías nuevas

Estos programas, de manejo amigable y que corren en computadoras personales, están incluidos en el tomo *Redes de distribución* del nuevo *Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento de la Comisión Nacional del Agua de México*, (Tzatchkov, 1994).

Los programas de análisis y diseño hidráulico, no obstante su indiscutible utilidad, solamente solucionan una parte del proyecto o estudio de un sistema de agua potable. El presente trabajo describe el *Sistema de cómputo para análisis y diseño de redes de distribución*, SCADRED, que integra los programas AH, AHPE y DR con la posibilidad de digitalizar el esquema de la red, el diseño automatizado de cruceros, el cálculo del costo y el dibujo de los planos del proyecto ejecutivo. El sistema automatiza el proceso de dise-

ño y permite en un tiempo breve elaborar un proyecto integral de agua potable. La ejecución del sistema se realiza dentro de AutoCAD 12.

Posibilidades del sistema

- Digitalización de los planos de agua potable, incluyendo la planimetría de calles y el trazo de tuberías
- Actualización de la información digitalizada, y edición de los datos sobre el dibujo de AutoCAD o en tablas
- Extracción automática de la información digitalizada para fines de cálculo hidráulico y diseño
- Análisis estático de la red digitalizada
- Análisis dinámico
- Selección de diámetros de tramos nuevos en redes nuevas o rehabilitaciones
- Manejo de hasta mil nodos y mil tramos de red primaria en los cálculos hidráulicos.
- Consideración de tanques y bombeo directo en los cálculos
- Diseño automático de los cruceros
- Edición manual de los cruceros
- Cuantificación y costo de piezas especiales y tuberías
- Isolíneas de terreno, presión y elevación piezométrica
- Superficies piezométricas tridimensionales
- Gráficos de evolución de presión en el tiempo
- Dibujo de planos del proyecto ejecutivo
- Impresión de los resultados

Hasta ahora (noviembre de 1994) se cuenta con dos versiones del sistema: el SCADRED V1 que maneja la Red, en un solo plano y el SCADRED V2 que brinda la posibilidad de dividir, según una escala determinada, el plano de la ciudad en un mosaico cuyas secciones se manejan por separado con sus respectivos nodos, trazo de tuberías, plano de cruceros y cuantificación. El sistema integra la información de la red, contenida en los planos del mosaico, en una red global para fines de cálculo hidráulico. El sistema puede manejar mosaicos que incluyen hasta mil planos, con lo que es posible realizar el diseño y los planos de proyecto de grandes ciudades. El presente artículo trata acerca del sistema SCADRED V2.

Metodología de cálculo hidráulico y diseño

Análisis de flujo permanente

En un problema de análisis de flujo permanente en redes se conocen, primero, los diámetros de todos los

tramos de la red, los niveles en los tanques y las demandas en los nodos y, se busca la distribución de gastos y cargas en la red, en condiciones de demanda y niveles constantes cumpliendo con las condiciones apuntadas en los siguientes párrafos.

El gasto Q y las pérdidas de carga en cada tramo se relacionan con la fórmula de pérdidas de carga utilizada:

$$H_i - H_j = f(Q_{ij}) \quad (1)$$

donde H_i y H_j señalan las cargas en los dos nodos i y j del tramo.

– Balance de gastos y demanda en los nodos:

$$\sum_{j=1}^m Q_{ij} + q_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

donde Q_{ij} es el gasto en el tramo ij , q_i es la demanda en el nodo, N es la cantidad de nodos y m es la cantidad de nodos que concurren al nodo i en consideración. $Q_{ij} = 0$ si no existe conexión entre los nodos i y j . Son válidas también las siguientes condiciones:

Para un nodo i de consumo dado se conoce el valor de q_i .

Para un nodo i de tipo tanque se conoce la carga H_i en el nodo, que es igual a la cota del nivel de agua en el tanque.

Para un nodo de tipo bomba no se conocen la carga ni el consumo, sin embargo los dos están relacionados con la curva de la bomba. En forma general para un nodo de este tipo se puede escribir:

$$q_i = q_i = (H_i) \quad (3)$$

Tzatchkov e Izurieta (1992-(a) y 1992-(b)) presentaron una revisión y análisis de las soluciones de flujo permanente en redes de agua potable que, de manera resumida, se dividen en dos partes:

- Formulación de un sistema de ecuaciones. Consiste en diferentes transformaciones que se aplican a las ecuaciones (1) y (2) con el objeto de reducir la cantidad de incógnitas u obtener un sistema más conveniente para su solución numérica. Existen básicamente tres formulaciones: con incógnitas las cargas H en los nodos (H formulación), con incógnitas los gastos Q en los tramos (Q formulación) y con incógnitas ΔQ en cada circuito cerrado de la red (ΔQ formulación)

