



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Escuela Nacional de Estudios Profesionales
" A c a t l á n "

CALIBRACION DEL MODELO MATEMATICO ESTATICO PARA
SIMULAR LA RED PRIMARIA DE AGUA POTABLE
DE LA CIUDAD DE MEXICO

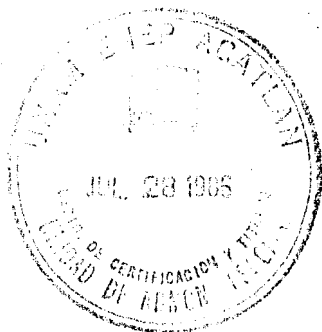
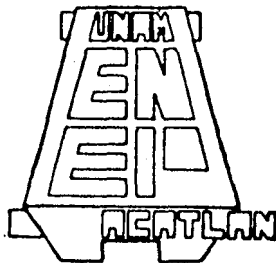
T E S I S

Que para obtener el título de

INGENIERO CIVIL

p r e s e n t a

HELIGIO JESUS PICHARDO QUINTANA



México 1986



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLAN
COORDINACION DEL PROGRAMA DE INGENIERIA

CI/076/1986.

SR. HELIGIO JESUS PICHARDO QUINTANA
Alumno de la carrera de Ingeniería
Civil.
P r e s e n t e.

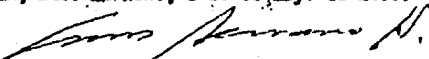
De acuerdo a su solicitud presentada con fecha febrero de 1985, me complace notificarle que esta Coordinación tuvo a bien asignarle el siguiente tema de tesis: "Calibración del Modelo Matemático Estático para Simular la Red Primaria de Agua Potable de la Ciudad - de México", el cual se desarrollará como sigue:

- Introducción.
- I.- Antecedentes teóricos del flujo en tuberías y tipos de modelos.
- II.- Descripción de la red de agua potable.
- III.- Descripción del modelo.
- IV.- Calibración del modelo.
- V.- Predicción del comportamiento de la red.
- Conclusiones y recomendaciones.
- Apéndice A.- Listado del programa y sus resultados.
- Apéndice B.- Manual de usuario del programa.
- Bibliografía.

Asimismo fue designado como Asesor de Tesis el señor M. I. Jesús Gracia Sánchez.

Ruego a usted tomar nota que en cumplimiento de lo especificado en la Ley de Profesiones, deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito básico para sustentar examen profesional, así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado. Esta comunicación deberá imprimirse en el interior de la tesis.

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Acatlán, Edo. de Méx., a 13 de mayo de 1986.


ING. HERMENEGILDO ARCOS SERRANO
Coordinador del Programa de
Ingeniería.

INDICE

		PAGINA
INTRODUCCION		1
CAPITULO I	"ANTECEDENTES TEORICOS DEL FLUJO EN TUBERIAS Y TIPOS DE MODELOS"	
I.1	Características del flujo en tuberías.	4
I.2	Ecuación de continuidad.	9
I.3	Ecuación de energía.	10
I.4	Métodos de solución para redes cerradas.	13
I.5	Elementos especiales (válvulas, -- tanques, dispositivos de medición).	15
I.6	Breve descripción de tipos de modelos.	19
CAPITULO II	"DESCRIPCION DE LA RED DE AGUA POTABLE"	
II.1	Plano general.	22
II.2	Zonificación por sistemas.	24
II.3	Ingresos a la red de fuentes internas y externas.	24
II.4	Operación y mantenimiento del sistema.	30
II.5	Problemática.	36

CAPITULO III	"DESCRIPCION DEL MODELO"	
III.1	Esquema numérico de solución.	39
III.2	Condiciones de funcionamiento.	47
III.3	Algoritmo de solución.	49
CAPITULO IV	"CALIBRACION DEL MODELO"	
IV.1	Generación de información (demandas, estaciones medidoras de presión).	59
IV.2	Simulación original.	64
IV.3	Simulaciones para calibración.	65
IV.4	Simulación calibrada.	69
IV.5	Alcances y limitaciones.	74
CAPITULO V	"PREDICCION DEL COMPORTAMIENTO DE LA RED"	
V.1	Selección de una zona de expansión de la red.	78
V.2	Simulación de la nueva red.	82
V.3	Simulación de la red actual, agregando un tanque de almacenamiento y regulación.	83
V.4	Comentarios generales.	84
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		87

APENDICE A	"LISTADO DEL PROGRAMA Y SUS RESULTADOS"	
A.1	Descripción general del programa.	90
A.2	Listado del programa y resultados de la simulación calibrada.	93
APENDICE B	"MANUAL DE USUARIO DEL PROGRAMA"	
B.1	Instructivo de uso del programa.	120
B.2	Ejemplo simple de aplicación del método numérico de solución.	126
BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS		138
ANEXO	Planos	140

INTRODUCCION

El acelerado crecimiento de la población trae consigo la necesidad de extender a las zonas que lo requieren una serie de servicios, como el abastecimiento de agua potable que es indispensable.

En una comunidad de varios millones de habitantes, como en la ciudad de México, se requiere de infraestructura suficiente y del trabajo continuo de personal capacitado, para garantizar un buen nivel de servicio durante todo el año. La Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (D.G.C.O.H.) es la dependencia encargada, dentro del Distrito Federal, de cuidar del buen funcionamiento del sistema hidráulico en general, entre sus principales actividades se pueden mencionar; - la planeación de los cambios en el sistema, la operación y mantenimiento del mismo y la construcción de las obras requeridas para proporcionar el servicio en los nuevos asentamientos humanos.

En la actualidad el sistema de agua potable del Distrito Federal, es bastante complejo por su magnitud y las frecuentes mo

dificaciones que se han hecho, debido a esto se ha trabajado en la creación de herramientas de análisis que permitan conocer el funcionamiento de dicho sistema y en base a esto, proponer soluciones adecuadas a los problemas que deben resolverse. Dentro de estas herramientas la D.G.C.O.H. cuenta con un modelo matemático para la simulación de la red primaria de agua potable, el cual es conveniente calibrar para darle un mejor empleo en la búsqueda de alternativas de solución que garanticen una distribución adecuada del agua.

El presente trabajo tiene como finalidad principal la calibración del modelo estático empleando las mediciones de presión que se realizan en el prototipo por la misma D.G.C.O.H. El trabajo desarrollado se presenta en cinco capítulos.

En el capítulo I, se indican brevemente los principios teóricos del flujo en tuberías.

En el capítulo II, se describe el sistema de agua potable que abastece al Distrito Federal y se comenta la problemática que representa el incremento de la demanda.

En el capítulo III, se describe el modelo matemático y el esquema numérico de solución. También se desarrolla un algoritmo para resolver sistemas de ecuaciones lineales.

En el capítulo IV, se desarrolla la calibración del modelo indicando la información empleada y se muestran los resultados de la simulación calibrada comentando los alcances y limitaciones que tiene dicho modelo.

Al capítulo V, se le dió un enfoque de aplicación y en él se muestran los resultados de dos simulaciones efectuadas para condiciones distintas a las de calibración.

Es conveniente mencionar que además del uso dado al modelo en la simulación de la red primaria descrita, se puede utilizar para el cálculo hidráulico en la revisión de otras redes de agua potable, por esto se han agregado cuatro apéndices al final del trabajo en los que se muestra, el listado del programa para computadora escrito en FORTRAN IV, y la forma de utilizarlo por medio del instructivo de usuario. También se incluye un ejemplo simple de una red pequeña de agua potable y una breve descripción del programa.

I. ANTECEDENTES TEORICOS DEL FLUJO EN TUBERIAS Y TIPOS DE MODELOS

I.1 CARACTERISTICAS DEL FLUJO EN TUBERIAS

Introducción

Una tubería se puede definir como un conducto cerrado a través del cual fluyen líquidos o gases. En Hidráulica se entiende por lo común, que las tuberías son conductos de sección transversal circular que funcionan llenos.

Los conductos que funcionan parcialmente llenos se consideran como canales abiertos.

Velocidades críticas en tuberías

Las condiciones que determinan si se producirá flujo con movimiento laminar o turbulento, las investigó Osborne Reynolds. El observó que para velocidades muy bajas las partículas del líquido siguen trayectorias rectas, al aumentar la velocidad, en determinado instante estas partículas rompen su trayecto-

ria recta y adquieren una irregular, debido a esto se clasificó el flujo como laminar y turbulento respectivamente.

Se ha descubierto en forma experimental que la velocidad a la que se produce el cambio de flujo laminar a turbulento, es -- más alta que la que provoca el cambio de flujo turbulento a laminar, a estas velocidades se les denomina velocidades críticas en tuberías.

Análisis de Velocidades

En un flujo laminar el fluido cerca del eje del tubo avanza -- una distancia dada en un período más breve que cerca de las -- paredes del tubo.

El flujo de un fluido con movimiento laminar entre dos placas paralelas de anchura indefinida se ilustra en la figura 1.1, en él, la velocidad varía según las ordenadas de una parábola que va desde cero en la pared de cada placa a una velocidad -- máxima a la distancia media entre ellas, con una velocidad -- promedio igual a las dos terceras partes de la máxima.

En el flujo turbulento, hay componentes de velocidades de par -- tículas tanto transversales como longitudinales, pero sólo -- las últimas producen el movimiento del fluido en su conjunto; por esto al hablar de velocidades, se hará referencia a la -- componente en la dirección del flujo.

Carga de velocidad en una tubería

La carga de velocidad en cualquier sección transversal de una corriente de fluido es $\propto V_{2/9}^2$ (ref 13), donde V es la veloci -- dad promedio en la sección transversal y \propto es un coeficiente mayor que la unidad que corrige la distribución desigual de --

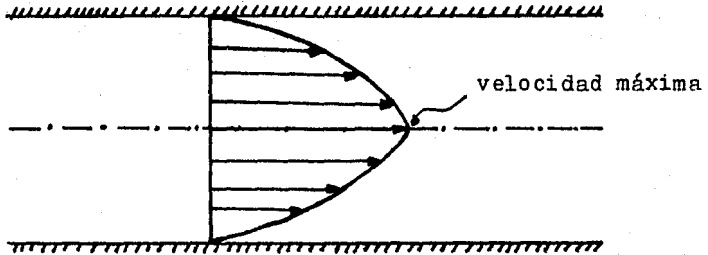


Fig. 1.1 Distribución de velocidades en flujo laminar

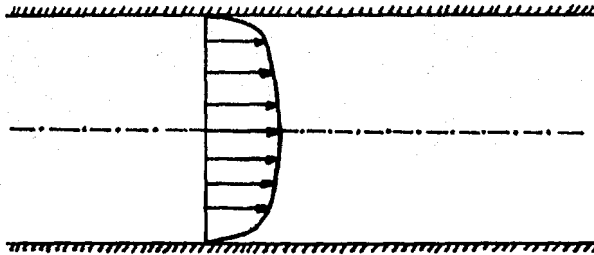


Fig. 1.2 Distribución de velocidades en flujo turbulento

Velocidades.

Los experimentos realizados por varios investigadores indican que para el agua que fluye con movimiento turbulento en una tubería recta, α tiene un valor medio de aproximadamente --- 1.06, como este valor es muy pequeño, se considerará en adelante que la carga de velocidad es $\frac{v^2}{2g}$.

Pérdidas de carga en tuberías

Las pérdidas de carga implican pérdidas de energía expresadas generalmente en mts de columna de agua. En cualquier flujo a través de una tubería las pérdidas se deben principalmente a:

- a) "Fricción en la tubería" a lo largo de secciones rectas de diámetro y aspereza uniformes
- b) Cambios de velocidad o de dirección del flujo.

Las pérdidas mencionadas se denominan respectivamente, pérdidas mayores y pérdidas menores. Las primeras consisten en -- una pérdida constante de carga (H_f) que se supone, ocurre de manera uniforme a lo largo de la tubería; en tanto permanezcan constantes el tamaño y la calidad del conducto.

Las pérdidas menores son de varios tipos y se deben principalmente a: contracción de la sección, ensanchamiento, obstrucciones, codos, etc., para valuar estas pérdidas, existen diversos criterios basados en experimentos; entre estos se pueden citar; el de Darcy, Hazen Williams, Manning, etc. (ref 10)

Gradiente hidráulico y gradiente de energía

La pérdida de carga en tuberías rectas se ilustra en la figura 1.3, donde se muestran dos líneas que se denominan respec-

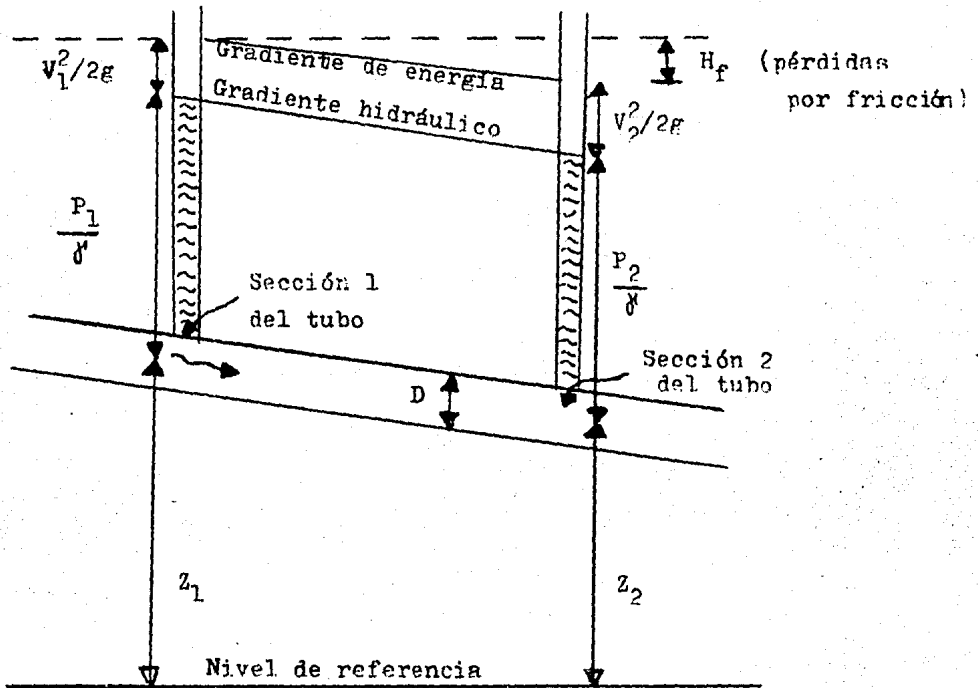


Fig. 1.3 Representación gráfica de la ecuación de Bernoulli.

tivamente, gradiente hidráulico y gradiente de energía. El primero se define como el lugar geométrico de las elevaciones a las que llega el líquido en tubos piezómetros sucesivos y por ende, se trata de una representación gráfica, respecto a cualquier nivel de referencia escogido de la carga potencial (presión más elevación) ó energía potencial que posee el líquido en todas las secciones de la tubería.

El gradiente de energía es una representación gráfica, respecto al nivel de referencia escogido de la energía total que posee el líquido a lo largo del tubo. Dicha energía total está compuesta por la carga de posición, la presión y la carga de velocidad.

I.2 ECUACION DE CONTINUIDAD

Cuando en cualquier instante, el número de partículas que pasan por cada sección transversal de la corriente es el mismo, se dice que el flujo es continuo ó que hay continuidad de flujo.

Si Q , A y V representan respectivamente el gasto, el área y la velocidad media, usando subíndices similares para la misma sección transversal, existirá una continuidad de flujo con fluidos no compresibles cuando:

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 = A_3 V_3 = \dots A_n V_n \quad (1.1)$$

La ecuación 1.1, se puede utilizar cuando el número de partículas de fluido por unidad de volumen, ó sea la densidad, se puede considerar constante.

Con flujo de gas, el número de partículas que pasan por un punto dado depende no sólo de su velocidad media y del área --

transversal; sino también de la densidad del gas.

La ecuación de continuidad para fluidos compresibles se convierte en:

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \quad (1.2)$$

La ecuación de continuidad se basa en el principio de conservación de la masa aplicado al movimiento de fluidos, este principio establece que la masa dentro de un sistema, permanece constante con el tiempo y matemáticamente puede ser expresada como:

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (1.3)$$

I.3 ECUACION DE ENERGIA

Energía y carga

La energía se define como la capacidad de realizar trabajo. Tanto la energía como el trabajo, se miden en unidades de fuerza por distancia; las dos formas que se reconocen comúnmente son la cinética y la potencial. A su vez, la energía potencial en los fluidos se puede subdividir en energía debida a la posición o elevación respecto a un plano de referencia y en energía que se debe a la presión en el fluido; por esto, las tres formas de energía que se deben considerar en relación con el flujo de líquidos son:

- a) Energía cinética
- b) Energía potencial de elevación, y
- c) Energía potencial de presión.

Otras formas de energía como la térmica y la eléctrica, influ

yen poco sobre las leyes que rigen el flujo de los líquidos.

Energía cinética (E_c)

La energía cinética, se define como la capacidad de una masa para realizar trabajo debido a su velocidad (v). Si en cualquier masa (M), cada partícula individual tiene la misma velocidad (m/s), la energía cinética de la masa será $Mv^2/2$ y como la masa se puede expresar como $M = W/g$, donde w es el peso y g la aceleración de la gravedad, la energía cinética será:

$$E_c = W \frac{v^2}{2g} \quad (1.4)$$

que se reduce a $v^2/2g$ para un peso unitario (w).

Esta expresión representa una magnitud lineal expresada en -- unidades de longitud y se denomina carga de velocidad.

Energía de elevación

Este tipo de energía, se manifiesta en un fluido debido a su posición ó elevación respecto a algún plano escogido como nivel de referencia. La energía de elevación se puede explicar considerando la masa de un peso de $W(Kg)$, cuya elevación respecto a cualquier plano horizontal de referencia sea $Z(m)$, -- respecto a este plano, la masa tendría $W \times Z$ Kg-m de energía. Si se considera una masa de peso unitario, Z representa una -- magnitud lineal, denominada carga de elevación de la masa.

Energía de presión

La energía de presión difiere fundamentalmente de la cinética y la de elevación, en que ninguna masa por sí misma, puede --

tener esa energía. Cualquier masa que posee energía de presión, la adquirirá sólo debido al contacto con otras masas -- que posean alguna forma de energía.

La energía de presión se puede valorar a partir de la expresión:

$$P = \gamma h \quad (1.5)$$

donde γ es el peso específico del agua

y la carga de presión se obtiene despejando h , esta es una -- magnitud lineal que representa la altura h a la que puede elevarse el agua debido a la presión.

Teorema de energía de Bernoulli

En 1738, Daniel Bernoulli demostró que en cualquier corriente que fluye continuamente, sin fricción, la energía total contenida en una masa dada es la misma en todos los puntos de la trayectoria del flujo.

En otras palabras, la energía cinética, la de presión y la de posición se pueden convertir en cualquiera de las otras dos formas, teóricamente sin pérdidas.

En la práctica, los fluidos en movimiento sufren siempre una pérdida de energía, debido principalmente a la fricción. En la figura 1.3, se ilustra la pérdida de energía, si la dirección del flujo en el tubo va de la sección 1 a la 2. La energía total en 2 debe ser menor que en uno. Para balancear la ecuación, se debe agregar una cantidad igual a la pérdida de energía δ , lo que es equivalente, a la pérdida de carga debida a la fricción.

La ecuación de la energía, se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + H_f \quad (1.6)$$

donde H_f es el valor de las pérdidas de energía en (m)

La ecuación 1.6 se ilustra con la figura 1.3, donde se muestran dos secciones en el tubo y sus respectivos componentes de energía.

Si se agrega energía a la corriente entre los puntos 1 y 2, - por ejemplo mediante una bomba, el miembro izquierdo de la ecuación debe incluir la carga agregada y entonces, se transforma en:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + H_u = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + H_f \quad (1.7)$$

donde H_u es la energía que proporciona la bomba en (m).

I.4 METODOS DE SOLUCION PARA REDES CERRADAS

Los sistemas de distribución de agua potable, están constituidos por redes de tubería a presión, éstas se clasifican en abiertas o cerradas; en las primeras, las tuberías están unidas unas con otras sin formar circuitos, mientras que en las segundas, se forma al menos un circuito; la red de agua potable de la ciudad de México, corresponde al segundo grupo.

En la actualidad, existen diversos métodos para el cálculo hidráulico de redes de agua potable, estos se pueden dividir en estáticos y dinámicos. Los métodos estáticos consideran, - que tanto los gastos de ingreso como de egreso (demandas) no cambian con el tiempo y que están dados por su valor medio a lo largo del día.

Los métodos dinámicos consideran la variación de gastos con respecto al tiempo, aunque cabe aclarar que dichas variaciones no pueden ser calculadas con exactitud; debido a esto, dichos métodos resultan complicados y son poco usuales en el diseño de redes.

La solución de una red por métodos estáticos, se basa en los principios de continuidad y conservación de la energía. Al establecer la ecuación de continuidad en las uniones de los tubos, se forma un sistema de ecuaciones lineales simultáneas en función de los gastos que circulan en los tubos, pero al aplicar el principio de conservación de la energía a cada tubo, el sistema de ecuaciones se convierte en no lineal y queda expresado en términos de niveles piezométricos, (esto se explica en forma más detallada en el capítulo III).

Los métodos estáticos, se pueden dividir en dos grupos: uno está integrado por procedimientos que evitan el sistema de ecuaciones no lineales, como los de Cross (ref 6), Mc Cormik y Bellamy, y el otro por aquellos que apoyados en computadora, resuelven dicho sistema; entre ellos los de J. Wood (ref 8), Jeppeson y Davis (ref 4).

Al aplicar los métodos anteriores a redes grandes, se presentan algunas dificultades; así, el método de Cross, para redes con un número de tubos del orden de 30 resulta laborioso, y a veces cuando se suponen datos muy alejados de los reales no se llega a la solución; los métodos del segundo grupo, que usan el método de Newton-Raphson para resolver sistemas de ecuaciones no lineales requieren para su aplicación en computadora de mucho tiempo de cálculo.

El método que se utiliza en el presente trabajo, requiere de una computadora y está basado en transformar el sistema de --

Los métodos dinámicos consideran la variación de gastos con respecto al tiempo, aunque cabe aclarar que dichas variaciones no pueden ser calculadas con exactitud; debido a esto, dichos métodos resultan complicados y son poco usuales en el diseño de redes.

La solución de una red por métodos estáticos, se basa en los principios de continuidad y conservación de la energía. Al establecer la ecuación de continuidad en las uniones de los tubos, se forma un sistema de ecuaciones lineales simultáneas en función de los gastos que circulan en los tubos, pero al aplicar el principio de conservación de la energía a cada tubo, el sistema de ecuaciones se convierte en no lineal y queda expresado en términos de niveles piezométricos, (esto se explica en forma más detallada en el capítulo III).

Los métodos estáticos, se pueden dividir en dos grupos: uno está integrado por procedimientos que evitan el sistema de ecuaciones no lineales, como los de Cross (ref 6), Mc Cormik y Bellamy, y el otro por aquellos que apoyados en computadora, resuelven dicho sistema; entre ellos los de J. Wood (ref 8), Jeppeson y Davis (ref 4).

Al aplicar los métodos anteriores a redes grandes, se presentan algunas dificultades; así, el método de Cross, para redes con un número de tubos del orden de 30 resulta laborioso, y a veces cuando se suponen datos muy alejados de los reales no se llega a la solución; los métodos del segundo grupo, que usan el método de Newton-Raphson para resolver sistemas de ecuaciones no lineales requieren para su aplicación en computadora de mucho tiempo de cálculo.

El método que se utiliza en el presente trabajo, requiere de una computadora y está basado en transformar el sistema de --

ecuaciones no lineales a un sistema lineal que se resuelve por aproximaciones sucesivas, su aplicación requiere de poco tiempo de procesamiento (23 segundos en computador Burroughs - - - 7800). Este método se presenta en forma detallada en el capítulo III.

I.5 ELEMENTOS ESPECIALES (VALVULAS, TANQUES, DISPOSITIVOS DE MEDICION)

Los elementos especiales en un sistema de agua potable, son -- todos aquellos que se utilizan para guiar y controlar en forma eficiente el flujo de agua en las conducciones; entre estos elementos especiales se pueden mencionar: las válvulas, los -- codos, las reducciones, las tapas, etc. Para el caso especial de la red de la ciudad de México a continuación se mencionan -- las características de los tanques, válvulas y dispositivos de medición existentes.

Tanques

El agua que se capta en las fuentes de abastecimiento, no se obtiene con el régimen requerido para el consumo de la población; esto significa, que ingresa al sistema un gasto constante proveniente de estas fuentes y la población demanda un gasto que es variable con respecto al tiempo.

El sitio en donde se modifica el régimen de la fuente para -- ajustarlo al de los consumos, se denomina tanque de regula -- ción cuando exclusivamente sirve para este objeto. Cuando a -- demás se retienen volúmenes de agua destinados a otros fines, recibe el nombre de tanque de almacenamiento y regulación.

También cabe destacar que en los sistemas de agua potable, se calcula una elevación determinada para la ubicación de los --

tanques, con la finalidad de mantener presiones adecuadas en la red de distribución.

En la ciudad de México, el agua proveniente de las fuentes de abastecimiento, se capta por medio de varios tanques cuyas principales funciones son de regulación y para proporcionar energía suficiente para mantener las presiones mínimas aceptables en la red.

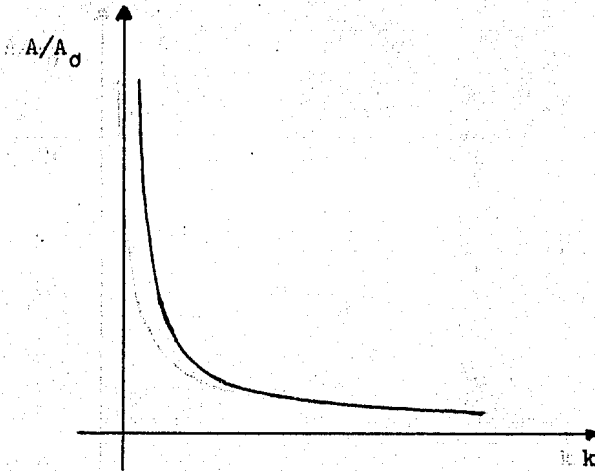
En el plano 2.1 (capítulo II), se muestra la ubicación de los tanques de regulación y almacenamiento. En términos generales, puede decirse que en la zona poniente se localizan la mayor parte de ellos, mientras que las zonas oriente, norte y sur cuentan con un número menor de tanques.

V Válvulas

Las válvulas sirven para limitar o interrumpir la circulación del agua. Se pueden clasificar según su mecanismo en válvulas de globo, de compuerta, de mariposa y de check, entre otras.

Los coeficientes de pérdidas por válvulas varían según el tipo y el grado de abertura, generalmente dichos coeficientes son proporcionados por los fabricantes, sin embargo, a falta de estos datos, se pueden consultar en manuales o textos de hidráulica los casos generales (referencias 10, 12 y 13 de la bibliografía).

En forma general, si se grafica el grado de abertura de una válvula contra el coeficiente de pérdidas por fricción, se obtiene una curva de la siguiente forma:



donde:

A es el área parcial al accionar la válvula

A_0 es el área total del conducto

k es el coeficiente de pérdidas de carga

De esta curva es importante hacer notar que para aberturas -- muy pequeñas se tienen valores de K muy grandes, estos tienden a infinito cuando la abertura tiende a cero; en cambio -- cuando la abertura es muy grande, el coeficiente de pérdidas tiene valores bajos y se reduce a cero cuando está totalmente abierta.

Se ha mencionado lo anterior, debido a que en el modelo matemático estas pérdidas de energía, se pueden representar en -- forma indirecta incrementando el coeficiente de fricción en -- los tramos donde se localicen válvulas que originan pérdidas de energía considerables. Sin embargo, en muchos casos se tiene el grave problema de no conocer el grado de abertura en -- las válvulas, esto obliga a efectuar la calibración del modelo ajustando los valores de los coeficientes de pérdidas de -- energía, a través de corridas de prueba en la computadora.

En el capítulo IV, se describe en forma detallada el procedimiento de calibración.

Dispositivos de medición

La existencia de dispositivos de medición para la red primaria del sistema de agua potable de la ciudad de México, es fundamental para tratar de interpretar el funcionamiento hidráulico del mismo. Actualmente se cuenta con dispositivos para la medición de presiones y gastos y se continúa expandiendo la red de medición. En la red primaria se tienen instaladas 32 estaciones medidoras de presión con registros continuos de 24 hrs. La D.G.C.O.H. publicó un estudio de la fluctuación de estas presiones en dichas estaciones, el cual servirá de base para la calibración del modelo matemático en cuestión (ref 1).

Por lo que respecta a la medición de gastos, se sabe que existen estaciones de aforo que permiten conocer el caudal del agua en bloque, entendiendo por agua en bloque la que se recibe de fuentes externas de abastecimiento al Distrito Federal, como es el caso, del agua proveniente de la cuenca del Lerma y la del río Cutzamala. Sin embargo, no toda esta agua entra en la red primaria, ya que una parte se destina al abastecimiento de poblaciones locales que cuentan con redes de distribución independientes, esto impide precisar un valor del gasto que circula en la red primaria y sólo se ha estimado en forma aproximada.

Para conocer dicho gasto, sería conveniente aumentar el número de dispositivos de aforo, instalándolos en la salida de los tanques y sistemas de bombeo que se conectan directamente a red primaria.

I.6 BREVE DESCRIPCIÓN DE TIPOS DE MODELOS

Introducción

Un modelo se puede definir como la representación simplificada de un fenómeno ó sistema. En el caso de la ingeniería civil, se puede hablar de un sistema hidráulico, estructural, etc. En muchos campos científicos es muy común el uso de modelos, con la finalidad de facilitar el estudio técnico y de esa manera obtener una solución adecuada al problema en estudio.

Existen diversos criterios para la clasificación de modelos, pero la más común comprende los tres tipos siguientes: modelos físicos, analógicos y matemáticos.

Modelos físicos

Estos modelos son representaciones físicas del sistema ó fenómeno que se estudia, las cuales se hacen a escalas convenientes para facilitar el estudio del fenómeno en cuestión. Como ejemplo de este tipo, se puede citar la construcción del modelo de un canal, en éste se deberán simular las condiciones a las que estará sujeto el prototipo. Para lograr esto, es necesario tomar en cuenta una serie de factores importantes tales como; la escala de dimensiones ya mencionada, una escala de velocidades, escala de fuerzas, etc. Cabe destacar que el estudio de los diversos tipos de modelos constituye especialidades bien definidas en el campo de la ingeniería, aquí solo se ha abordado el tema de una manera muy general.

Modelos analógicos

Los modelos analógicos son representaciones del fenómeno en -

estudio, valiéndose de elementos diferentes, pero que son de funcionamiento análogo ó semejante al sistema que se quiere - estudiar. Para aclarar esta definición, se menciona el siguiente ejemplo: La simulación del funcionamiento de un circuito hidráulico se puede hacer utilizando un circuito eléctrico, dado que los dos sistemas tienen características semejantes. El empleo de resistores en el circuito eléctrico causará una caída de potencial análoga a la pérdida de carga que se origina por fricción en las tuberías. Además pueden incluirse entradas y cortes de corriente que serán equivalentes a las entradas y cierres propuestos para un sistema de distribución. De esta forma utilizando este tipo de modelos para el estudio del funcionamiento hidráulico en redes de distribución, se está en posibilidad de ensayar varias alternativas y dar una solución adecuada al problema. Esta facilidad para efectuar cambios en la simulación, es una de las mayores ventajas en este tipo de modelos.

Modelos matemáticos

Son representaciones de un sistema basadas en las ecuaciones que determinan el comportamiento del fenómeno en estudio. El presente trabajo constituye un ejemplo de este tipo de modelos, que son muy usados en muchos campos de la investigación y han tenido mayor auge con el desarrollo de las computadoras, pues permiten un ahorro considerable de tiempo en la solución de problemas.

En dicho modelo, se simula el funcionamiento hidráulico de la red primaria de agua potable de la ciudad de México, para ello se hace uso de dos de las ecuaciones fundamentales de la hidráulica que son la de continuidad y energía. La solución de dichas ecuaciones se efectúa por medio de un programa de computadora como se verá posteriormente.

Por último cabe destacar que dentro de los modelos matemáticos, se consideran dos divisiones de importancia que son; los modelos estáticos y los dinámicos. Los estáticos, se ocupan de determinar una solución al problema para una serie de condiciones fijas que se considera no cambiarán con el tiempo. En cambio los dinámicos, consideran la variación de los factores con respecto al tiempo.

El modelo aquí descrito, se ubica en los de tipo matemático - estático.

II. DESCRIPCIÓN DE LA RED DE AGUA POTABLE

II.1 PLANO GENERAL

Descripción general

En el plano 2.1, se muestra la red primaria de distribución de agua potable, ésta se define convencionalmente como la integrada por tuberías de 0.53 a 1.83 m, de diámetro; tiene una longitud total de 540 km incluyendo los conductos de alimentación que la ligan con los tanques de regulación. En dicho plano, también se muestra la ubicación de los tanques de regulación. Es conveniente mencionar que no todos ellos se conectan a la red primaria, en la tabla 2.4 se indican los tanques de entrada directa a la red, los restantes son utilizados para sistemas locales de agua potable ó como tanques rompedores de presión en puntos donde ésta es muy alta.

Por lo que respecta a las válvulas, se ha estimado que el nú-

mero aproximado de éstas es de 500, en la mayoría de los casos no es posible conocer su grado de abertura; en el plano 2.1, se indican las que muy probablemente permanecen cerradas ó parcialmente cerradas.

El sistema cuenta con 84 plantas de bombeo, algunas de las cuales se ubican en las líneas de conducción, con el propósito de hacer llegar el agua a los tanques de almacenamiento, pero la gran mayoría, están destinadas a enviar el agua a las partes altas de la ciudad. De estas plantas de bombeo, solamente la de Xotepingo está conectada directamente a la red primaria.

La ubicación de los sitios por donde llega el agua a la red son los siguientes: Por el norte se tiene el túnel Barriento-Chalmita, que alimenta a los tanques Chalmita 1 y 2 y el acueducto de Chiconautla, que envía su caudal a los tanques de Santa Isabel.

Por el poniente, a la salida del túnel Atarascuillo-Dos ríos, se localiza la trifurcación llamada el venado, de donde se inician los ramales norte y sur que abastecen a las zonas vecinas y a la red primaria.

Por la zona sur, la conducción del sistema Kochimilco-Mixquic-Xotepingo, está compuesta por los acueductos Kochimilco, Chalco-Kochimilco y Auxiliares de Xotepingo, por el acueducto Chalco-Kochimilco se envía el agua a los tanques de la Estrella, ubicados en el cerro del mismo nombre, mientras que el acueducto Kochimilco llega hasta la planta de bombeo de Xote-

pingo, que como ya se indicó se conecta directamente a la red primaria.

En la zona oriente, el agua es conducida por el acueducto del Peñón y llega al tanque del mismo nombre, además se ha construido otro tanque denominado la caldera que próximamente entrará en funcionamiento.

II.2 ZONIFICACION POR SISTEMAS

Para lograr mayor eficiencia en la operación y mantenimiento del sistema de agua potable de la ciudad de México, éste se ha dividido de la siguiente forma:

Sistema Norte

Sistema Centro

Sistema Poniente

Sistema Oriente

Sistema Sur

Cada uno de los sistemas mencionados comprende varias delegaciones políticas, aunque es conveniente señalar que dichos sistemas no abarcan necesariamente delegaciones completas. En la tabla 2.1, se indican cada uno de los sistemas, las delegaciones comprendidas y su respectivo porcentaje de cobertura. En el plano 2.2, se muestran los cinco sistemas mencionados.