- Solución numérica del sistema de ecuaciones. El sistema de ecuaciones resultante de cualquiera de las tres formulaciones es no lineal y con un gran número de incógnitas. Para solucionarlo se han aplicado principalmente tres métodos: el de Cross, la teoría lineal y el de Newton-Raphson

Con base en el análisis efectuado se concluye que ninguno de los métodos y formulaciones es superior. Cada uno tiene sus ventajas y desventajas que lo hacen más conveniente en unos casos y menos conveniente en otros. Los programas más conocidos de análisis de redes de agua potable revelan, no obstante, una tendencia hacia las siguientes variantes:

- Método de Cross aplicando la formulación ΔQ . Es el método que se indica en libros de texto para el cálculo manual de redes muy pequeñas, y que está implantado en algunos programas. Se requiere definir los circuitos en la red, y de una aproximación inicial de los gastos que cumpla con la continuidad en los nodos. En el método de Cross se desprecian todos los elementos fuera de la diagonal de la matriz, evitando la solución de un sistema de ecuaciones. Ya que esta aproximación es muy gruesa, la convergencia puede ser lenta o inexistente y por lo tanto no es recomendable
- Método de Newton-Raphson aplicando la formulación ΔQ . Mejora considerablemente la convergencia, teniéndose que solucionar un sistema de ecuaciones no lineales. La matriz del sistema es poco porosa requiriendo métodos generales para la solución del sistema de ecuaciones lineales en cada iteración. Persiste la necesidad de definir los circuitos y establecer una aproximación inicial que cumpla con el principio de continuidad
- Método de teoría lineal aplicando la formulación Q . Es el método, utilizado en KYPIPE (1991) y en CYBERNET (1992), propuesto por Wood (1972 y 1981) que indica ventajas importantes. Sin embargo tiene también sus desventajas: la matriz del sistema de ecuaciones es asimétrica, por lo que se requiere de más tiempo tanto de máquina como de memoria, y requiere definir los circuitos de la red, lo que podría complicar la lógica del programa
- Método de Newton-Raphson aplicando la formulación H . Es el método que se emplea en el sistema de cómputo presentado en donde las fórmulas de pérdidas de carga son las de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Manning. Pueden representarse en la siguiente forma:

$$H_i - H_j = K \cdot Q_{ij}^\beta \quad (4)$$

El exponente β tiene valor 2 para las fórmulas de Darcy-Weisbach y Manning, y 1.852 para la fórmula de Hazen-Williams. La magnitud K depende de la longitud, diámetro y rugosidad de la tubería y se da por expresiones diferentes para las tres fórmulas. Para la fórmula de Darcy-Weisbach K depende también del gasto Q .

De la ecuación (4) se despeja el gasto Q y se sustituye en las ecuaciones (2), resultando el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\sum_{j=1}^m \frac{(H_i - H_j)^{\frac{1}{\beta}}}{K_j^{\frac{1}{\beta}}} + q_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

Los valores conocidos de H_i y q_i , y la relación (3) se sustituyen en las ecuaciones (5), obteniéndose un sistema de N ecuaciones con N incógnitas. Este sistema es no lineal y se soluciona iterativamente por el método de Newton-Raphson. En cada iteración se soluciona un sistema de ecuaciones lineales con N incógnitas. La matriz de este sistema es simétrica, positivamente definida y porosa. Existen técnicas eficientes para la solución de sistemas de ecuaciones de este tipo que reducen sustancialmente el tiempo de máquina y la memoria *RAM* requeridos. En el sistema SCADRED se aplica la técnica de matrices porosas propuesta por George y Liu (1981). Una vez obtenidas las cargas en los nodos se calculan los gastos en los tramos. Algunos detalles de la solución numérica por pueden verse en Tzatchkov y Cabrera (1987).