II.3 INGRESOS A LA RED DE FUENTES INTERNAS Y EXTERNAS

Antecedentes históricos de las fuentes de abastecimiento

SISTEMA	DELEGACION	PORCENTAJE
Norte	Gustavo A. Madero	100
	Azacotalco	100
	Miguel Hidalgo	60
	Cuauhtémoc	100
	Venustiano Carranza	55
Centro	Benito Juárez	100
	Iztacalco	40
	Coyoacán	50
	Magdalena de Contreras	10
	Iztapalapa	5
	Miguel Hidalgo	40
Poniente	Alvaro Obregón	100
	Magdalena de Contreras	90
	Cuajimalpa de Morelos	100
	Venustiano Carranza	45
Oriente	Iztacalco	60
	Iztapalapa	85
	Tláhuac	15
	Tlalpan	100
	Xochimilco	100
Sur	Milpa Alta	100
	Coyoacán	50
	Iztapalapa	10
	Tláhuac	85

Tabla 2.1 Porcentajes de las Delegaciones Políticas que Comprende Cada Sistema.

Las primeras obras para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de México datan de épocas remotas, las fuentes de abastecimiento en la época prehispánica, estaban constituidas por una serie de manantiales que eran suficientes para satisfacer las necesidades de la población. La primera obra de importancia en esa época, fue el acueducto de Chapultepec, que sirvió para conducir el agua hasta el centro de la ciudad, esta obra fue diseñada y construida por Netzahualcōyotl en el año de -- 1450.

Durante mucho tiempo, ésta fué la principal fuente de abastecimiento, posteriormente se construyeron algunas obras para evitar las inundaciones; tales como el tajo de Nochistongo, el túnel de Tequisquiac, etc., con ello se evitó el crecimiento del nivel de los lagos, aunado esto con el crecimiento de la población, se originó la insuficiencia en el abastecimiento por medio de aguas superficiales y se hace necesario entonces la perforación de pozos.

En el año de 1847 existen ya cerca de 500 pozos someros, en -- 1886 este número se duplica y esto trae como consecuencia otro problema bastante grave, que es el hundimiento de la ciudad de México.

Aún teniendo de por medio el problema del hundimiento, la necesidad creciente de la demanda de agua potable, no permite la -- suspensión de la extracción del acuífero de la ciudad de México, y los pozos someros y profundos se siguen explotando. En -- la actualidad, existen numerosos pozos municipales que consti tuyen una aportación importante en el abastecimiento de la zona urbana, cabe aclarar que la mayor parte de estos, se locali

Las primeras obras para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de México datan de épocas remotas, las fuentes de abastecimiento en la época prehispánica, estaban constituidas por una serie de manantiales que eran suficientes para satisfacer las necesidades de la población. La primera obra de importancia en esa época, fue el acueducto de Chapultepec, que sirvió para conducir el agua hasta el centro de la ciudad, esta obra fue diseñada y construida por Netzahualcōyotl en el año de -- 1450.

Durante mucho tiempo, ésta fué la principal fuente de abastecimiento, posteriormente se construyeron algunas obras para evitar las inundaciones; tales como el tajo de Nochistongo, el túnel de Tequisquiác, etc., con ello se evitó el crecimiento del nivel de los lagos, aunado esto con el crecimiento de la población, se originó la insuficiencia en el abastecimiento por medio de aguas superficiales y se hace necesario entonces la perforación de pozos.

En el año de 1847 existen ya cerca de 500 pozos someros, en -- 1886 este número se duplica y esto trae como consecuencia otro problema bastante grave, que es el hundimiento de la ciudad de México.

Aún teniendo de por medio el problema del hundimiento, la necesidad creciente de la demanda de agua potable, no permite la -- suspensión de la extracción del acuífero de la ciudad de México, y los pozos someros y profundos se siguen explotando. En -- la actualidad, existen numerosos pozos municipales que constituyen una aportación importante en el abastecimiento de la zona urbana, cabe aclarar que la mayor parte de estos, se locali

za en las orillas de la ciudad, como es el caso del sistema -- sur, norte y oriente, que están constituidos por baterías de -- pozos.

La explosión demográfica que es uno de los mayores problemas -- de la actualidad, origina que el agua obtenida de las fuentes internas sea insuficiente; debido a esto, se ha recurrido a la explotación de fuentes externas; tal es el caso del sistema -- Lerma, que está constituido por una serie de pozos ubicados en el Valle de Lerma (Edo. de México), en el cuál empezó a funcio -- nar en 1951 y consta de 234 pozos, los pozos de Chiconautla -- que se localizan hacia el norte de la ciudad, en el Estado de México y las obras más recientes las del sistema Cutzamala, -- que captan aguas superficiales para el Distrito Federal y par -- te del Estado de México.

Sistemas de abastecimiento de agua al Distrito Federal

El abastecimiento de agua potable a la ciudad de México, se -- lleva a cabo por medio de 6 sistemas que son los siguientes:

Sistema Norte

Sistema Oriente

Sistema Sur

Sistema Poniente

Sistema Sur-Poniente

Sistema Centro

Estos a su vez, se han dividido en varias partes según se mues -- tra en la tabla 2.2.

SISTEMA	GASTO (M ³ /s)
Norte	
Barrientos (C.A.V.M.)	4.05
Chiconautla	1.63
Sistema A-GAM	1.24
Norte Risco (C.A.V.M.)	0.83
Oriente	
Sistema Oriente	1.54
Sur	
Sistema Sur	5.71
Pozos del Sur (C.A.V.M.)	5.20
Poniente	
Sistema Lerma	6.24
Sistema Poniente	0.60
Cutzamala (C.A.V.M.)	3.84
Sur-Poniente	
Manantiales	0.29
Centro	
Sistema Centro	2.95
Pozos Particulares	1.35
Total	<u>35.47</u>

Tabla 2.2 Gasto promedio de amortación por cada uno de los sistemas en el mes de mayo de 1985.

Cabe mencionar que en el control de estos sistemas, intervienen dos dependencias gubernamentales; la primera es la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (D.G.C.O.H.), que depende directamente del Departamento del Distrito Federal y la segunda es la comisión de Aguas del Valle de México (C.A.V.M.), que depende directamente de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

En la tabla 2.2, se muestran los sistemas de abastecimiento al Distrito Federal y el gasto promedio de aportación en el mes de mayo de 1985. Se indican entre paréntesis los sistemas dependientes de la C.A.V.M., y los restantes son controlados por la D.G.C.O.H.

Las fuentes internas de abastecimiento de la ciudad, están constituidas principalmente por la serie de pozos ubicados en el acuífero del Valle de México, además hay una pequeña aportación de manantiales de 290 Lts/s en la zona sur-poniente de la Ciudad de México.

Las fuentes externas, están constituidas por el agua subterránea y superficial captada fuera del Valle de México; tal es el caso del sistema Lerma, Chiconautla y Cutzamala, los dos primeros captan aguas subterráneas de pozos y Cutzamala capta el agua superficial del río del mismo nombre.

Ingresos directos a la red primaria

Del agua aportada por los seis sistemas mencionados, no toda ingresa directamente a la red primaria, esto se debe a que al-

gunas de las líneas de conducción son aprovechadas para abastecer de agua potable a poblados que se encuentran cercanos a su localización. Además de esto, la aportación de algunos sistemas de pozos se inyecta directamente a la red secundaria; como es el caso del sistema centro. Debido a esto, resulta difícil conocer en forma exacta los gastos directos de entrada a la red, ya que hacen falta algunos dispositivos de aforo.

En la tabla 2.3, se muestran los gastos promedio de aportación de entrada directa a la red, estimados para mayo de 1985 y en el plano 2.3 se indica la entrada de dichos gastos.

El ingreso de agua a la red primaria, se efectúa por medio de 16 tanques y una planta de bombeo, en la tabla 2.4, se indican los tanques y en el plano 2.1, se muestra su ubicación, incluyendo la planta de bombeo de Xotepinco que inyecta agua directamente a la red primaria.

II.4 OPERACION Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA

Introducción

La Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica -- (D.G.C.O.H.), tiene encomendada como una de sus principales tareas la operación y conservación del sistema de abastecimiento de agua a la ciudad de México, la operación de las instalaciones constituye un aspecto medular dentro de la organización -- del sistema hidráulico; ya que de la eficiencia con que ésta -- se lleve a cabo, dependerá el entregar un buen servicio al -- usuario, que en este caso se traduce en proporcionar agua a --

SISTEMA	GASTO DE ENTRADA A LA RED PRIMARIA EN M ³ /s.
Lerma-Poniente-Cutzamala	5.34
Norte Barrientos	4.05
Norte Chiconautla	1.63
Norte - Risco	0.83
Oriente	0.77
Sur	3.00
Pozos del Sur	2.60
	Total 18.22

Tabla 2.3 Gastos promedio de amortización directa a la red primaria en el mes de mayo de 1985.

TANQUES	COTA TOPOGRAFICA (m)	CARGA (m)
Chalmita 1 y 2	2287.00	6.00
Osc. Santa Isabel	2290.00	4.10
Peñón	2290.00	1.50
Santa Isabel	2290.00	4.10
Aero Club 1 y 2	2288.00	4.25
San Joaquín	2289.96	2.00
Estrella 1 y 2	2292.00	4.80
Planta de Bombeo Xotepingo	2240.87	39.13
Santa Lucia 1	2301.00	3.60
J. del Arte	2290.00	3.50
Dolores 1, 2, 3 y 4	2288.00	4.00

Tabla 2.4 Tanques por los que ingresa el agua a -
la red primaria.

los habitantes de la ciudad de México en cantidad y calidad -- adecuada.

Operación

La magnitud del sistema de agua potable aquí descrito, implica contar con numerosos equipos para el buen funcionamiento del mismo, entre otros. Se pueden mencionar; dispositivos de medición, bombas, válvulas en redes de distribución, plantas potabilizadoras, etc. La operación contempla el manejo adecuado de dichos equipos con la finalidad de optimizar el funcionamiento del sistema. Para cumplir con esta tarea se requiere contar con los recursos humanos mejor capacitados, para ello la D.G.C.O.H. ha llevado acciones que comprenden la actualización de técnicos de los niveles medio y profesional.

Con el fin de incrementar su eficiencia, la operación del servicio de agua potable se regionalizó de la manera que se muestra en el plano 2.2. Cada región opera su sistema con la autonomía suficiente para resolver sus problemas, pero dicha operación se integra a la realizada en regiones vecinas a fin de resolver dificultades comunes ó auxiliarse mutuamente en caso de emergencias. Junto con la regionalización, se logró que la operación se realice durante las 24 hrs. del día y los 365 días del año; con ello, las fugas han disminuído notoriamente y se han evitado problemas de contaminación. Para atender las urgencias debidamente, se establecieron guardias durante los fines de semana y los días festivos. También cabe destacar que debido a que el sistema cuenta con numerosos equipos electromecánicos, la Compañía de Luz y Fuerza del Centro otorga prioridad -

en el suministro de la energía eléctrica. Por último, se mencionará que para cada uno de los sistemas descritos en el tema 2.3, se han elaborado manuales de operación que son renovados periódicamente para tomar en cuenta los cambios y la expansión en la infraestructura de los sistemas; dichos manuales constituyen una herramienta valiosa para el mejor desempeño de actividades por parte de los técnicos encargados de la operación y mantenimiento del sistema hidráulico.

Mantenimiento

El mantenimiento es el conjunto de trabajos que es necesario ejecutar en algún equipo, instalación ó edificio; a fin de que proporcione efectivamente el servicio para el cual fue diseñado. Para tal efecto, éste se ha dividido en las siguientes partes: mantenimiento operativo, preventivo y correctivo. El mantenimiento operativo, es el constituido por las actividades de limpieza, revisiones, medición y reposición de niveles de lubricantes, reposición de fusibles, lámparas y empaques, así como otras acciones menores; este mantenimiento es realizado por el propio personal del área de operación de la D.G.C.O.H. El mantenimiento preventivo, se conforma de las actividades programadas para detectar las fallas antes de que ocurran esto comprende, la inspección periódica de los equipos para descubrir las causas de posibles paros imprevistos y la conservación de las instalaciones que componen el sistema.

Por otra parte, el mantenimiento correctivo corresponde a las reparaciones que se realizan cuando falla el equipo. También es importante mencionar que la D.G.C.O.H. realiza medidas co-

rectivas en la red primaria de agua potable reemplazando válvulas de crucero, con el objeto de reducir el número de usuarios afectados durante una reparación de fugas; gracias a ello, los seccionamientos en las redes se pueden hacer en tramos más pequeños. Además se ha apoyado con mayor firmeza a las delegaciones en los trabajos de mantenimiento correctivo de redes secundarias de agua y drenaje. No obstante, también se requiere fortalecer el mantenimiento preventivo de dichas redes.

Plan para emergencias en el sistema de agua potable

El sistema de agua potable ha crecido en forma considerable durante el presente siglo; sus instalaciones se han multiplicado con gran rapidez, por lo que se ha creado una estructura muy amplia y vulnerable. Por ello, ha sido preocupación fundamental de la D.G.C.C.H. definir las acciones necesarias para afrontar situaciones de emergencia y garantizar el servicio mínimo de agua potable a todos los habitantes.

Hasta ahora, se han realizado esfuerzos para mitigar los efectos de una eventual falla grave. Se construyeron líneas primarias de distribución de agua potable para cerrar circuitos, y de esa manera mejorar presiones en la red. Se creó una brigada para atender situaciones de emergencia con entrenamiento y equipo especial y se organizó la operación del sistema de agua potable por regiones a fin de resolver con mayor rapidez cualquier problema en el servicio. Se automatizó la operación de gran número de pozos para reintegrarlos rápidamente al servicio en casos de fallas instantáneas de energía eléctrica, se creó un centro de información que opera las 24 hrs. de los 365

días del año para atender llamados del público en general acerca de problemas en el sistema hidráulico.

La importancia de contar con planes como el descrito anteriormente, se hizo patente el 19 de septiembre de 1985 con el lamentable sismo ocurrido en la ciudad de México, dicho fenómeno causó desperfectos graves en el sistema de agua potable, tal fue el caso de las fracturas en un acueducto del sistema sur y cientos de fugas en la red primaria y secundaria provocando escasez de agua en algunas zonas; sin embargo, gracias a las previsiones tomadas por la D.G.C.O.H. se pudo afrontar el problema y se normalizó el servicio en un tiempo relativamente corto. Aquí cabe recalcar la importancia de contar con modelos calibrados que pueden utilizarse para simular el funcionamiento de la red bajo condiciones de falla en algún elemento como el caso descrito.

II.5 PROBLEMATICA

El constante aumento de la población en la ciudad de México, implica incrementar la oferta de los servicios como son: energía eléctrica, agua potable, transportes, etc. Entre los servicios mencionados, el del agua potable es indispensable en cualquier comunidad.

Uno de los principales problemas dentro de este crecimiento poblacional, es la falta de planeación de los nuevos asentamientos humanos, pues en la actualidad es muy común el establecimiento desordenado en lugares impropios para proporcionarles todos los servicios de primera necesidad. El aumento de

población, origina un incremento de la demanda de agua potable; por lo cual, se requiere buscar de nuevas fuentes de abastecimiento para satisfacer las necesidades de agua de la población.

Como se mencionó anteriormente, los acuíferos del valle de México han sido sobreexplotados ocasionando problemas; como el hundimiento de la ciudad de México, es por ello que se tiene la necesidad de traer el agua potable de otras cuencas, como es el caso de los sistemas Lerma y Cutzamala.

El traer el agua potable de lugares lejanos, implica estudiar una serie de alternativas que ayuden a poder visualizar la mejor opción desde el punto de vista técnico y económico. Una vez elegidas estas fuentes de abastecimiento, es de gran importancia efectuar estudios para determinar los puntos más convenientes para introducir el agua en la red de distribución, así como determinar la conveniencia de incrementar el número de elementos del sistema tales como; tanques, plantas de bombeo, nuevos tramos de tubería, etc. En la medida en que se tenga un mejor conocimiento de cómo se comportará el sistema con los cambios que se realicen, se podrán buscar soluciones a los problemas de zonas de baja presión y escases de agua; aunque es conveniente aclarar que en muchos casos, existen asentamientos humanos en lugares altos, desde el punto de vista topográfico, y se hace necesario instalar equipos de bombeo y construir tanques de regulación para satisfacer la demanda de estas comunidades.

En el estudio de las alternativas mencionadas, se puede utilizar el modelo matemático de simulación presentado en este tra-

bajo, con el cual se pueden valorar alternativas para tomar mejores decisiones. La D.G.C.O.H. trabaja continuamente en el desarrollo de estas herramientas técnicas que permitan elegir las mejores alternativas para dar solución a los problemas mencionados y además de esto, se realizan campañas para concientizar a la gente de la necesidad de utilizar el agua en forma racional.

III. DESCRIPCION DEL MODELO

III.1 ESQUEMA NUMERICO DE SOLUCION

Introducción

El cálculo de los niveles piezométricos y gastos en una red, - se basa en la aplicación de los principios de conservación de energía y de masa (continuidad).

Conservación de energía

Para redes de tubos de sección circular, donde cada tubo de la red tiene un diámetro constante, el principio de conservación de la energía se reduce a expresar, que la diferencia de nivel piezométrico entre los extremos de un tubo j está dado por una ecuación del tipo:

$$h_{sj} - h_{ij} = c_j \left| Q_j^{m-1} \right| Q_j \quad (3.1)$$

donde:

- h_{sj} , h_{ij} niveles piezométricos en los extremos s e i del tubo j, respectivamente.
- c_j coeficiente que toma en cuenta el coeficiente de rugosidad, diámetro(d_j) y longitud del tubo (l_j).
- Q_j gasto que circula en el tubo j.
- m exponente que depende de la fórmula de pérdida de carga empleada.

En la tabla 3.1, se muestran los valores de c_j y m, estos dependen de la fórmula que se desee utilizar para valuar las pérdidas por fricción, en dicha tabla se tienen los valores para las ecuaciones de Darcy Weisbach, Manning y Hazen-Williams; donde f_j , n_j y CH_j son los respectivos coeficientes, cuyo valor está en función del material de que está hecha la tubería.

Conservación de masa

Se entiende por nudo, el lugar donde se unen dos o más tubos ó bien el extremo de un tubo no unido a otro. El principio de continuidad establece que la suma de los gastos que llegan a un nudo es igual a la suma de los gastos que salen de él. Considérese, por ejemplo la red de la figura 3.1; para identificar sus elementos se han numerado los nudos y los tubos, distinguiendo estos últimos mediante números encerrados en un círculo. También aparecen con flechas los gastos (q_i) que ingresan o salen de la red.

Suponiendo una distribución de gastos (Q_j) dentro de la red, como se muestra en la figura 3.2, al aplicar la ecuación de --

FORMULA	VALOR DE c_j	VALOR DE m
Darcy-Weisbach	$0.0826 \frac{f_j L_j}{(d_j)^5}$	2
Manning	$10.2936 \frac{(n_j)^2 L_j}{(d_j)^{5.333}}$	2
Hazen-Williams	$10.67 \frac{L_j}{(CH_j)^{1.852} (d_j)^{4.8681}}$	1.852

Tabla 3.1 Valores de c_j y m .

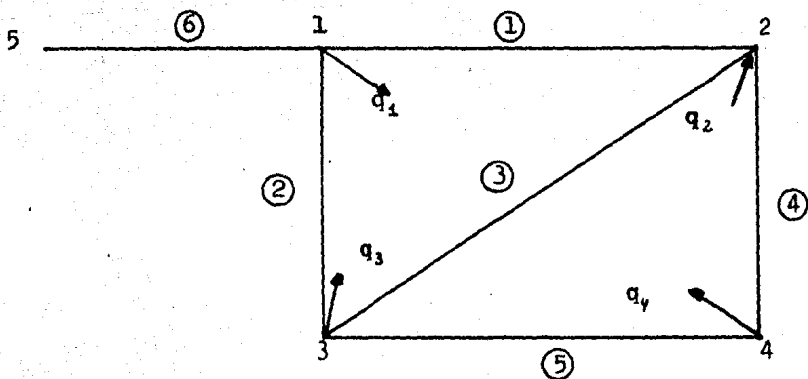


Fig. 3.1 Red de tubos con gastos de egreso e ingreso

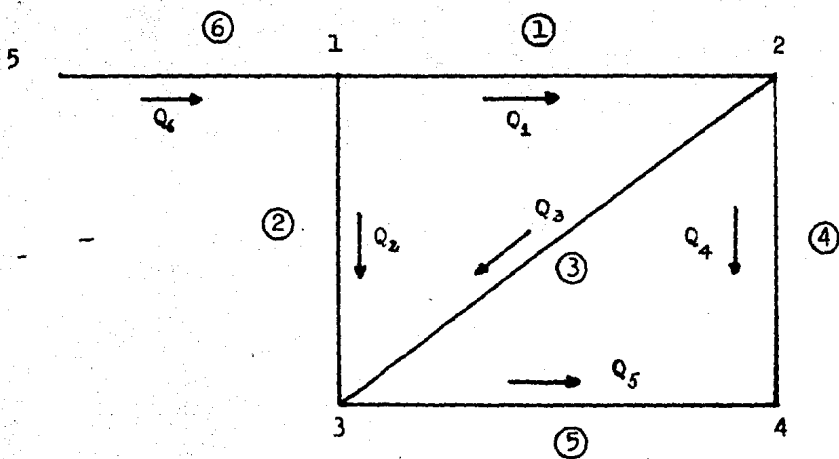


Fig. 3.2 Red de tubos con la distribución supuesta de gastos

continuidad para cada nudo se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 -Q_1 - Q_2 + Q_6 &= q_1 \\
 Q_1 - Q_3 - Q_4 &= -q_2 \\
 Q_2 + Q_3 - Q_5 &= q_3 \\
 Q_5 + Q_4 &= q_4
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

en forma general, el sistema de ecuaciones 3.2 se puede escribir como:

$$\sum_j Q_j = q_i \tag{3.3}$$

donde la suma se hace para todos los tubos j conectados al nudo i .

Planteamiento del problema

A fin de cumplir con los principios de conservación de la energía y conservación de masa, cada gasto Q_j se expresa en términos de niveles piezométricos y se sustituye en la ecuación 3.3. En el caso de la red de la figura 3.1, se llega al siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 -\left[\frac{1}{c_1}(h_1-h_2)\right]^{1/m} - \left[\frac{1}{c_2}(h_1-h_3)\right]^{1/m} + \left[\frac{1}{c_6}(h_5-h_1)\right]^{1/m} &= q_1 \\
 \left[\frac{1}{c_1}(h_1-h_2)\right]^{1/m} - \left[\frac{1}{c_3}(h_2-h_3)\right]^{1/m} - \left[\frac{1}{c_4}(h_2-h_4)\right]^{1/m} &= -q_2 \\
 \left[\frac{1}{c_2}(h_1-h_3)\right]^{1/m} + \left[\frac{1}{c_3}(h_2-h_3)\right]^{1/m} - \left[\frac{1}{c_5}(h_3-h_4)\right]^{1/m} &= q_3
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

$$\left[\frac{1}{c_5} (h_3 - h_4) \right]^{1/m} + \left[\frac{1}{c_4} (h_2 - h_4) \right]^{1/m} = q_4$$

Para tener un nivel piezométrico de referencia, se acepta que en el nudo 5 dicho nivel es conocido y en los otros nudos debe conocerse la cota topográfica. En forma general, el sistema anterior se escribe como:

$$\sum_i F(h_e) = q_i \quad (3.5)$$

donde la suma es para todos los tubos j conectados al nudo i y $F(h_e)$ es una función no lineal de los niveles piezométricos en los nudos de estos tubos.

La solución de la red estática, consiste entonces en determinar los valores de h que satisfacen simultáneamente el sistema de ecuaciones no lineales.

Método propuesto

Debido a la dificultad que implica resolver un sistema no lineal y en virtud de que se desea disponer de un método que también resuelva eficientemente redes con más de 100 nudos, es decir, que implican sistemas de ecuaciones no lineales con más de 100 ecuaciones, se propone un procedimiento iterativo de solución, que se basa en hacer lineal la ecuación 3.1, dicha ecuación se puede expresar como:

$$h_{sj} - h_{ij} = c_j Q_j^m = f(Q_j) \quad (3.6)$$

si se desarrolla la ecuación 3.6 en serie de Taylor, en términos de un valor conocido del gasto Q_j , sea este Q_j^{k-1} se tiene:

$$f(Q_j) = f(Q_j^{k-1}) + f'(Q_j^{k-1}) \Delta Q + f''(Q_j^{k-1}) \frac{\Delta Q^2}{2} + \dots + f^{(n)}(Q_j^{k-1}) \frac{\Delta Q^n}{n!} \quad (3.7)$$

despreciando los términos de segundo orden en adelante y sustituyendo ΔQ por $Q_j - Q_j^{k-1}$ se tiene:

$$f(Q_j) = f(Q_j^{k-1}) + f'(Q_j^{k-1}) (Q_j - Q_j^{k-1}) \quad (3.8)$$

al sustituir Q_j por Q_j^k y sabiendo que $f(Q_j) = c_j Q_j^m$

$$c_j (Q_j^k)^m = c_j (Q_j^{k-1})^m + m c_j (Q_j^{k-1})^{m-1} (Q_j^k - Q_j^{k-1}) \quad (3.9)$$

desarrollando se tiene

$$c_j (Q_j^k)^m = c_j (Q_j^{k-1})^m - m c_j (Q_j^{k-1})^m + m c_j (Q_j^{k-1})^{m-1} Q_j^k \quad (3.10)$$

si ahora, según (3.6), se hace $c_j (Q_j^k)^m = h_{sj}^k - h_{ij}^k$ y se despeja Q_j^k resulta:

$$Q_j^k = \frac{h_{sj}^k - h_{ij}^k}{m c_j (Q_j^{k-1})^{m-1}} + \frac{m-1}{m} Q_j^{k-1} \quad (3.11)$$

Este desarrollo es válido para valores positivos de Q_j , para el caso de que Q_j sea negativa la ecuación (3.6) sería

$$h_{sj} - h_{ij} = -c_j Q_j^m$$

La ecuación (3.11) puede establecerse como

$$Q_j^k = \frac{h_{sj}^k - h_{ij}^k}{m c_j (Q_j^{k-1})^{m-1}} - \frac{m-1}{m} Q_j^{k-1} \quad (3.12)$$

Por lo que la ecuación 3.11 y 3.12 se escriben en una sola ecuación

$$Q_j^k = \frac{h_{sj}^k - h_{ij}^k}{mc_j |Q_j^{k-1}|^{m-1}} + \frac{m-1}{m} Q_j^{k-1} \quad (3.13)$$

Esta ecuación también puede expresarse así

$$Q_j^k = \alpha_j^{k-1} (h_{sj}^k - h_{ij}^k) + \gamma_j^{k-1} \quad (3.14)$$

siendo

$$\alpha_j^{k-1} = \frac{1}{mc_j |Q_j^{k-1}|^{m-1}} \quad (3.15)$$

$$\gamma_j^{k-1} = \frac{m-1}{m} Q_j^{k-1} \quad (3.16)$$

si se sustituye la ecuación 3.14 para cada gasto en la ecuación de continuidad de cada nudo, se llega a establecer un sistema de ecuaciones lineales que en la forma general se puede escribir

$$\left\{ \alpha_j^{k-1} \right\} \left\{ h^k \right\} = \left\{ q, \gamma_j^{k-1} \right\} \quad (3.17)$$

donde $\left\{ \alpha_j^{k-1} \right\}$ matriz de coeficientes del sistema de ecuaciones.

$\left\{ h^k \right\}$ vector de incógnitas.

$\left\{ q, \gamma_j^{k-1} \right\}$ vector columna de términos independientes.

Método de solución

Los niveles piezométricos en la red, se determinarán al resolver el sistema de ecuaciones (3.5), pero como éste es no lineal, se transforma en un sistema lineal (3.17), cuya solución se obtendrá por aproximaciones sucesivas. Si la solución de este último sistema es, por ejemplo, h^k , ésta se toma como conocida y se resuelve el sistema nuevamente; la solución h^{k+1} se aproximará más a la de las ecuaciones (3.5), lo cual constituye propiamente el método de solución.

De esta manera, se establece como método de solución del sistema de ecuaciones (3.5) la siguiente secuela de cálculo:

- 1.- Para $k=0$ se suponen los gastos en los tubos de la red
- 2.- Se calculan para todos los tubos α_j^{k-1} y β_j^{k-1}
- 3.- Se forma el sistema de ecuaciones lineales
- 4.- Se resuelve el sistema de ecuaciones obtenido en el paso 3, con lo cual se determina h^k
- 5.- Con los niveles piezométricos del paso 4, se calculan los gastos Q_j^k
- 6.- Se compara Q_j^k con Q_j^{k-1} ; si son aproximadamente iguales se continúa con el paso 7, de otro modo se considera $k-1=k$ y se regresa al paso 2
- 7.- Los niveles piezométricos en la red están dados por h^k y los gastos por Q_j^k con lo cual se concluye el cálculo.

En el apéndice B, se muestra un ejemplo simple de aplicación - que ayuda a entender con más facilidad el método descrito.

III.2 CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO

Como se estableció en el método numérico de solución (III.1), el modelo matemático está basado en la aplicación de la ecua-

ción de continuidad y de la energía. La ecuación de continuidad se aplica a cada nudo de la red considerando que la suma de gastos de entrada al nudo, debe ser igual a la suma de gastos de salida del mismo nudo. Entre los gastos de salida, se debe considerar el que demanda el nudo, o sea el agua que saldrá de la red. Debido a esto, es necesario conocer el agua que se demanda en cada nudo ya que el modelo requiere de estos datos que cuya suma es el gasto total que entra a la red. Esto se deduce también del principio de continuidad que aplicado a toda la red establece que el gasto total de entrada es igual a la suma de gastos demandados en los nudos. En el capítulo IV, se menciona de una manera breve, un criterio para determinar estos gastos de demanda en cada nudo y en el instructivo de usuario (apéndice B), se muestran los formatos para introducir todos los datos que requiere el modelo.

Por otra parte, si se considera la ecuación de energía, se debe tener en cuenta que el flujo del agua en la red, se establecerá de los puntos de mayor energía a otros de menor energía, como se ilustra en la figura (1.3), esto implica que se deben determinar los puntos de entrada de agua a la red. Para el caso que se estudia, dicha entrada, se efectúa por medio de 16 tanques y una planta de bombeo que para efectos de simulación, en el modelo son considerados como nudos de carga constante, esto implica suponer que el nivel de agua en el tanque no varía y esto es válido debido a que se está utilizando un modelo estático. Estos nudos se suministran como datos, incluyendo su respectiva energía potencial (carga de presión + carga de elevación). Como se recordará, el valor de las pérdidas de energía, estará en función de la longitud del tramo, del diámetro del tubo y del tipo de material de que esta hecha la tubería. Debido a esto, es necesario introducir estos parámetros como datos. Para el modelo en cuestión, se tomo el coeficiente de pérdidas por fricción de la ecuación de Manning.

Resumiendo, para el funcionamiento del modelo, se necesitan como datos de partida; los gastos demandados, los nudos de carga constante y para cada tramo; longitud, diámetro y coeficiente de pérdidas y resolviendo las ecuaciones de continuidad y de energía se obtienen como resultados, las presiones en cada nudo y los gastos que circulan en cada tubo.

En la figura 3.3, se muestra una representación gráfica del funcionamiento del modelo.

III.3 ALGORITMO DE SOLUCION

Introducción

Como se mostró en el método numérico de solución, el problema de determinar los gastos en los tubos y las cargas en los nudos de la red, puede resolverse transformando el sistema de ecuaciones no lineales en un sistema lineal, que originalmente se formará suponiendo los valores de los gastos, y mediante una serie de iteraciones se llegará a los valores reales que cumplan con el principio de continuidad y de la energía.

En cada una de estas iteraciones, es necesario resolver un sistema de ecuaciones lineales, que tendrá tantas incógnitas como número de nudos de carga variable se tengan en la red, por este hecho, para redes grandes con un número mayor de 100 nudos, es necesario buscar un algoritmo eficiente que permita llegar a la solución de dicho sistema usando poco tiempo de computadora.

En la actualidad es frecuente la necesidad de resolver un sistema de ecuaciones lineales, esto trajo como consecuencia el desarrollo de numerosos métodos que permiten resolver en forma eficiente dichos sistemas. Más adelante se describe en forma detallada el método que se utiliza en el modelo para la solución del sistema de ecuaciones simultáneas.

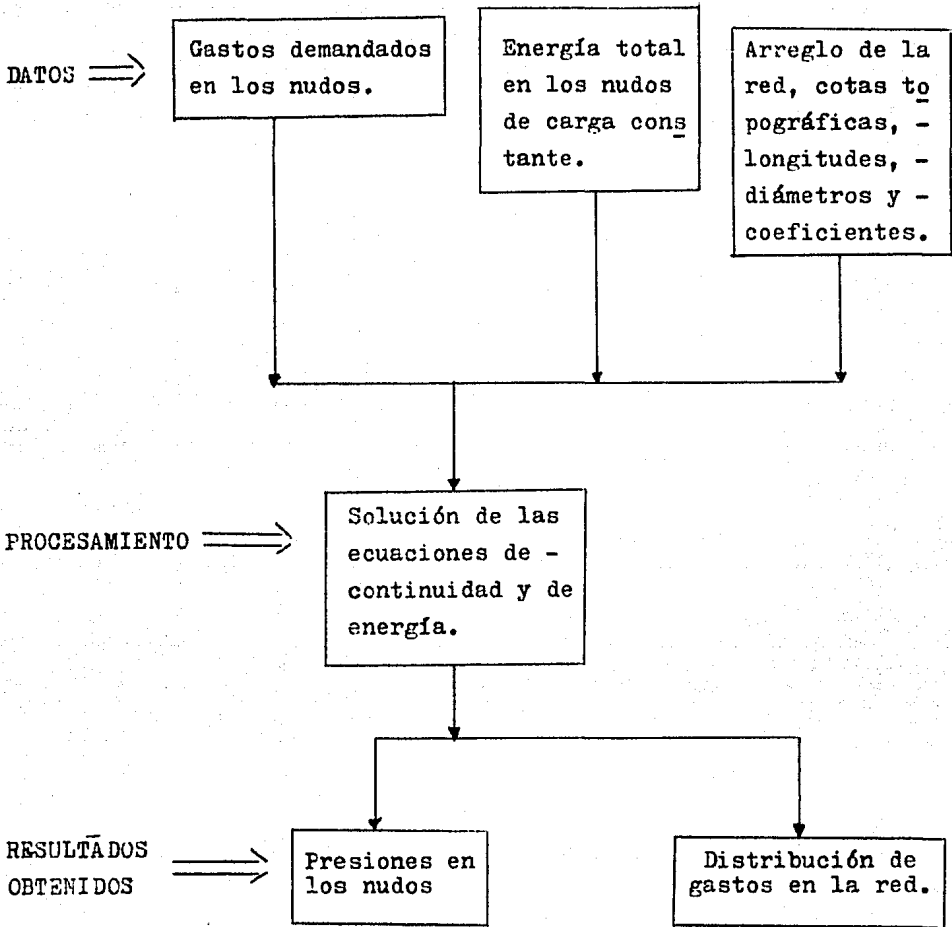


Fig. 3.3 Representación gráfica de las condiciones de funcionamiento del modelo estático.

Conceptos fundamentales de los sistemas de ecuaciones lineales

Un sistema de ecuaciones algebraicas lineales es un conjunto de ecuaciones de la forma:

$$\begin{aligned}
 a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\
 a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\
 a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \dots + a_{3n}x_n &= b_3 \\
 \dots & \\
 a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \dots + a_{nn}x_n &= b_n
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

recordando la definición de producto entre matrices, este sistema de n ecuaciones algebraicas lineales con n incógnitas puede escribirse en la forma matricial

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

y haciendo $A = \begin{bmatrix} a_{ij} \end{bmatrix}$, $\bar{x} = \{x_i\}^T$, $b = \{b_j\}^T$

donde $i = 1, 2, 3, \dots, n$; $j = 1, 2, 3, \dots, n$ y T significa la transpuesta de la matriz original. El sistema (3.18) puede escribirse abreviadamente como

$$A\bar{X} = \bar{b}$$

(3.20)

a la matriz A se le llama "matriz del sistema". A la formada por ésta, y por el vector de términos independientes se le llama "matriz ampliada" del sistema.

La solución del sistema de ecuaciones es un conjunto de n valores $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ que satisfacen simultáneamente a todas las ecuaciones.