El uso de técnicas de matrices porosas ha permitido calcular redes con más de mil nodos y tramos por el sistema SCADRED, operando con la memoria convencional de una computadora personal. De esta forma, la solución de flujo permanente que usa SCADRED tiene las siguientes ventajas:

- No se manejan circuitos. El usuario no tiene que definirlos en sus datos, ni requiere calcularlos en el programa
- La solución es aplicable a redes de cualquier tipo: abiertas, cerradas, combinaciones entre abierta y cerrada y en varios pisos (no planares). Las soluciones que se basan en circuitos no son aplicables a redes no planares
- La aproximación inicial puede ser arbitraria
- La matriz del sistema de ecuaciones es simétrica y positivamente definida, lo que permite una solución más rápida y requiere de menos memoria
- La estructura de la matriz del sistema de ecuaciones coincide con la estructura de la red, facilitando la interpretación y el significado físico de la solución

- Las condiciones de frontera de cargas y demandas, o su interrelación se consideran de manera natural en la solución numérica

Análisis de flujo no permanente

En una red de agua potable la demanda varía durante el día, y con ello los niveles en los tanques y la operación de las bombas. Debido a que las variaciones del flujo en la red son lentas, normalmente no es necesario considerar la inercia del flujo y el flujo no permanente puede simularse como una secuencia de estados de flujo permanente con demanda diferente en cada estado.

El periodo de tiempo a analizar se divide en intervalos, por ejemplo un día en intervalos de una hora. Para el inicio de cada intervalo se encuentra una solución de flujo permanente. Esta solución da los gastos que entran y salen de los tanques, que se utilizan para calcular los niveles de agua para el siguiente momento de tiempo. Se obtiene al final una serie de soluciones de flujo permanente que representa la operación de la red en el periodo analizado. Este tipo de análisis es conocido como *simulación de periodos extendidos*, *simulación continua* o *simulación en el tiempo mediante cambio consecutivo de estados permanentes*.

En el sistema SCADRED se incluye la variante de simulación de periodos extendidos propuesta por Bhave (1988) que evita las iteraciones entre dos soluciones consecutivas.

Selección de diámetros (diseño con costo mínimo)

En proyectos de redes nuevas o en rehabilitaciones y ampliaciones de redes existentes, el cálculo incluye la determinación de los diámetros de los tramos nuevos de la red. Se cuenta con un conjunto (surtido) de diámetros comercialmente disponibles. Se requiere asignar un diámetro en cada tramo nuevo de forma tal que en los nodos se tengan las presiones requeridas y que las velocidades en los tramos se encuentren en ciertos límites establecidos.

Debido a que las incógnitas del problema (los diámetros a seleccionar) pueden tomar solamente ciertos valores discretos definidos por los diámetros comerciales, se trata de un *problema en números discretos*, o *problema en números enteros*. Es deseable que la selección se realice de forma tal que el costo total de la red sea mínimo; se habla entonces de una *optimización o programación en números enteros*.

Los métodos tradicionales de optimización, como las diferentes técnicas de *la programación no lineal* no son aplicables para el diseño de redes de agua pota-

ble, puesto que operan con variables continuas. Existen sin embargo propuestas, como por ejemplo la de Watanatada (1973), para solucionar primero el problema en números continuos con métodos de programación no lineal y luego redondear los diámetros teóricos obtenidos en cada tramo a diámetros comerciales. Una solución de este índole fracasaría, o al menos estaría incompleta a causa de las consideraciones siguientes:

- Después del cambio de diámetros no estarían en vigor las condiciones de optimización empleadas, y la solución puede dejar de ser la óptima.
- Al modificar los diámetros teóricos cambiaría la distribución de gastos y cargas en la red, con lo que, probablemente, se violen las restricciones de carga requerida y de velocidad límite, en cuyo caso la solución no será admisible
- Una solución en números continuos tenderá a convertir las redes cerradas en abiertas calculando diámetros iguales a cero en algunos tramos. Las redes abiertas, por su número menor de tramos, son más económicas que las cerradas; sin embargo para la distribución del agua potable en las ciudades, se prefieren las redes cerradas por su mayor confiabilidad en el servicio.

Los problemas de optimización en números enteros se manejan por *métodos de optimización combinatoria*, que consideran las combinaciones entre los posibles valores discretos que pueden tomar las variables (las combinaciones entre los diámetros posibles en los tramos, para el caso del diseño de una red de agua potable).

Excepto en redes muy pequeñas, existirá un número extraordinariamente elevado de posibles combinaciones (variantes) en la selección de los diámetros en los diferentes tramos. Con algunas de estas combinaciones se cumplirán las condiciones hidráulicas; estas combinaciones se pueden denominar *admisibles*. La variante que da el menor costo entre las variantes admisibles será la *variante óptima*. Matemáticamente el problema se formula como uno de programación no lineal en números enteros con restricciones y de gran escala, un problema *NP-difícil* y por eso no tratable con métodos formales.

Por esta razón SCADRED 2 emplea un procedimiento heurístico iterativo para la selección de los diámetros basado en una enumeración limitada de variantes. Se supone, primero, que en todos los tramos nuevos se tenga el menor de los diámetros disponibles (el más barato). Enseguida se ejecuta un análisis de flujo permanente para revisar el cumplimiento de las condi-

ciones hidráulicas. Si éstas no se cumplen se cambia el diámetro en un tramo al inmediato superior y de nuevo se ejecuta el cálculo de flujo permanente. Este proceso continúa hasta lograr el cumplimiento de las condiciones hidráulicas.

El algoritmo tiene dos etapas. En cada iteración de la primera etapa se revisa la velocidad en los tramos, y se selecciona el tramo con mayor exceso de velocidad. La primera etapa termina cuando en todos los tramos se logre una velocidad que no supera la máxima admisible. En la segunda etapa se revisa en cada iteración el déficit de presión en los nodos, y se selecciona el tramo que más influencia tenga sobre éstos (Tzachkov y Alfonso 1991).

El programa WADISO del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos de América (Walski, et al. 1990) emplea un algoritmo similar al que se utilizó durante la segunda etapa. Se espera que la primera etapa de la solución propuesta mejore el diseño, permitiendo acercarse más rápidamente a la solución óptima y asegurando que en el diseño final se cumpla la condición de velocidad máxima.

El procedimiento descrito no garantiza una variante óptima; sin embargo obtiene una solución cercana a la óptima. El número de variantes que se analizan no resulta demasiado grande, como se ha mostrado en diseños de redes de diferentes dimensiones. Como un ejemplo, para una red de unos docientos tramos y un surtido de diez diámetros comerciales se analizan, en una computadora personal con procesador 486 DX2, unas 150 variantes en aproximadamente veinte minutos. El tiempo de ejecución no obstante puede variar entre una red y otra, ya que depende de la convergencia de la solución, que a su vez puede ser más lenta cuando en la red existen tramos con velocidades muy bajas.

Manejo de nodos y tramos

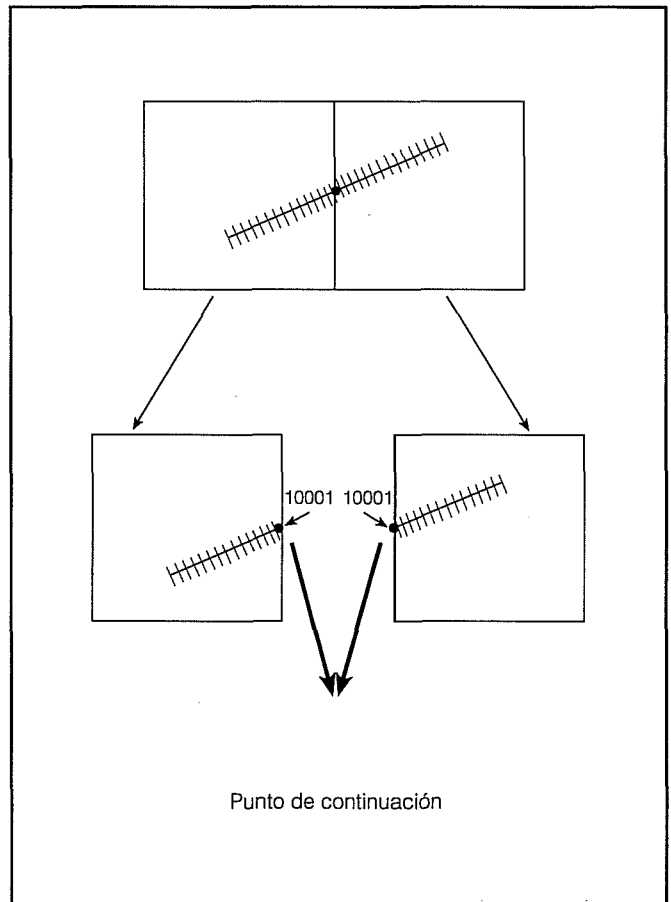
Las redes de distribución de agua potable en ciudades pueden contener decenas de miles de tramos. No obstante, para el proyecto de una red no es necesario considerar todos los tramos en los cálculos hidráulicos; en realidad esto podría no ser factible técnicamente. La red se esquematiza eliminando los tramos de diámetro menor, considerándose en el cálculo hidráulico un esqueleto de la red formado por los tramos de diámetro mayor. Por esta razón, dentro del sistema SCADRED se manejan dos tipos de tramo: el de *red primaria* (cuando se consideran en el cálculo hidráulico) y el de *red secundaria* (cuando no se consideran). El tipo de cada tramo se define a la hora de trazarlo según criterio del usuario.