En la solución de estos sistemas pueden presentarse tres casos:

Primer caso.- Que su solución sea única; se dice entonces que el sistema es compatible y determinado.

Segundo caso.- Que admita más de una solución; entonces el sistema es compatible pero indeterminado.

Tercer caso.- Que no admita solución; entonces el sistema es incompatible.

Solución del sistema de ecuaciones lineales

En la secuela de cálculo es muy importante el procedimiento para resolver el sistema de ecuaciones lineales, ya que se utilizará varias veces, y dado que el número de ecuaciones es grande, la rapidez del método numérico de solución depende en gran parte del procedimiento para resolver el sistema de ecuaciones.

Método de Gauss-Seidel

Este método emplea aproximaciones sucesivas, esto significa que es iterativo y cuando converge, se aproximará a la solu--

ción en cada iteración partiendo de un valor inicial.

Supóngase que en el sistema:

$$A\bar{X} = \bar{b} \quad (3.20)$$

la matriz A se sustituye por:

$$A = D + R$$

donde D es una matriz diagonal, es decir una matriz cuadrada cuyos elementos sobre la diagonal principal son los únicos diferentes de cero. R es otra matriz que contiene ceros en su diagonal principal y los restantes elementos de A, en sus demás elementos. Sustituyendo en la expresión (3.20):

$$\begin{aligned} (D + R)\bar{X} &= \bar{b} \\ D\bar{X} + R\bar{X} &= \bar{b} \\ D\bar{X} &= \bar{b} - R\bar{X} \end{aligned}$$

multiplicando ambos miembros por D^{-1}

$$\bar{X} = D^{-1}\bar{b} - D^{-1}R\bar{X}$$

ecuación que puede manejarse como fórmula de recurrencia de la siguiente forma:

$$X^{(k+1)} = D^{-1}\bar{b} - D^{-1}R X^{(k)} \quad (3.21)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

El método de Gauss-Seidel, definido por la fórmula matricial de recurrencia (3.21), implica que dado el sistema (3.20) se despeje x_1 de la primera ecuación, x_2 de la segunda, x_3 de la

tercera, etc. , quedando:

$$\begin{aligned}
 x_1^{(k+1)} &= \frac{1}{a_{11}} (b_1 - a_{12}x_2^{(k)} - a_{13}x_3^{(k)} - \dots - a_{1n}x_n^{(k)}) \\
 x_2^{(k+1)} &= \frac{1}{a_{22}} (b_2 - a_{21}x_1^{(k+1)} - a_{23}x_3^{(k)} - \dots - a_{2n}x_n^{(k)}) \\
 x_3^{(k+1)} &= \frac{1}{a_{33}} (b_3 - a_{31}x_1^{(k+1)} - a_{32}x_2^{(k+1)} - \dots - a_{3n}x_n^{(k)}) \quad (3.22) \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 x_n^{(k+1)} &= \frac{1}{a_{nn}} (b_n - a_{n1}x_1^{(k+1)} - a_{n2}x_2^{(k+1)} - \dots - a_{n(n-1)}x_{n-1}^{(k+1)})
 \end{aligned}$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

partiendo de una primera aproximación:

$$\bar{x}^{(0)} = \left[x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} \right]^T$$

se sustituye en el segundo miembro de la primera ecuación del sistema (3.22) para obtener x_1^{k+1} , este valor se utiliza inmediatamente en la segunda ecuación junto con $x_3^{(0)}$, para obtener $x_2^{(k+1)}$ y así sucesivamente.

Convergencia del método de Gauss-Seidel

El método de Gauss-Seidel tiene la desventaja de que no siempre converge a la solución del sistema y algunas veces lo hace pero muy lentamente. La condición necesaria para que el método converja consiste en que cada uno de los elementos que se encuentran en la diagonal principal de la matriz de los coeficientes sean mayores, en valor absoluto, que los demás elementos del renglón correspondiente. Esta condición es nece

saría aunque no suficiente, pues si no se cumple, si se puede asegurar la no convergencia del método.

La condición suficiente para la convergencia consiste en que los coeficientes de la diagonal principal sean mayores, en valor absoluto, que la suma de los demás elementos del renglón. Cuando esta condición se cumple puede asegurarse que el método converge y en caso contrario, no es posible asegurar nada.

Ejemplo de aplicación del método de Gauss-Seidel

A continuación se resuelve el siguiente sistema de ecuaciones, utilizando el método de Gauss-Seidel.

$$\begin{aligned} 6x_1 + 2x_2 + x_3 &= 22 \\ -x_1 + 8x_2 + 2x_3 &= 30 \\ x_1 - x_2 + 6x_3 &= 23 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Aplicando el sistema 3.22 a este caso se tiene:

$$\begin{aligned} x_1^{(k+1)} &= \frac{1}{6} (22 - 2x_2^{(k)} - x_3^{(k)}) \\ x_2^{(k+1)} &= \frac{1}{8} (30 + x_1^{(k+1)} - 2x_3^{(k)}) \\ x_3^{(k+1)} &= \frac{1}{6} (23 - x_1^{(k+1)} + x_2^{(k+1)}) \end{aligned} \quad (3.24)$$

tomando como vector inicial $x_2 = 0$, $x_3 = 0$ y sustituyendo $k = 0$ en (3.24)

$$\begin{aligned} x_1^{(1)} &= \frac{1}{6} (22 - 0 - 0) ; & x_1^{(1)} &= 3.667 \\ x_2^{(1)} &= \frac{1}{8} (30 + 3.667 - 2(0)) ; & x_2^{(1)} &= 4.208 \end{aligned}$$

$$x_3^{(1)} = \frac{1}{6} (23 - 3.667 + 4.208) ; x_3^{(1)} = 3.924$$

para $k = 1$

$$x_1^{(2)} = \frac{1}{6} (22 - 2(4.208) - 3.924) ; x_1^{(2)} = 1.61$$

$$x_2^{(2)} = \frac{1}{8} (30 + 1.61 - 2(3.924)) ; x_2^{(2)} = 2.97$$

$$x_3^{(2)} = \frac{1}{6} (23 - 1.61 + 2.97) ; x_3^{(2)} = 4.06$$

para $k = 2$

$$x_1^{(3)} = \frac{1}{6} (22 - 2(2.97) - 4.06) ; x_1^{(3)} = 2.0$$

$$x_2^{(3)} = \frac{1}{8} (30 + 2.0 - 2(4.06)) ; x_2^{(3)} = 2.985$$

$$x_3^{(3)} = \frac{1}{6} (23 - 2.0 + 2.985) ; x_3^{(3)} = 3.998$$

para $k = 3$

$$x_1^{(4)} = \frac{1}{6} (22 - 2(2.985) - 3.998) ; x_1^{(4)} = 2.005$$

$$x_2^{(4)} = \frac{1}{8} (30 + 2.005 - 2(3.998)) ; x_2^{(4)} = 3.001$$

$$x_3^{(4)} = \frac{1}{6} (23 - 2.005 + 3.001) ; x_3^{(4)} = 3.999$$

para $k = 4$

$$x_1^{(5)} = \frac{1}{6} (22 - 2(3.001) - 3.999) ; x_1^{(5)} = 2.000$$

$$x_2^{(5)} = \frac{1}{8} (30 + 2.0 - 2(3.999)) ; x_2^{(5)} = 3.000$$

$$x_3^{(5)} = \frac{1}{6} (23 - 2.000 - 3.000) ; x_3^{(5)} = 4.000$$

La solución del sistema es:

$$x_1 = 2.0$$

$$x_2 = 3.0$$

$$x_3 = 4.0$$

Método de sobrerrelajación sucesiva (SOR)

Como se mencionó anteriormente, este método se basa en el mismo algoritmo que el de Gauss-Seidel, con la única variante de que en este, se introduce un factor que permite acelerar la convergencia del método. A continuación se muestra donde se introduce este factor.

Si las ecuaciones iterativas de Gauss-Seidel se escriben considerando un sistema de 4 ecuaciones, de la forma siguiente

$$\begin{aligned} x_1^{(k+1)} &= x_1^{(k)} + \left[\frac{1}{a_{11}} \left\{ b_1 - a_{11}x_1^{(k)} - a_{12}x_2^{(k)} - a_{13}x_3^{(k)} - a_{14}x_4^{(k)} \right\} \right] \\ x_2^{(k+1)} &= x_2^{(k)} + \left[\frac{1}{a_{22}} \left\{ b_2 - a_{21}x_1^{(k+1)} - a_{22}x_2^{(k)} - a_{23}x_3^{(k)} - a_{24}x_4^{(k)} \right\} \right] \\ x_3^{(k+1)} &= x_3^{(k)} + \left[\frac{1}{a_{33}} \left\{ b_3 - a_{31}x_1^{(k+1)} - a_{32}x_2^{(k+1)} - a_{33}x_3^{(k)} - a_{34}x_4^{(k)} \right\} \right] \\ x_4^{(k+1)} &= x_4^{(k)} + \left[\frac{1}{a_{44}} \left\{ b_4 - a_{41}x_1^{(k+1)} - a_{42}x_2^{(k+1)} - a_{43}x_3^{(k+1)} - a_{44}x_4^{(k)} \right\} \right] \end{aligned} \quad (3.25)$$

se puede observar que las expresiones entre corchetes, son -- las correcciones o cambios hechos a $x_i^{(k)}$, $i=1,4$ para una iteración de Gauss-Seidel.

Siendo las correcciones sucesivas de un solo signo, puede ser adecuado que la convergencia sea acelerada en cada ecuación -

de (3.25) dando un término de corrección más grande, esta idea da origen al método SOR, el cual queda definido por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 x_1^{(k+1)} &= x_1^{(k)} + \left[\frac{\omega}{a_{11}} \{ b_1 - a_{11}x_1^{(k)} - a_{12}x_2^{(k)} - a_{13}x_3^{(k)} - a_{14}x_4^{(k)} \} \right] \\
 x_2^{(k+1)} &= x_2^{(k)} + \left[\frac{\omega}{a_{22}} \{ b_2 - a_{21}x_1^{(k+1)} - a_{22}x_2^{(k)} - a_{23}x_3^{(k)} - a_{24}x_4^{(k)} \} \right] \\
 x_3^{(k+1)} &= x_3^{(k)} + \left[\frac{\omega}{a_{33}} \{ b_3 - a_{31}x_1^{(k+1)} - a_{32}x_2^{(k+1)} - a_{33}x_3^{(k)} - a_{34}x_4^{(k)} \} \right] \\
 x_4^{(k+1)} &= x_4^{(k)} + \left[\frac{\omega}{a_{44}} \{ b_4 - a_{41}x_1^{(k+1)} - a_{42}x_2^{(k+1)} - a_{43}x_3^{(k+1)} - a_{44}x_4^{(k)} \} \right]
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

en este sistema (3.26), el factor ω se denomina parámetro de aceleración ó factor de relajación, generalmente el rango de este factor es; $1 < \omega < 2$. La determinación del valor óptimo de ω para la máxima velocidad de convergencia requiere de un estudio más detallado de matrices; por ello se ha tomado el valor recomendado de $\omega = 1.85$ (ref. 2), sin embargo dicho factor de aceleración se puede estimar a partir de la ecuación

$$\omega = \frac{2}{1 + \sqrt{1-P}} \tag{3.27}$$

donde:

$$P = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n |x_i^{k+1} - x_i^k|}{\sum_{i=1}^n |x_i^k - x_i^{k-1}|} \tag{3.28}$$

Para fines prácticos, se considera que P es igual al cociente anterior para $k \approx 200$ en redes con más de 100 nudos.

IV. CALIBRACION DEL MODELO

IV.1 GENERACION DE INFORMACION (DEMANDAS, ESTACIONES MEDIDORAS DE PRESION)

Estaciones medidoras de presión

En la red primaria de agua potable de la ciudad de México, se cuenta con 32 estaciones medidoras de presión, éstas son del tipo manógrafos "vical", con registro continuo durante las 24 horas.

La ubicación de las estaciones se muestra en el plano 4.1, en el cual puede observarse, que la zona sur-oriente, muestra escasez en la densidad de estaciones; por lo que sería muy conveniente aumentar el número de éstas, para cubrir mejor dicha zona tomando mediciones en otros puntos.

En base a los registros obtenidos por medio de estaciones de medición, ha sido posible efectuar un análisis de la fluctuación de presiones en la red, esto ha permitido la elaboración de planos, en los cuales se muestra la configuración de las

curvas de igual presión para diferentes horas (referencia 1).

Esta información obtenida de presiones medidas directamente en la red servirá como base para la calibración del modelo matemático estático, esto significa que los resultados obtenidos con el modelo deben ser coherentes con las presiones reales; de -- tal forma, el modelo quedará calibrado cuando sus resultados -- sean iguales ó muy aproximados a los valores reales. Una vez -- que esto se haya logrado, se estará en posibilidad de simular -- otro tipo de alternativas para la red, como pueden ser:

- a) Expansiones de la red.
- b) Incremento en las demandas.
- c) Efecto del aumento de tanques de regularización.
- d) Efecto por la falla de algunos tanques.
- e) Límites de la influencia de los tanques, etc.

Para efectuar la calibración, se escogerá una hora determina-- da así como el gasto que corresponde a estas presiones.

Como se mencionó anteriormente, es difícil conocer en forma -- exacta el valor de este gasto, pues hace falta aforar en algu-- nos puntos de llegada de agua a la red primaria y además se -- debe tener en cuenta que los gastos tienen variaciones hora-- rias, diarias, mensuales y estacionales.

En la referencia 1, se muestran los valores de gastos arroxi-- mados calculados en forma teórica, mediante una expresión matemá-- tica basada en la hipótesis de que el gasto varía en forma in-- versamente proporcional a las presiones que se tienen en la -- red, además de esta hipótesis se considera un gasto promedio -- de ingreso a la red.

En la tabla 4.1, se muestran las estaciones medidoras de pre--

No.	ESTACION	ALTURAS (m)	
		Estimadas	Lev. Topográfico
1	Acantilado	2242	2242.391
2	Parque Vía	2254	2247.988
3	Venus	2234	2236.772
4	Escalera	2234	2234.456
5	Ticomán	2233	2234.464
6	Calle 325	2234	2232.584
7	Ahuizotla	2265	2255.699
8	Cuitláhuac	2235	2235.364
9	Talismán	2232	2232.267
10	Gran Canal	2233	2234.033
11	Ing. Militares	2274	2272.950
12	Tacuba	2240	2241.222
13	R. Flores Magón	2236	2235.439
14	Chopo (Geranio)	2232	2233.729
15	Aluminio (Platino)	2232	2231.343
16	Norte 17	2232	2232.499
17	Homero	2248	2246.870
18	P. Arriaga	2231	2231.975
19	Toledo	2236	2231.978
20	Atlixco	2235	2236.052
21	Sur 69	2232	2233.297
22	Río Churubasco	2233	2233.417
23	Tezontle	2234	-----
24	Loreto	2236	-----
25	Ermita	2238	2238.183
26	Calle 2 (Año de Juárez)	2234	2234.613
27	Bretaña	2233	2233.372
28	Nevado	2236	-----
29	Repúblicas	2238	-----
30	Amores	2249	-----
31	Centenario (Molinos)	2267	-----
32	Universidad	2258	2261.384

Tabla 4.1 Estaciones medidoras de presión.

sión y sus elevaciones (reales y aproximadas) referidas al nivel medio del mar.

Demandas en la red

Los factores que influyen en la demanda de agua potable son -- muy diversos y por ello resultaría muy difícil precisarlas en forma exacta; por ejemplo, una zona comercial demandará una -- cantidad diferente de agua que una zona habitacional. Actualmente la D.G.C.O.H., trabaja en algunos modelos matemáticos -- que toman en cuenta la mayoría de los factores que afectan las demandas, con lo cual se pretende a corto plazo, contar con da tos más precisos en cuanto a la evaluación de dicha demanda.

Para utilizar el modelo estático, se requiere conocer las demandas de gastos de cada nudo de la red, ya que se recordará -- según lo explicado en el capítulo tres, que en cada nudo de la red se debe cumplir la ecuación de continuidad "suma de gastos de entrada al nudo igual a la suma de gastos de salida del nudo", en este caso la demanda representará un gasto de salida -- del nudo. El considerar la demanda en cada nudo, es hipotético porque debe notarse que el consumo real del agua que circula -- por la red primaria, se efectúa a través de derivaciones que -- constituyen los conductos que forman la red secundaria. Esto -- queda ilustrado en la figura 4.1.

Para el cálculo de la demanda en cada nudo de la red primaria, se utiliza el siguiente método:

a) Se determina el área tributaria de cada nudo, esto se hace dividiendo con una línea la mitad de cada tubo que une dos nudos y al prolongar estas perpendicularmente, se obtendrá dicha área (véase figura 4.1).

b) Se obtiene el número total de habitantes para esa área. Ca-

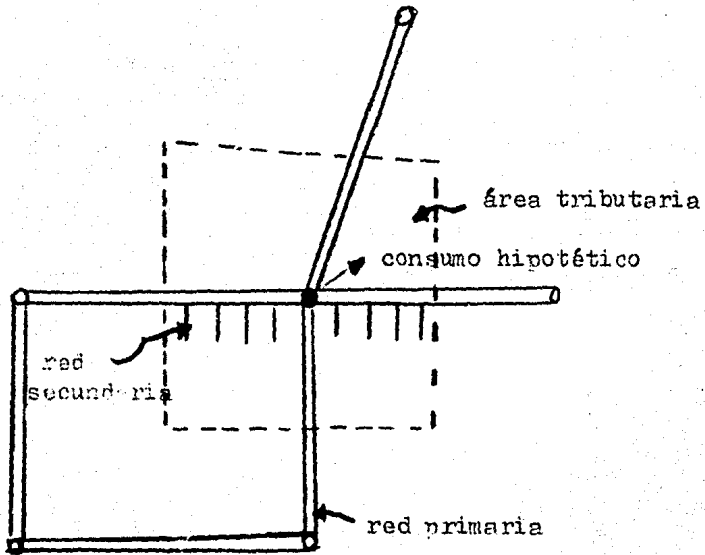


Fig. 4.1 Área tributaria para determinar las demandas en los nudos.

be aclarar que este número será aproximado, ya que se considera una densidad de población (habitantes/hectárea) por cada de legación política.

c) Se determina la dotación en lts./hab-día.

d) Se multiplica la dotación por el número de habitantes para obtener el gasto demandado en el nudo.