Por otra parte, el sistema maneja también los tramos como *existentes* y como de *proyecto*. De cada uno de los *existentes* se conoce el diámetro, clase y material; y su costo no se considera en la optimización y en el cálculo del costo de la red. Como tramos de *proyecto* se manejan aquellos por diseñar y pueden ser con diámetro conocido o no conocido. En el primer caso el usuario fija el diámetro del tramo; en el segundo el sistema determina el material y el diámetro, en la opción *Selección de diámetros* del menú del sistema. El costo de los tramos de *proyecto* se considera en la optimización y en el cálculo del costo del proyecto de la red. El sistema SCADRED V2 maneja tres tipos de nodo:

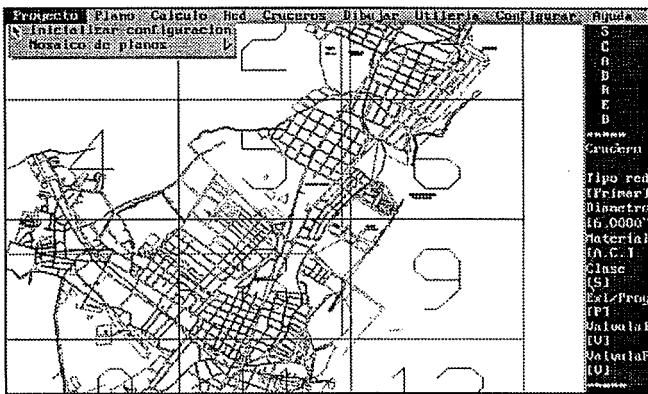
Menú *Proyecto* (ilustración 2)

- Nodos (cruceros) de red primaria. Se utilizan en el cálculo hidráulico. Pueden tener números de 1 a 999
- Nodos (cruceros) de red secundaria. Se emplean para señalar los cruceros de la red secundaria, las uniones de la red secundaria con la primaria, y los

1. Puntos de continuación entre dos planos



2. Menú Proyecto



cambios de dirección en las tuberías de red primaria que no intervienen en el cálculo hidráulico. Pueden tener números entre 1000 y 9999

- Puntos de continuación (unión). El trazo de las tuberías se efectúa en cada plano del mosaico por separado. De esta manera pueden resultar tramos con una parte en un plano y la otra parte en otra. Los puntos en que el borde del plano corta el trazo de una tubería se denominan puntos de continuación. Tienen números mayores que 10000. El punto de continuación debe de tener el mismo número en los dos planos, como se ve en la ilustración 1

El sistema maneja una simbología diferente para los tres tipos de nodo.

Menús del SCADRED V2

El sistema se maneja mediante una serie de menús configurados por el AutoCAD. Algunos de los menús tienen submenús. A continuación se describen las opciones de los primeros en su orden jerárquico:

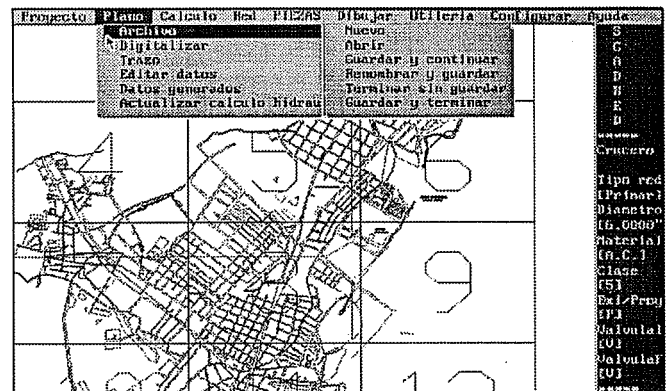
Menú *Proyecto* (ilustración 2)

- Inicializar configuración. Permite copiar los archivos de configuración del sistema dentro del directorio de trabajo
- Mosaico de planos. Genera un mosaico de planos a escala especificada por el usuario en un archivo de configuración, dada la planimetría de la localidad:
 - > Generar (comando para iniciar la generación del mosaico de planos)
 - > Ver (Cuando se desee, despliega en pantalla los mosaicos y su numeración)
 - > Regresar al sistema, desactiva el mosaico de planos de la pantalla

Menú Plano (ilustración 3)