Para el Distrito Federal, se asigna una dotación media de 360 lts./hab-día.

IV.2 SIMULACION ORIGINAL

Ya anteriormente ha sido simulado el funcionamiento de la red primaria de agua potable de la ciudad de México utilizando el modelo estático aquí descrito, en el plano 4.2, se muestran -- los valores de las presiones obtenidos mediante el modelo. Los datos utilizados en esta simulación, son los mismos que se utilizaron en el proceso de calibración del modelo, excepto el valor del gasto que en esta ocasión se consideró un valor promedio y para efectuar la calibración, se tomó un gasto máximo -- aproximado.

Para determinar la validez de los resultados obtenidos mediante el modelo matemático, se requieren conocer algunos valores que se hayan obtenido de la medición directa de la red, en este caso se dispone de la información que proporcionan las estaciones medidoras de presión, ubicadas en diversos puntos de la red, en el plano mencionado además de los valores obtenidos -- con el modelo, se indican los valores de las presiones promedio del día 8 de mayo de 1984, obtenidas por medio de las estaciones medidoras de presión. Al comparar ambos resultados, se puede apreciar que en algunas zonas, estos son muy diferentes;

lo notorio de estas diferencias es que con el modelo, se obtuvieron resultados que son de mayor valor a los que normalmente se presentan; por ejemplo, en la zona sur especialmente en el rumbo Iztapalapa los valores de las presiones en los nudos según el modelo son de 10 a 20 m. de columna de agua, esto es poco factible ya que en dicha zona las presiones fluctúan entre valores más bajos que van de 2 a 10 m. de columna de agua (referencia 1).

En cambio en la zona Noroeste, por el rumbo de Tacuba, los valores que se obtienen con el modelo son más parecidos a los -- que normalmente ocurren.

Las diferencias aquí descritas originan la necesidad de buscar un procedimiento de calibración que permita representar de una mejor manera las condiciones de funcionamiento del sistema y -- así obtener resultados más aproximados a los que proporcionan las mediciones directas. Dicho procedimiento se describe en el subcapítulo siguiente.

IV.3 SIMULACIONES PARA CALIBRACION

Consideraciones para las simulaciones

Para la calibración del modelo se eligió un gasto de $22.15 \text{ m}^3/\text{s}$ y se ha supuesto que dicho valor corresponde al gasto máximo -- que circula en la red, lo cual probablemente ocurre de las 14 a las 17 hrs. (ref. 1), desafortunadamente no se puede comprobar si este valor es correcto debido a que se carece de registros de variación horaria de gastos para la red primaria. Nótese que el valor propuesto es muy cercano al real, pues se ha -- estimado un gasto medio de $18.22 \text{ m}^3/\text{s}$ (tabla 2.3).

Ha sido necesario determinar un valor fijo para el gasto, pues

debe recordarse que se trata de un modelo estático que no --- considera las variaciones de gastos y presiones con respecto - al tiempo.

Variación de la presión y el gasto

En cualquier sistema de agua potable, el gasto que entra a la red y las presiones disponibles en ésta sufren una variación - con respecto al tiempo, esto se debe a que la demanda no es -- constante; por ejemplo, en determinadas horas la población consume cantidades muy grandes, para el caso de la ciudad de México, se ha estimado que las horas de mayor demanda son de las - 6 a las 22. Debido a esta situación un sistema de agua potable siempre se diseña para el caso más crítico que será cuando se tenga la máxima demanda, siguiendo este criterio las simulaciones para calibración se efectuaron considerando un gasto máximo para el que corresponden las presiones mínimas.

En la figura 4.2, se muestra un registro típico de la variación horaria de presiones en la estación Ponciano Arriaga. En él puede observarse que la presión máxima se presenta en torno a las 4 ó 5 de la mañana, luego se inicia un descenso brusco - que termina a las 10, de ahí hasta las 18 hrs. la presión es - mínima y constante, finalmente se inicia un ascenso lento de - presión que culmina otra vez a las 4:00 A.M. del día siguiente. El análisis de dicho registro y la suposición de que a las 4 hrs. hay poca demanda de agua por parte de la población confirma la hipótesis de que al gasto máximo corresponden las presiones mínimas.

Información disponible para la calibración

En la calibración del modelo, se han empleado los registros de las estaciones medidoras de presión que sirvieron para el análisis.

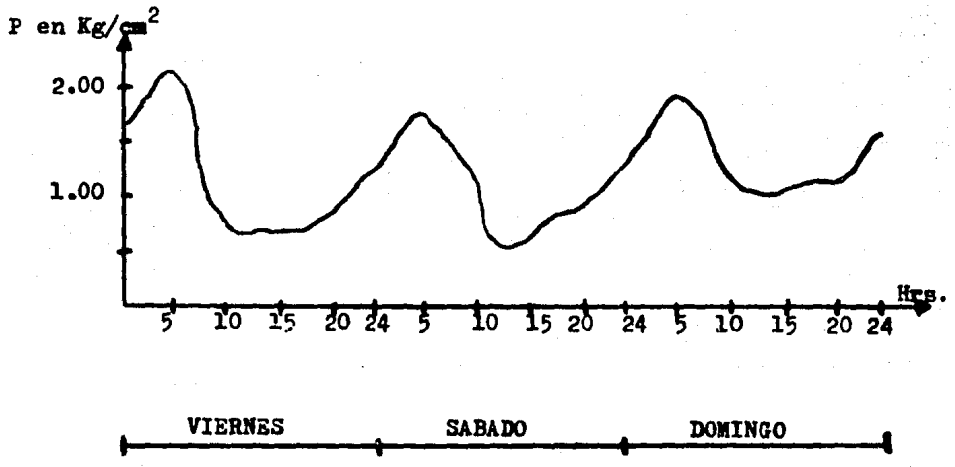
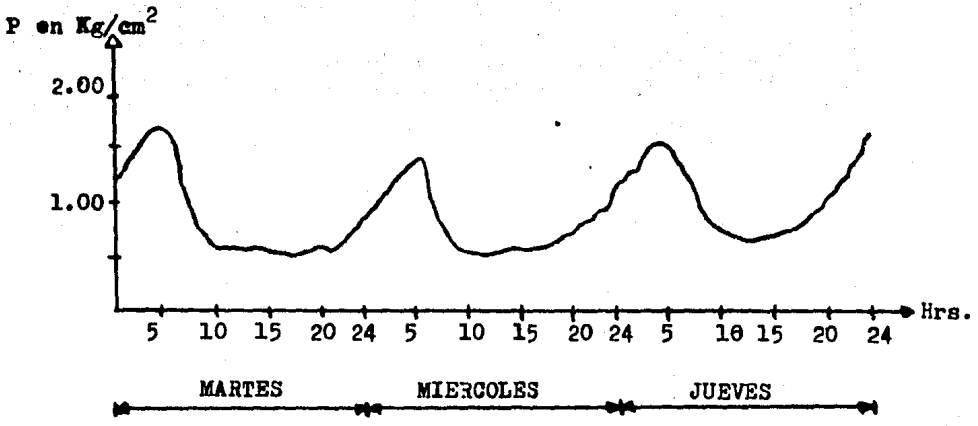


Fig. 4.2 Registro de la variación de presiones en la estación Ponciano Arriaga.

lisis de la distribución de presiones de la ref. 1. De dicho análisis se puede mencionar en términos generales; que las zonas norte y sur-poniente, tienen presiones adecuadas que garantizan un buen nivel de servicio a los usuarios, por el contrario la zona sur-oriente es la más castigada en cuando a las bajas presiones, ya que oscilan entre 2 y 3 m. de columna de agua durante el periodo de las 10 a las 18 hrs. que es el de máxima actividad de la población. Esta información es fundamental, pues en la medida en que se logren obtener resultados similares con el modelo, se podrá afirmar que la simulación es correcta.

En los planos 4.3 y 4.4, se muestran las distribuciones de presiones con referencia al nivel usuario y al nivel medio del mar, respectivamente, para el día 8 de mayo de 1984 y para las 16 hrs. Dichos planos han servido de base para la calibración del modelo.

Procedimiento para la calibración

La calibración del modelo estático que se describe, se ha basado en ajustar los valores de los coeficientes de pérdidas; de tal manera que se obtengan presiones similares a las que ocurren para el gasto considerado. Esto se llevo a cabo por medio de una serie de "corridas" de prueba combinando distintos valores de coeficientes para observar las variaciones de las presiones. Para la primera simulación, se asignó el mismo valor para los coeficientes de todos los tramos suponiendo que la tubería fuera de un solo tipo de material y que las pérdidas por piezas especiales pudieran despreciarse. En dicha simulación se observó que los valores de las presiones eran más altos que los que se presentan normalmente, estos resultados se justifican si se toma en cuenta que las pérdidas locales son de magnitud considerable y no pueden considerarse como despreciables.

Esto se debe a la gran cantidad de piezas especiales y principalmente a los grados de abertura que tienen las válvulas, desafortunadamente se tiene poca información al respecto. También debe tenerse en cuenta que de los tramos de red primaria salen numerosos conductos que constituyen la red secundaria, estas salidas incrementan considerablemente las pérdidas de energía. Por lo antes expuesto, es lógico suponer que la calibración se haga modificando los valores de los coeficientes de pérdidas ya que así se simula de una manera indirecta el grado de abertura de las válvulas y los otros tipos de pérdidas.

En el plano 2.1, se muestra el arreglo de la red indicando el número asignado a cada nudo y a cada tramo.

IV.4 SIMULACION CALIBRADA

Alternativas de calibración

La calibración del modelo estático descrito, se basó fundamentalmente en el ajuste de los valores de los coeficientes de pérdidas para obtener presiones similares a las medidas en el prototipo. Además de los valores de las presiones se deben comparar los gastos que aportan los tanques de regulación que deben ser semejantes a los que se miden mediante dispositivos de aforo. Desde este punto de vista se tienen dos alternativas para efectuar la calibración; la primera consiste en ajustar los coeficientes de pérdidas para obtener presiones semejantes a las que se miden y la segunda consiste en ajustar los mismos coeficientes para obtener gastos de ingreso a la red, semejantes a los que se miden. En rigor, utilizando indistintamente cualquiera de los dos parámetros mencionados (presiones y gastos) como punto de comparación, los resultados deberían ser los mismos; sin embargo, durante el desarrollo de la calibración se observó que las demandas asignadas a cada nudo influ--

yen de manera decisiva en los resultados de los gastos que ingresan a la red. Debido a este hecho y a que los factores que influyen en la demanda son muy diversos y resulta difícil precisarlas con exactitud, se siguió la primera alternativa. Además debe tenerse en cuenta que se dispone de información continua que proporcionan las 32 estaciones medidoras de presión y en cambio el aforo de gastos no se realiza en todos los puntos de entrada de agua a la red.

Para el desarrollo de la calibración, se tenían dos series de datos de las demandas en los nudos, utilizando una de ellas -- se observó en todas las simulaciones que el gasto de aportación al sistema de los tanques Chalmita 1 y 2 era muy bajo al que normalmente ocurre, se utilizó la otra serie de datos y se apreció un aumento notable en el gasto de aportación de los -- tanques mencionados. Esto indica una respuesta concordante del modelo con las condiciones que se fijan, en este caso las demandas. De este hecho se puede concluir, que las demandas deben ser calculadas con un buen grado de aproximación.

En las figuras 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6, se graficaron las demandas de algunos nudos que fueron elegidos por zonas y al azar. Los nudos graficados con el símbolo X, corresponden a los datos -- utilizados para la calibración del modelo, los valores fueron escogidos debido a la mejor concordancia entre las demandas y los gastos de entrada al sistema. En las gráficas anteriores, se muestra que las demandas de los nudos en las zonas Norte, -- Poniente y Oriente, son mayores en la segunda serie de datos, esto justifica en parte lo que ocurrió en las primeras simulaciones, donde la aportación de los tanques del sistema Norte-Barrientos era muy pequeña. Al utilizar la segunda serie de datos esta aportación aumentó debido al incremento de la demanda en las zonas mencionadas.

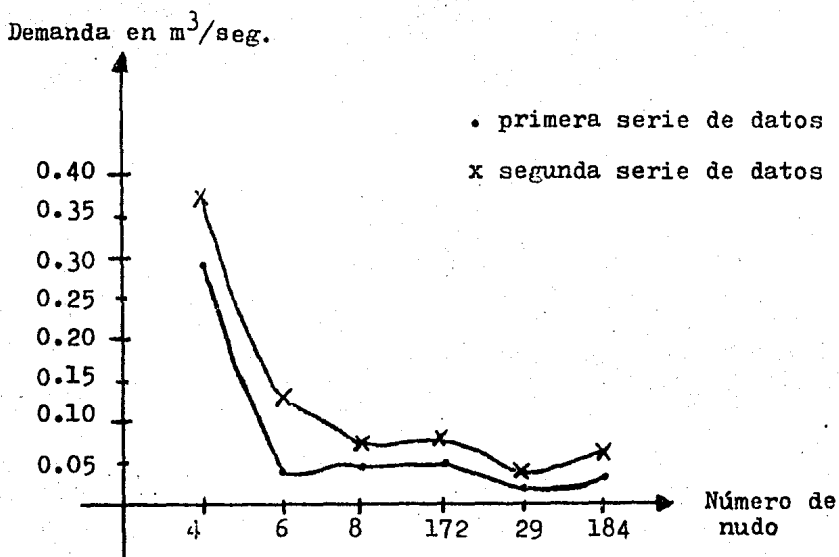


Fig. 4.3 Gráfica de las demandas en algunos nudos de la zona norte, para 2 series distintas de datos.

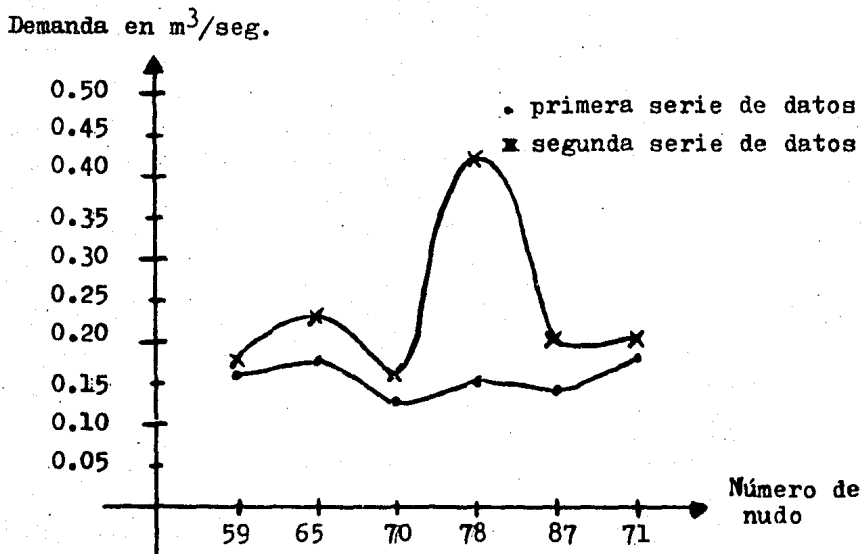


Fig. 4.4 Gráfica de las demandas en algunos nudos de la zona poniente, para 2 series distintas de datos.

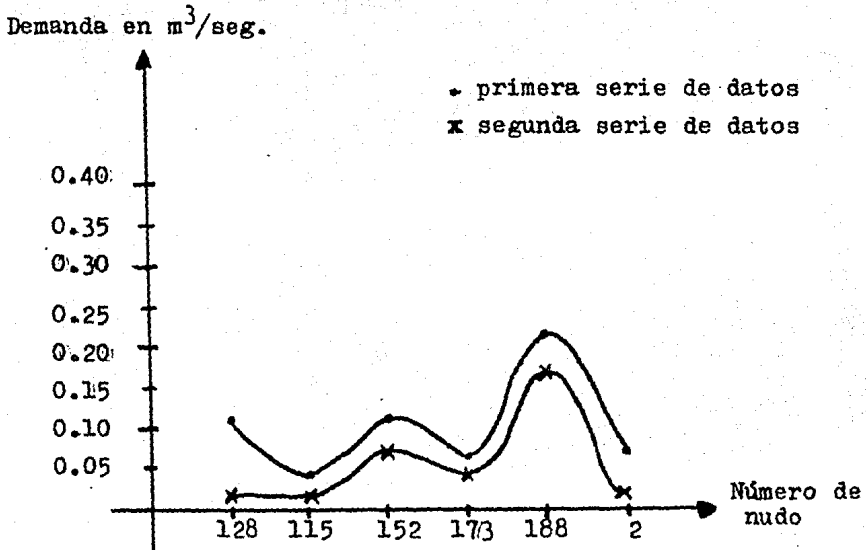


Fig. 4.5 Gráfica de las demandas en algunos nudos de la zona sur, para 2 series distintas de datos.

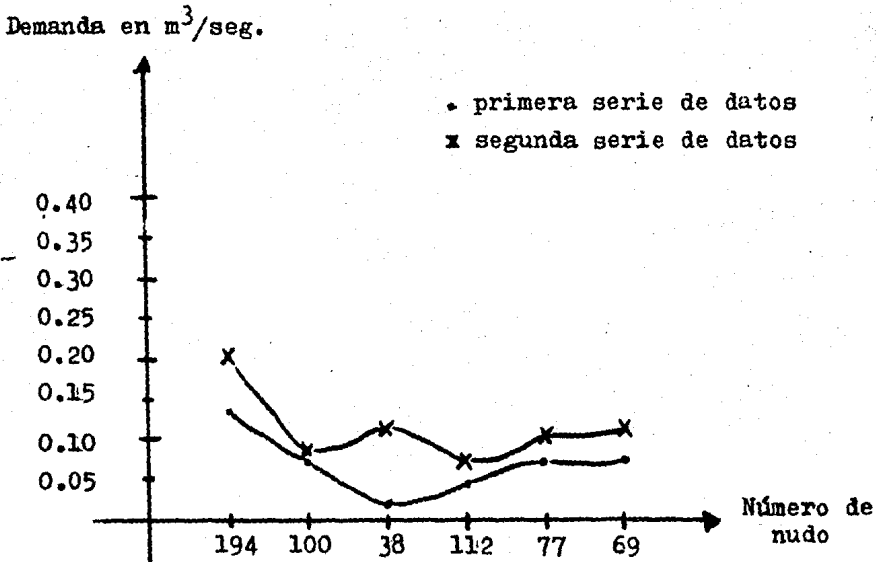


Fig. 4.6 Gráfica de las demandas en algunos nudos de la zona oriente, para 2 series distintas de datos.

Análisis de resultados

En los planos 4.4 y 4.5, se muestran los resultados de la simulación calibrada, en el primero se trazaron las curvas de presión con respecto al nivel medio del mar y en el segundo, las curvas de presión a nivel usuario; es decir, tomando las cargas disponibles. De los valores mostrados en dichos planos, se aprecia que en las zonas Norte y Sur-Poniente las cargas de presión son aceptables para garantizar el suministro normal de agua, los valores varían de 10 a 25 m. en cambio en la zona Sur-Oriente, se tienen valores más bajos que van de 1 a 7 m. Si se acepta que una carga menor de 4 m., no es aceptable para asegurar un buen servicio, algunas zonas cubiertas por la red primaria no tendrían servicio satisfactorio en las horas de máxima demanda. Puesto que el análisis aquí presentado corresponde a la red primaria, es fácil comprender que este problema se acentúa en la red secundaria y sobre todo en las horas de baja presión, esto implica un efecto de racionamiento del agua en algunas partes de la ciudad. Este hecho permite suponer que el volumen de agua que se consume en estas zonas puede ser menor a las demandas calculadas. Por otra parte, teniendo en cuenta las curvas de presión al nivel medio del mar, se puede afirmar que existe un flujo de agua del norte, poniente y sur hacia el oriente. En el plano 4.4, se muestran las curvas obtenidas con el modelo y con las estaciones medidoras de presión, la semejanza es notoria lo que permite afirmar que se ha logrado el objetivo de calibrar el modelo. Es pertinente aclarar que en algunos nudos, principalmente los cercanos a los tanques, se han permitido presiones altas, con la finalidad de obtener gastos de ingreso a la red semejantes a los que se estiman para cada uno de los sistemas, aun así se puede apreciar que la aportación de gasto que arroja el modelo de los tanques Chalmi ta 1 y 2, es menor a la que se ha medido, esto hace suponer que las demandas en el norte probablemente son mayores que las

calculadas. En la tabla 4.2, se muestran los gastos obtenidos mediante el modelo y los gastos aproximados que aporta cada sistema.

Por último, es importante mencionar que en el plano 4.5, se muestran cuatro nudos con carga negativa, esto se debe a que su cota topográfica es mayor que la cota de servicio en la zona y dicho resultado debe interpretarse como insuficiencia para satisfacer la demanda. Sin embargo; esto no significa que siempre se carezca de agua en esas zonas, pues debe recordarse que pueden estar alimentadas por algunos pozos que inyectan directamente su caudal a la red secundaria ó en su defecto, a nivel doméstico, los tinacos se llenarán por las noches y el volumen disponible para el día, dependerá del almacenamiento logrado en las pocas horas de alta presión, ocasionando como se mencionó anteriormente el racionamiento de agua.

IV.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

Como se definió en el capítulo I, en la clasificación de modelos, el de tipo estático, es aquel que determina una respuesta para una serie especial de condiciones fijas que se estima no cambiarán significativamente en el tiempo.

En este caso se pretende obtener la respuesta de la red primaria de agua potable bajo dos condiciones fijas como son: el gasto total que circula en la misma y que los tanques son considerados como nudos de carga constante.

Al no considerar la variación de presiones y gastos con respecto al tiempo, de hecho el modelo simula el comportamiento de la red para un instante determinado, esta situación puede ser considerada como una limitación ya que en la realidad el gasto que ingresa a la red varía en el tiempo y por ende las presio-

SISTEMA	GASTOS OBTENIDOS POR EL MODELO M^3/s	GASTOS ESTIMADOS MEDIANTE MEDICIONES M^3/s
Lerma-Poniente- Cutzamala	9.16	6.46
Norte-Barrientos	3.10	4.84
Norte-Chiconautla	2.53	1.97
Norte Risco	0.628	1.0
Oriente	1.00	0.93
Sur	3.64	3.63
Pozos del Sur	2.09	3.15

Tabla 4.2 Comparación de gastos obtenidos con el modelo y gastos estimados por mediciones directas.

nes cambian constantemente.

Se ha hecho mención de esto para tener en cuenta que el uso -- del modelo estático queda sujeto a condiciones que deben quedar bien claras para no darle un uso inadecuado.

Debido a que no se tiene la posibilidad de tomar en cuenta los cambios antes mencionados, que suceden en la red como podría representarse en modelo dinámico, se debe escoger un valor del gasto que corresponderá a una hora determinada y a una distribución de presiones en la red. Es conveniente que el valor elegido sea representativo de las condiciones más críticas a las que trabaja la red, ya que esto ayudará a detectar, por medio de las simulaciones, las deficiencias en el sistema.

Otro tipo de limitación que se mencionó en párrafos anteriores, es la falta de algunos dispositivos de medición, que trae como consecuencia la carencia de datos exactos para proporcionar al modelo, como es el caso del gasto que se ha estimado para efectuar la calibración, de hecho esto no es una limitación del modelo en sí, sino una limitación debida a la carencia de datos.

Por lo que respecta a los alcances del modelo, una vez que se ha efectuado la calibración su utilidad puede tener una gama muy amplia de aplicaciones. Por ejemplo, se puede utilizar para conocer el comportamiento hidráulico de la red al añadir a ésta nuevos tramos de tubería, este caso resulta muy común debido al constante crecimiento de la población, que trae consigo la necesidad de contar con nueva infraestructura para dar un buen nivel de servicio a la población.

Otra aplicación de bastante interés, que se puede dar al modelo, es la determinación de la influencia de los tanques que se

conectan a la red primaria, el conocer dicha influencia permitirá analizar una serie de alternativas y escoger la más adecuada para dar solución a futuros problemas relacionados con la expansión del sistema. Para comprender esto, bastará mencionar que para los próximos años se deberá traer agua de otras cuencas, esto implicará muy posiblemente la construcción de nuevos tanques de regulación y almacenamiento; además de la colocación de nuevos tramos de tubería, para estos casos se pretende tener en el modelo un instrumento auxiliar que ayude a tomar las mejores decisiones para diseñar los nuevos elementos de acuerdo con el criterio ingenieril de eficiencia y economía.

V. PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA RED

V.1 SELECCIÓN DE UNA ZONA DE EXPANSIÓN DE LA RED

Crecimiento de la ciudad

En una comunidad de millones de habitantes, como lo es la ciudad de México, es difícil prever con exactitud los nuevos -- asentamientos humanos; como por ejemplo, se puede mencionar el crecimiento inesperado de ciudad Netzahualcóyotl hace algunos años. Estas situaciones originan una serie de problemas que deben resolverse buscando soluciones adecuadas desde el punto de vista técnico y económico. Uno de estos problemas lo constituye el abasto de agua potable de las nuevas comunidades, para tal finalidad es necesario aumentar la infraestructura del sistema hidráulico en general y es muy común que se aumenten constantemente nuevos tramos de tubería a la red de distribución existente. Ante tales cambios, es difícil predecir el comportamiento hidráulico del sistema de agua potable si no se cuenta con los suficientes elementos técnicos para realizar el análisis.

Entre las alternativas para solucionar este problema, se pueden considerar; el incremento de dispositivos para la medición de gastos y presiones, y el uso de modelos matemáticos que simulen el comportamiento hidráulico. Por lo que respecta a los dispositivos de medición, se tienen restricciones desde el punto de vista económico ya que su instalación resulta costosa, por esto se trata de aprovechar el uso de modelos matemáticos que sólo requieren de equipo de computación.

Zona de expansión elegida

Como ejemplo de aplicación del modelo estático calibrado, se propone la simulación de la red primaria considerando una zona de expansión en el sur del Distrito Federal, se ha elegido dicha zona tomando en cuenta que la población se ha incrementado en este lugar y es muy probable que se realicen nuevas obras a corto plazo. Para esta simulación se aumentaron nueve tramos más a la red original y se empleó el tanque de almacenamiento denominado Picacho. Estas nuevas líneas de la red, se conectan a varios puntos de la red actual. En el plano 5.1, se muestra la zona de expansión con línea punteada; en la tabla 5.1, se indican los nuevos tramos con su respectiva longitud, diámetro y coeficiente de pérdidas de energía; por último en la tabla 5.2, se indican las demandas y cotas topográficas de cada nudo.

Condiciones para la simulación de la zona de expansión

Para la simulación de la nueva red, se han supuesto algunos datos tales como; las cotas topográficas en cada nudo y sus respectivas demandas, por lo que respecta al trazo de los nuevos tramos, se tomó de un proyecto de ampliación desarrollado en la D.G.C.O.H. Las longitudes de cada uno de los tramos, se obtuvieron del plano 5.1 considerando la escala correspondiente.

TUBO	NUDOS QUE UNE	LONGITUD (m)	DIAMETRO (m)	COEF. DE PERDIDAS
358	170 - 156	4300	1.22	0.0200
348	169 - 159	2850	1.22	0.0200
246	157 - 159	1200	0.91	0.0145
243	159 - 156	4700	0.91	0.0145
231	156 - 155	2800	0.91	0.0145
230	155 - 55	4300	0.91	0.0145
3	154 - 55	3000	0.91	0.0145
229	55 - 171	2750	0.91	0.0145
227	171 - 2	2000	0.91	0.0145

Tabla 5.1 Datos de los nuevos tramos de la red.

NUDO	COTA TOPOGRAFICA (m)	DEMANDA m^3/s
170	2305.00	0.00
156	2250.00	0.24
159	2248.00	0.06
155	2244.00	0.20
55	2240.00	0.08
171	2242.00	0.06

Tabla 5.2 Datos de los nuevos nudos de la red.

En la elección del valor de los coeficientes de pérdidas, se ha supuesto inicialmente que en los nuevos tramos de tubería las pérdidas de energía deben ser mínimas; esto tiene la finalidad de elevar las presiones disponibles en las zonas donde se tienen problemas de bajas presiones. Para los tramos que salen de los tanques que alimentan a la zona de expansión, se asignó un valor de 0.02 al coeficiente de pérdidas y a los tramos restantes un valor de 0.0145, que corresponde a una tubería de acero comercial. Al asignar a los tramos asociados a tanques, un valor ligeramente mayor que a los restantes, se trata de representar las válvulas de salida que pudieran estar parcialmente cerradas. Los diámetros de la tubería, se tomaron de 48 pulgadas a la salida de los tanques, porque en estos tramos los gastos son más grandes que en los siguientes, para los cuales se escogió tubería de 36 pulgadas de diámetro.

Y.2 SIMULACION DE LA NUEVA RED

En el plano 5.1, se muestran los resultados de la simulación de la red y su expansión, se puede apreciar que los valores de las presiones cambian en la totalidad de la red; en la zona Norte-Poniente el aumento es de 1 a 3 m. de columna de agua, cabe aclarar que en ningún nudo disminuye la presión. En la zona Sur-Poniente los aumentos de presión, son más notables teniendo valores de los 4 a los 10 m. Por otra parte, en la zona Sur-Oriente que comprende principalmente la zona de Iztapalapa el aumento de las presiones también es notable teniendo incrementos de 5 a 10 m., estos resultados son muy significativos dado que en esta zona se tienen problemas de bajas presiones y la simulación de la red agregando la zona de expansión demuestra que se puede mejorar el nivel de servicio, evitando la escasez de agua en algunas zonas. Es conveniente aclarar que para esta simulación, se han supuesto una serie de condiciones que ya fueron descritas en este capítulo, entre éstas se puede

considerar de importancia la elección del diámetro de la nueva tubería y se recomienda para proyectos definitivos, efectuar - varias simulaciones utilizando distintos diámetros, esto permitirá conocer la variación de las presiones y en un momento dado elegir un diámetro que sea económico y que garantice valores aceptables de las presiones. Por lo que respecta a las presiones en los nuevos nudos de la zona de expansión, éstas son altas. Dichos resultados se justifican debido a que se ha supuesto que en estos ramales de la red, las pérdidas de energía deberían ser mínimas, por lo cual los coeficientes de pérdidas elegidos tienen valores bajos.

En cuanto al comportamiento general del sistema, permanece la misma tendencia del flujo de agua de las zonas Norte y Sur-Poniente a la zona Sur-Oriente, esto es explicable dado que el - aumento de las presiones se tiene en toda la red siendo mayores estos, en la zona cercana al tanque Picacho que fue el que se agregó al sistema.

Y.3 SIMULACION DE LA RED ACTUAL AGREGANDO UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO Y REGULACION

Objetivo de la simulación

Anteriormente se mencionó que en la zona Sur-Oriente, se tienen problemas frecuentes de presiones bajas en la red de distribución de agua potable, dicho problema se agudiza en la hora de máxima demanda. Teniendo en cuenta esta situación, se efectuó una simulación del funcionamiento de la red agregando un tanque de almacenamiento y regulación. Este tanque es denominado la Caldera, el cual ya está construido y existe la posibilidad de que se conecte permanentemente a la red primaria de agua potable. Se estima que dicho tanque aportará agua a la zona de Iztapalapa principalmente. El objetivo de la simulación,

es determinar si se mejoran las presiones de esta zona y con lo cual se pretende mejorar el servicio en dicha zona.

Análisis de resultados

En el plano 5.2, se muestran los resultados de la simulación agregando el tanque de la Caldera al sistema. Se puede notar que los valores de las presiones aumentan en forma considerable en la zona Sur-Oriente, con lo cual se mejora el nivel de servicio.

Es pertinente aclarar que los valores de las nuevas presiones pueden ser un poco diferentes de los que pudieran tenerse en la realidad, esto se debe a que las condiciones fijadas en la simulación pueden cambiar. Además, debe tenerse en cuenta que en un modelo se consideran una serie de hipótesis que originan que los resultados obtenidos por el modelo sean aproximados a los reales. A pesar de las limitaciones mencionadas, los resultados cualitativos que se obtienen son de gran importancia, dado que pueden dar una idea de las ventajas que ofrecen las alternativas simuladas. Por ejemplo; en este caso, se puede considerar conveniente la conexión del tanque de la Caldera a la red primaria, tomando en cuenta que se mejorará el servicio en una zona muy extensa.

V.4 COMENTARIOS GENERALES

Los resultados obtenidos en las simulaciones descritas en este capítulo demuestran claramente la utilidad del modelo en cuestión; por ejemplo, en el primer caso donde se seleccionó una zona de expansión, según la simulación efectuada, se puede afirmar que en la zona Sur-Oriente aumentan los valores de las presiones, esto significa que además de suministrar más agua a los habitantes de dicha zona; aumentan en forma general los va

lores de las presiones en los nudos, haciendo posible una mejor distribución en la hora de máxima demanda. En la simulación, se han supuesto algunos datos (cotas topográficas y demandas), por lo que sería conveniente obtener los valores reales en caso de llevar a cabo dicha ampliación de la red. También es importante notar, que se propuso una tubería de 36 pulgadas de diámetro para la mayoría de los tramos, lo cual es conveniente desde el punto de vista técnico tomando en cuenta que las pérdidas de energía no son muy grandes; sin embargo, se debe complementar el estudio de esta alternativa con un análisis de costos con la finalidad de determinar la factibilidad económica de la misma. Considerando el factor mencionado de los costos de un proyecto, se pueden efectuar varias simulaciones proponiendo valores diferentes para los diámetros de la tubería, en cada una de las simulaciones, esto permitirá elegir el diámetro más económico con el que se obtengan presiones aceptables que garanticen el suministro normal.

En el segundo caso, se simuló la red original agregando el tanque de almacenamiento denominado la Caldera, los resultados de dicha simulación garantizan valores aceptables de las presiones en toda la red primaria, siendo lo más importante el incremento de presiones en la zona Sur-Oriente (Iztapalapa), donde es frecuente la escasez de agua en las horas de máxima demanda.

Así como se han descrito los dos casos anteriores, también se pueden simular diversas situaciones para poder predecir de una manera general, el comportamiento hidráulico de la red primaria bajo los cambios realizados. Por ejemplo, se puede simular la eventual falla de uno ó más tanques de almacenamiento. Un ejemplo reciente de este tipo de falla, ocurrió después de los sismos del 19 y 20 de septiembre de 1985; los cuales provocaron fracturas en un acueducto del sistema sur, obligando a --

suspender algunas llegadas de agua; lo cual causó fallas en el suministro de algunas zonas durante varios días. Sería conveniente simular esta situación de falla para comparar los resultados del modelo con los obtenidos mediante los registros de presiones de las estaciones medidoras en esos días.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo, se efectuó la calibración del modelo estático para simular el comportamiento de la red primaria de agua potable de la ciudad de México. Mediante las dos simulaciones realizadas para condiciones distintas a las de calibración, se demuestra la utilidad práctica del modelo; puesto que además se pueden representar un gran número de alternativas como se mencionó en el capítulo IV. Es conveniente aclarar que los resultados obtenidos indican la tendencia general del funcionamiento hidráulico de la red, ya que se ha trabajado con un modelo estático que no toma en cuenta las variaciones de dichos valores con respecto al tiempo; sin embargo, los resultados cualitativos que se obtienen pueden ser de gran ayuda en la planeación del crecimiento del sistema.

La calibración se efectuó tomando como base la medición de las presiones realizadas en el prototipo, de esta forma en la simulación calibrada se puede apreciar que en las zonas Norte y Sur-Poniente, se tienen presiones adecuadas que garantizan un suministro normal de agua; por el contrario, en la zona Sur-Oriente las presiones son bajas y se puede inferir, que el problema se agudiza en la hora de máxima demanda originando escasez de agua. En el capítulo V, se han considerado dos alternativas que podrían resolver dicho problema; la primera consiste en agregar nuevas líneas de tubería, en la zona sur, que además de mejorar las presiones en gran parte de la red, permitirían el abasto de agua a futuros asentamientos humanos. La segunda consiste en la conexión permanente a la red, del tanque de la Caldera; con esta alternativa, se estima un aumento de las presiones en la zona Sur-Oriente, que evitaría la escasez del líquido. Es pertinente hacer mención que en estas simulaciones han sido supuestas algunas condiciones, como por ejemplo, las demandas en las zonas de expansión. Esto hace necesari-

rio un estudio más profundo de estos datos en caso de decidir la realización de alguna obra, también es importante considerar un análisis de costos por separado, ya que con el modelo estático se pueden proponer varias alternativas de solución para un mismo problema, pero es muy importante demostrar la factibilidad técnica de cualquier proyecto para estar de acuerdo al criterio ingenieril de construir obras que sean eficientes y económicas.