- Archivo. Permite efectuar diversas funciones con el archivo de dibujo de AutoCAD para un plano:
 - > Nuevo
 - > Abrir
 - > Guardar y continuar
 - > Renombrar y guardar
 - > Terminar sin guardar
- Digitalización. Permite introducir los diferentes componentes de una red de distribución:
 - > Insertar planimetría (inserta la planimetría de la localidad en el plano de trabajo)
 - > Crucero de red primaria (inserta cruceo de red primaria)
 - > Crucero de red secundaria (inserta cruceo de red secundaria)
 - > Punto de continuación (permite ubicar el punto de unión entre dos planos)
 - > Estación de bombeo (inserta una estación de bombeo en el plano de trabajo)
 - > Tanque circular (inserta un tanque circular en el plano de trabajo)
 - > Tanque rectangular (inserta un tanque rectangular en el plano de trabajo)
- Trazo. Permite introducir los tramos de tubería entre los cruceros primarios y secundarios o puntos de continuación:
 - > Ver simbología de tuberías (despliega la simbología vigente de tuberías de 1" a 72")
 - > Quitar simbología (desactiva el despliegue de la simbología de tuberías)
 - > Trazar tubería (pide los cruceros entre los cuales se trazará una tubería)
 - > Actualizar el trazo (vuelve a dibujar la red después de que se efectúen cambios)

3. Menú Plano



- Editar datos. Permite editar los datos capturados en la opción *digitalizar* seleccionando los elementos correspondientes en el dibujo:
 - > Nodos (permite extraer y ver los datos correspondientes)
 - > Tanque rectangular (permite extraer y ver los datos correspondientes)
 - > Tanque circular (permite extraer y ver los datos correspondientes)
 - > Estación de bombeo (permite extraer y ver los datos correspondientes)
 - > Tramos (permite extraer y ver los datos correspondientes)
- Actualizar cálculo hidráulico. Actualiza el plano con los resultados de los análisis hidráulicos

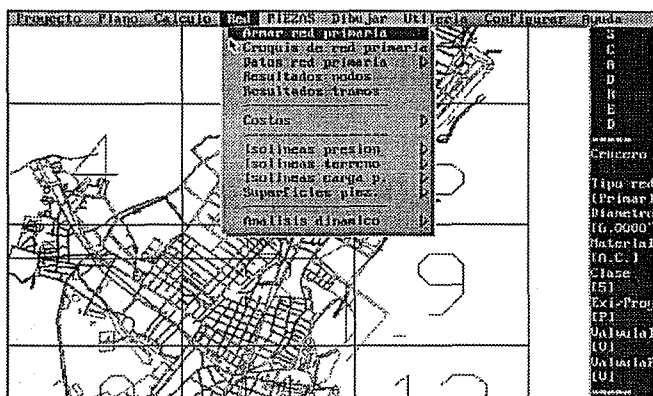
Menú *Cálculo*

- Análisis estático. Permite ejecutar un análisis hidráulico bajo condiciones estáticas una vez capturado el esquema de la red de distribución
- Análisis dinámico. Permite ejecutar un análisis hidráulico bajo condiciones dinámicas una vez capturado el esquema de la red de distribución y definida la curva de variación de la demanda en el menú *Configurar*
- Selección de diámetros. Permite ejecutar el módulo de cálculo para determinar los diámetros óptimos de las tuberías marcadas de "proyecto" en la red de distribución

Menú *Red* (ilustración 4)

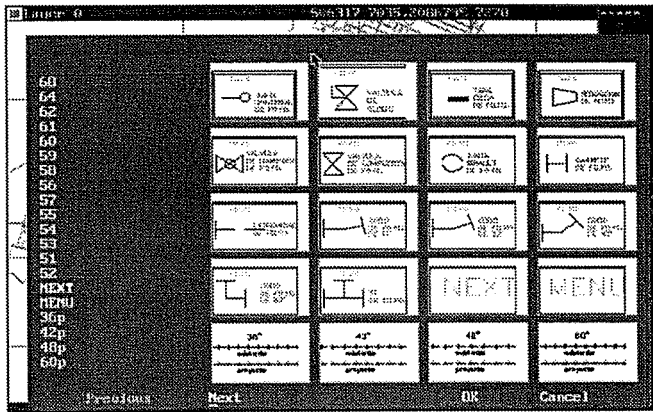
- Armar red primaria. Permite armar la red primaria uniéndolo las partes correspondientes a los diferentes planos del mosaico y elimina los cruces de red secundaria

4. Menú *Red*



- Croquis de red primaria. Muestra en la pantalla toda la red primaria después de ejecutar el comando *Armar red primaria*
- Datos red primaria. Permite ver los datos de armado de la red de distribución:
 - > Nodos (presenta en forma tabular los datos de los nodos)
 - > Tanque rectangular (presenta en forma tabular los datos de los tanques rectangulares)
 - > Tanque circular (presenta en forma tabular los datos de los tanques circulares)
 - > Estación de bombeo (presenta en forma tabular los datos de las estaciones de bombeo)
 - > Tramos (presenta en forma tabular los datos de los tramos)
- Resultados nodos. Presenta en forma tabular los resultados en los cruces de la red primaria
- Resultados tramos. Presenta en forma tabular los resultados en los tramos
- Costos. Presenta en forma tabular:
 - > Tuberías nuevas (costos)
 - > Tuberías existentes (longitud total por material y clase)
 - > Piezas especiales (costos)
- Isolíneas de presión. Despliega sobre el esquema de la red primaria las curvas con igual presión:
 - > Calcular
 - > Mostrar (despliega las curvas)
 - > Ocultar
- Isolíneas de terreno. Despliega sobre el esquema de la red primaria las curvas con igual nivel topográfico:
 - > Calcular
 - > Mostrar (despliega las curvas)
 - > Ocultar
- Isolíneas carga piezométrica. Despliega sobre el esquema de la red primaria las curvas con igual carga piezométrica:
 - > Calcular
 - > Mostrar (despliega las curvas)
 - > Ocultar
- Superficie piezométrica. Despliega sobre el esquema la imagen tridimensional de una malla de cargas piezométricas:
 - > Calcular
 - > Mostrar (despliega la malla)
 - > Rotar (cambia el ángulo de vista)
 - > Ocultar
- Análisis dinámico. Presenta los resultados del análisis hidráulico dinámico:
 - > Resultados momentáneos (presenta tablas con los resultados para cada hora del día)
 - > Evolución de presión (gráfica de evolución de la presión en un nodo del plano)

5. Menú Cruceros



Menú *Cruceros* (ilustración 5)

- Armado automático. Arma y dibuja los cruces de los tramos nuevos
- Armado manual. Permite hacer el armado manual de un cruce en caso de que el sistema no pueda efectuar el armado del mismo
- Cuantificación, hace un cálculo de las piezas de los cruces calculados en forma de tabla la cual se inserta en el plano

Menú *Dibujar*

- Comenzar. Manda al graficador el plano ejecutivo del proyecto que se analizó.

Menú *Utilería*

Contiene varios comandos usuales del AutoCAD (acercamiento, pantalla anterior, plano completo, mover plano, mover elemento, borrar elemento y cancelar comando).

Menú *Configurar* (ilustración 6)

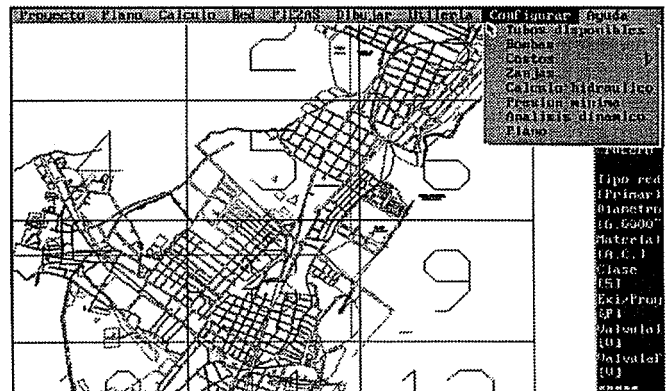
- Tubos disponibles. Da acceso al archivo que contiene una lista de los tubos disponibles para editar o agregar y que el sistema puede considerar para el trazo de tuberías y selección de diámetros
- Bombas. Da acceso al archivo que contiene las características del equipo de bombeo
- Costos. Da acceso al archivo que contiene la lista de precios de los conceptos que enseguida se enlistan:
 - > Piezas
 - > Piezas de FoFo

- > Ruptura de pavimento
- > Excavación
- > Plantilla apisonada
- > Relleno compactado
- > Relleno a volteo
- > Reconstrucción de pavimento
- Dimensiones de Zanjas
- Cálculo hidráulico. Permite definir la fórmula de pérdidas de carga (Manning, Darcy o Hazen-Williams), el número de iteraciones y la precisión requerida
- Presión mínima. Permite definir la presión mínima requerida en los cruces de red primaria
- Análisis dinámico. Permite definir el tamaño del intervalo y su número así como la curva de variación de la demanda
- Plano. Permite definir la escala de trabajo así como el tamaño de la simbología del plano.

Secuencia en la elaboración de un proyecto por SCADRED V2

- Se inicializan los archivos de configuración
- El plano de planimetría de la ciudad se divide en un mosaico de planos, normalmente en escala 1:2000
- En cada plano del mosaico se hace lo siguiente
 - Se inserta la planimetría
 - Se introducen los cruces de red primaria, secundaria y puntos de continuación
 - Se trazan las tuberías entre los cruces
 - Se introducen los tanques y bombas
 - Se introducen los datos de elevaciones topográficas y demanda en los cruces de red primaria y para los tanques y bombas
 - Se extraen los datos (el sistema los graba en archivos)
 - Se arma la red primaria con los datos de todos los planos

6. Menú *Configurar*



- Se ejecuta el cálculo hidráulico de la red (análisis estático y dinámico)
- Se ejecuta la selección de diámetros, si en la red hay tramos de proyecto con diámetros no definidos
- Opcionalmente se visualizan y dibujan o imprimen los resultados del cálculo hidráulico, croquis de red primaria, las isóneas y superficie piezométrica
- En cada plano del mosaico se hace lo siguiente:
 - Se actualiza el plano con los resultados del cálculo hidráulico
 - Se arman los cruceros
 - Se cuantifican las piezas especiales
 - Se dibuja el plano
 - Se calculan los costos (son para toda la red) y se imprimen

Conclusiones

El sistema SCADRED V2 permite realizar el diseño integral de una red de agua potable con las siguientes ventajas:

- Reducción del tiempo de elaboración de los proyectos
- Mejora la calidad de los proyectos
- Disminuye el costo de construcción debido al diseño óptimo del sistema
- Facilita la revisión de proyectos

El uso del sistema es un requisito para la elaboración de proyectos para la Comisión Nacional del Agua y ha sido difundido a través de eventos de capacitación.

Recibido: febrero, 1995

Aprobado: agosto, 1995

Referencias

- Bhave, P. R. 1988. Extended period simulation of water systems - direct solution. *J. Environmental Engineering, ASCE*. 114(5):
- CYBERNET, Version 2. 1992. *User guide*. Haestad Methods. 2.
- George, A. y J. W.H. Liu. 1981. *Computer solution of large sparse positive definite systems*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 7.
- Tzatchkov, V.G. y J. Izurieta D. 1994 *Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Libro II: Proyecto. 1ª Sección: Agua Potable, Tema: Redes de Distribución*. México D. F., México: Comisión Nacional del Agua, 4.
- Tzatchkov, V. G. y M. E. Alfonso F. 1991. Diseño óptimo de redes hidráulicas mediante análisis consecutivos direccionados. *Memorias del Seminario Internacional sobre Uso Eficiente del Agua*. Octubre, México, D. F., p. 635-642. 11.
- Tzatchkov, V. G. y E. Cabrera B. 1987. Método y programa de computación para el análisis hidráulico de un sistema de tuberías. *Ingeniería Hidráulica*, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana VIII(1):31-42. 8.
- Walski, T. M.; J. Gessler y J. W. Sjostrom. 1990. *Water distribution systems: Simulation and sizing*. USA: Lewis Publishers. 3.
- Watanatada, T. 1973. Least-cost design of water distribution systems. *J. Hydraulics Division, ASCE*. 99(9):1497-1513. 10.
- Wood, D. J. 1991. *KYPIPE 2. Comprehensive computer modeling of pipe distribution networks*. USA: University of Kentucky. 1.
- Wood, D. J. y C. O. A. Charles. 1972. Hydraulic network analysis using linear theory. *J. Hydraulics Division, ASCE*. 98(7):1157-1170. 5.
- Wood, D. J. y A.G. Rayes. 1981. Reliability of algorithms for pipe network analysis. *J. Hydraulics Division, ASCE*. 107 (10): 1145-1161. 6.

Abstract

Tzatchkov, V., and J., Izurieta. "Computer System for Analysis and Least-Cost Design of Drinking Water Distribution Networks". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XI. Num. 2, pages 55-63, May-August, 1996.

This paper presents a computer system that automates and optimizes the design of water distribution networks. The system has capabilities of digitalization, steady-state and extended period simulation, least-cost pipe sizing, joint design, project costs calculation, graphical and tabular presentation of results, contour maps, pressure surfaces display and printout. The system is able to divide city street maps in a number of area maps in accordance with the scale desired. Projects for large cities can be presented at the appropriate scale for construction projects. The system runs within AutoCAD 12. The Newton-Raphson solution with unknown nodal heads is used for the steady-state network analysis. The extended period (dynamic) simulation repeats this steady-state analysis considering tank operation during the day. The least-cost design procedure is based on a restricted enumeration of variants, defined by the hydraulic conditions of velocity limits and minimum pressures required.

Key words: computer system, analysis and design, drinking water, distribution networks, automatization, the Newton-Raphson solution, design plans.