Por último, es importante mencionar que en la medida en que se aumenten los dispositivos de medición y se conozca más sobre la distribución de la demanda, se pueden proporcionar al modelo datos más precisos que mejoren la calidad de los resultados. Esta labor la desarrolla actualmente la D.G.C.O.H. , con la finalidad de lograr que el sistema hidráulico del Distrito Federal, proporcione un servicio público eficiente que cubra las necesidades de la población.

APENDICE A**LISTADO DEL PROGRAMA Y SUS RESULTADOS**

A.1

DESCRIPCION GENERAL DEL PROGRAMA

Para aplicar el método de solución descrito en el capítulo tres, se ha empleado un programa de cálculo en FORTRAN, que consta de un programa principal y una subrutina. A continuación se describe la secuencia de cálculo.

La primera parte del programa lee e imprime los datos de las características de la red de tubos, también se calculan las longitudes totales de tubería correspondientes a cada uno de los diámetros que se utilizan en la red, esto tiene la finalidad de calcular posteriormente el volumen de excavación correspondiente a dichos diámetros. Los datos se deben proporcionar de acuerdo con el instructivo de uso del programa.

El siguiente paso consiste en armar e imprimir el arreglo de la red por medio de la identificación de los nudos y tubos, con lo cual se pueden determinar para cada tubo los números de los nudos de interconexión. Posteriormente el programa determina el renglón y columna de los elementos diferentes de cero de la matriz de coeficientes, una vez determinada dicha matriz, se inicia el proceso iterativo con el cálculo de los valores de α y δ para cada uno de los tramos. Con estos valores se calculan los elementos de la matriz de coeficientes. Concluido este cálculo, se llama a la subrutina Gauss que resuelve el sistema de ecuaciones lineales por medio del método SOR que fué descrito en el capítulo tres. Con los resultados que se obtienen se calculan los gastos que circulan en cada uno de los tubos y con los valores de estos gastos, se calculan nue--

vamente los valores de α y δ y así, sucesivamente, se repite el proceso hasta completar diez iteraciones. Es conveniente aclarar, que con este número de iteraciones, se garantiza la convergencia del método de solución, obteniendo en el último cálculo, los gastos y presiones correctas para las condiciones fijadas por medio de los datos. Al concluir la última iteración se imprimen los gastos, niveles piezométricos y cargas disponibles en cada uno de los nudos. Por último el programa efectúa el cálculo de los volúmenes de excavación e imprime en forma ordenada el diámetro, longitud total y el volumen correspondiente de excavación. Esta última parte puede ser utilizada para la elaboración de presupuestos en el diseño de redes de agua potable.

Es importante mencionar que las dos primeras instrucciones del programa sirven para la lectura de datos del archivo correspondiente y la obtención de los resultados, estas instrucciones cambian, dependiendo del tipo de máquina que se utilice. Para la computadora Burroughs 7800 son las siguientes:

```
FILE 1(TITLE = "DATOS", KIND=DISK, FILETYPE = 7)
FILE 3(KIND = PRINTER, MAXRECSIZE = 22)
```

Nótese que en el listado del programa para todas las declaraciones READ se utilizó el número 1 que corresponde al número declarado en la primera instrucción, y para las declaraciones WRITE, se utilizó el número 3 que corresponde al número declarado en la segunda instrucción.

En la figura 6.1 se muestra el diagrama de flujo general del programa descrito.

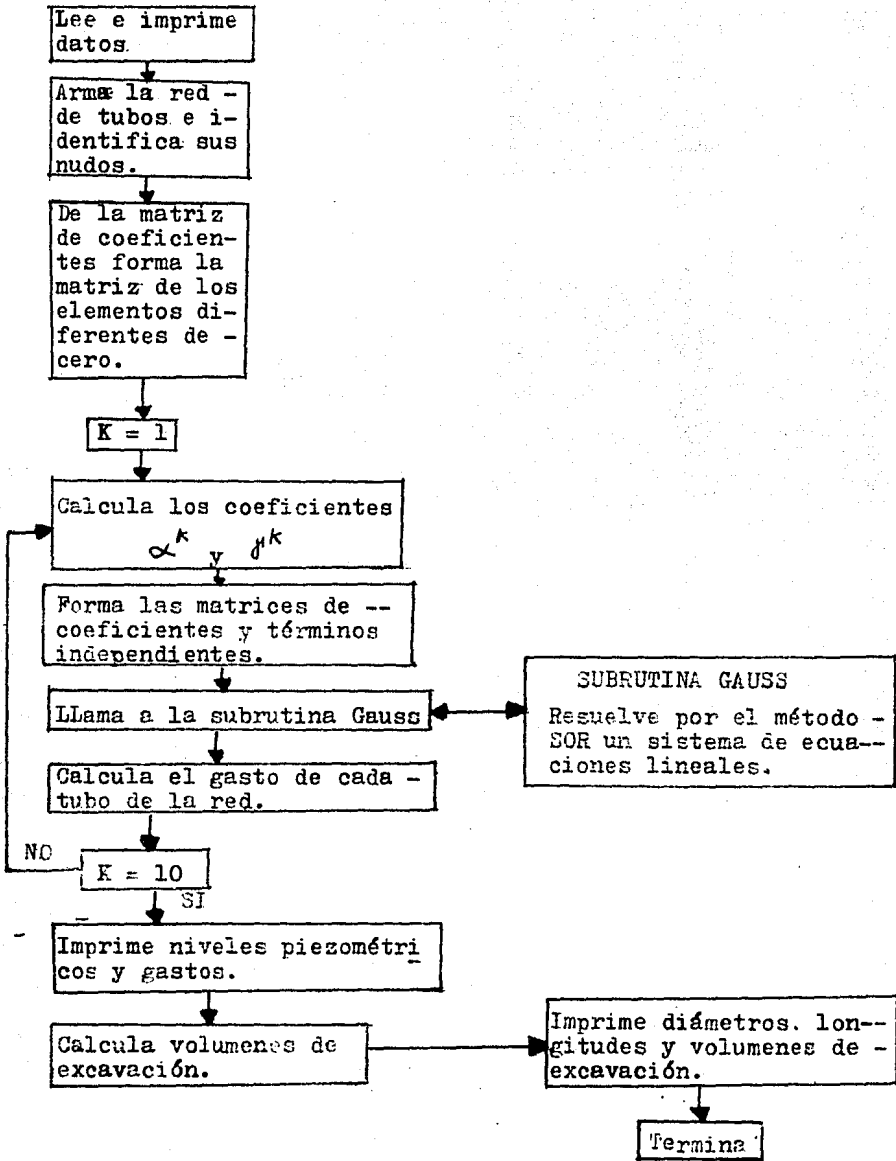


Figura 6.1 Diagrama de flujo del programa.

A.2**LISTADO DEL PROGRAMA Y RESULTADOS DE LA SIMULACION CALIBRADA**

Fallas de origen

ESTADICO (1/1/4/86)

RESERVA JUEVES, 11/11/86

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

```
FIL: 1 (TITLE: 'ESTADICO', MIN=15, FILLTYPE=7)
FIL: 2 (KIND: 'TEXT', XPR=1, YPR=2)
FIL: 3 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 4 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 5 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 6 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 7 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 8 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 9 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 10 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 11 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 12 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 13 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 14 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 15 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 16 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 17 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 18 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 19 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 20 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 21 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 22 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 23 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 24 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 25 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 26 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 27 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 28 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 29 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 30 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 31 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 32 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 33 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 34 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 35 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 36 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 37 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 38 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 39 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 40 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 41 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 42 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 43 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 44 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 45 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 46 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 47 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 48 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 49 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 50 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 51 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 52 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 53 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 54 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 55 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 56 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 57 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 58 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 59 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 60 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 61 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 62 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 63 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 64 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 65 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 66 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 67 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 68 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 69 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 70 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 71 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 72 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 73 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 74 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 75 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 76 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 77 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 78 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 79 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 80 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 81 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 82 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 83 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 84 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 85 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 86 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 87 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 88 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 89 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 90 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 91 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 92 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 93 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 94 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 95 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 96 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 97 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 98 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 99 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
FIL: 100 (UNIT: 'CM', XPR=1, YPR=2)
```

51
61
01
21
31
41
51
61
71
81
91
101
111
121
131
141
151
161
171
181
191
201
211
221
231
241
251
261
271
281
291
301
311
321
331
341
351
361
371
381
391
401
411
421
431
441
451
461
471
481
491
501
511
521
531
541
551
561
571
581
591
601
611
621
631
641
651
661
671
681
691
701
711
721
731
741
751
761
771
781
791
801
811
821
831
841
851
861
871
881
891
901
911
921
931
941
951
961
971
981
991
1001
1011
1021
1031
1041
1051
1061
1071
1081
1091
1101
1111
1121
1131
1141
1151

```
WRITE (3,70) J, (NVD(I,K), I=1,2), ELE, D(1), LA
IF(D(1).EQ.0) GO TO 1
D1=D(1)
SL1=SL1+ELE
1 GO TO 2
IF(D(1).EQ.1) GO TO 2
IF(D(1).EQ.2) GO TO 3
IF(D(1).EQ.3) GO TO 4
IF(D(1).EQ.4) GO TO 5
IF(D(1).EQ.5) GO TO 6
IF(D(1).EQ.6) GO TO 7
IF(D(1).EQ.7) GO TO 8
IF(D(1).EQ.8) GO TO 9
IF(D(1).EQ.9) GO TO 10
IF(D(1).EQ.10) GO TO 11
IF(D(1).EQ.11) GO TO 12
IF(D(1).EQ.12) GO TO 13
IF(D(1).EQ.13) GO TO 14
IF(D(1).EQ.14) GO TO 15
IF(D(1).EQ.15) GO TO 16
IF(D(1).EQ.16) GO TO 17
IF(D(1).EQ.17) GO TO 18
IF(D(1).EQ.18) GO TO 19
IF(D(1).EQ.19) GO TO 20
IF(D(1).EQ.20) GO TO 21
IF(D(1).EQ.21) GO TO 22
IF(D(1).EQ.22) GO TO 23
IF(D(1).EQ.23) GO TO 24
IF(D(1).EQ.24) GO TO 25
IF(D(1).EQ.25) GO TO 26
IF(D(1).EQ.26) GO TO 27
IF(D(1).EQ.27) GO TO 28
IF(D(1).EQ.28) GO TO 29
IF(D(1).EQ.29) GO TO 30
IF(D(1).EQ.30) GO TO 31
IF(D(1).EQ.31) GO TO 32
IF(D(1).EQ.32) GO TO 33
IF(D(1).EQ.33) GO TO 34
IF(D(1).EQ.34) GO TO 35
IF(D(1).EQ.35) GO TO 36
IF(D(1).EQ.36) GO TO 37
IF(D(1).EQ.37) GO TO 38
IF(D(1).EQ.38) GO TO 39
IF(D(1).EQ.39) GO TO 40
IF(D(1).EQ.40) GO TO 41
IF(D(1).EQ.41) GO TO 42
IF(D(1).EQ.42) GO TO 43
IF(D(1).EQ.43) GO TO 44
IF(D(1).EQ.44) GO TO 45
IF(D(1).EQ.45) GO TO 46
IF(D(1).EQ.46) GO TO 47
IF(D(1).EQ.47) GO TO 48
IF(D(1).EQ.48) GO TO 49
IF(D(1).EQ.49) GO TO 50
IF(D(1).EQ.50) GO TO 51
IF(D(1).EQ.51) GO TO 52
IF(D(1).EQ.52) GO TO 53
IF(D(1).EQ.53) GO TO 54
IF(D(1).EQ.54) GO TO 55
IF(D(1).EQ.55) GO TO 56
IF(D(1).EQ.56) GO TO 57
IF(D(1).EQ.57) GO TO 58
IF(D(1).EQ.58) GO TO 59
IF(D(1).EQ.59) GO TO 60
IF(D(1).EQ.60) GO TO 61
IF(D(1).EQ.61) GO TO 62
IF(D(1).EQ.62) GO TO 63
IF(D(1).EQ.63) GO TO 64
IF(D(1).EQ.64) GO TO 65
IF(D(1).EQ.65) GO TO 66
IF(D(1).EQ.66) GO TO 67
IF(D(1).EQ.67) GO TO 68
IF(D(1).EQ.68) GO TO 69
IF(D(1).EQ.69) GO TO 70
IF(D(1).EQ.70) GO TO 71
IF(D(1).EQ.71) GO TO 72
IF(D(1).EQ.72) GO TO 73
IF(D(1).EQ.73) GO TO 74
IF(D(1).EQ.74) GO TO 75
IF(D(1).EQ.75) GO TO 76
IF(D(1).EQ.76) GO TO 77
IF(D(1).EQ.77) GO TO 78
IF(D(1).EQ.78) GO TO 79
IF(D(1).EQ.79) GO TO 80
IF(D(1).EQ.80) GO TO 81
IF(D(1).EQ.81) GO TO 82
IF(D(1).EQ.82) GO TO 83
IF(D(1).EQ.83) GO TO 84
IF(D(1).EQ.84) GO TO 85
IF(D(1).EQ.85) GO TO 86
IF(D(1).EQ.86) GO TO 87
IF(D(1).EQ.87) GO TO 88
IF(D(1).EQ.88) GO TO 89
IF(D(1).EQ.89) GO TO 90
IF(D(1).EQ.90) GO TO 91
IF(D(1).EQ.91) GO TO 92
IF(D(1).EQ.92) GO TO 93
IF(D(1).EQ.93) GO TO 94
IF(D(1).EQ.94) GO TO 95
IF(D(1).EQ.95) GO TO 96
IF(D(1).EQ.96) GO TO 97
IF(D(1).EQ.97) GO TO 98
IF(D(1).EQ.98) GO TO 99
IF(D(1).EQ.99) GO TO 100
IF(D(1).EQ.100) GO TO 101
IF(D(1).EQ.101) GO TO 102
IF(D(1).EQ.102) GO TO 103
IF(D(1).EQ.103) GO TO 104
IF(D(1).EQ.104) GO TO 105
IF(D(1).EQ.105) GO TO 106
IF(D(1).EQ.106) GO TO 107
IF(D(1).EQ.107) GO TO 108
IF(D(1).EQ.108) GO TO 109
IF(D(1).EQ.109) GO TO 110
IF(D(1).EQ.110) GO TO 111
IF(D(1).EQ.111) GO TO 112
IF(D(1).EQ.112) GO TO 113
IF(D(1).EQ.113) GO TO 114
IF(D(1).EQ.114) GO TO 115
```

```

11700 52 DO 62 I=1,NUV(1)
11800 Q(I)=1
11900 DO 64 J=1,NT(I)
12000 K=NUV(I,1)
12100 L=NUV(I,2)
12200 IF(Q(L)EQ 0) GO TO 64
12300 NUV(I,2)=K+L
12400 GO TO 65
12500 60 I=I+1
12600 NUV(I,1)=L
12700 J(L)=I
12800 NUV(I,2)=I
12900 K+L
13000 K+L
13100 65 IF(Q(K)EQ 0) GO TO 68
13200 NUV(I,1)=K+L
13300 GO TO 64
13400 66 I=I+1
13500 NUV(I,1)=K
13600 Q(I)=2
13700 NUV(I,2)=L
13800 K+L
13900 64 C(I)=NUV
14000 DO 65 I=1,NUV
14100 4 NUV(I,1)=1,NUV(I)
14200 K=NUV(I,1)
14300 L=NUV(I,2)
14400 NUV(I,1)=NUV(K)+1
14500 NUV(K)
14600 NUV(L)=NUV(L)+1
14700 J=NUV(L)
14800 IN(K,1)=I
14900 IT(K,1)=I
15000 J(I,1)=K
15100 IT(I,1)=I
15200 100 CONTINUE
15300 DO 126 I=1,NUV(1)
15400 N=NUV(I,1)
15500 NR=NUV(I,2)
15600 NUV(I,1)=N+1
15700 NJ=1
15800 DO 115 J=1,NR
15900 NJ=NJ+1
16000 NUV(I,1)=N+J
16100 NUV(I,2)=NUV(I,2)+J
16200 NUV(I,1)=N+J
16300 NJ=NJ+1
16400 K=NUV(I,1)
16500 NUV(I,2)=NUV(I,2)+K
16600 115 L=NUV(I,1)
16700 WRITE(T,100) (NUV(I,1),J=1,NJ)
16800 100 CONTINUE
16900 NUV(I,1)=N+1
17000 NUV(I,2)=NUV(I,2)+1
17100 NUV(I,1)=N+1
17200 NUV(I,2)=NUV(I,2)+1
17300 DO 126 J=NUV(I,1),NUV(I,2)
17400

```

```

117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176

```



```

17500 L=HUB(J,2)
17600 N=ASO(L)=HASSO(L)-1
17700 CONTINUE
17800 DO 174 J=1,NTA
17900 K=HTH(J)
18000 V=KT(K)
18100 NTA=N(J)=F
18200 DO 175 J=1,NTA
18300 K=HTH(J)
18400 V=KT(K)
18500 NTA=N(J)=K
18600 DO 169 I=1,NUTRA
18700 Q(I)=.
18800 CONTINUE
18900 DO 170 L=1,NTA
19000 H(J)=H(I)
19100 I=1
19200 NICAL1=NICAL+1
19300 IKC=1
19400 DO 122 I=1,NBC
19500 M(I,1)=1
19600 DO 122 J=1,NUTRA1
19700 L=HUB(J,1)
19800 JK=KT(K)+1
19900 KJ=KT(K)+1
20000 JL=KT(L)+1
20100 KT(L)=JL
20200 M(K,JK)=L
20300 M(L,KJ)=F
20400 CONTINUE
20500 CONTINUE
20600 IF (IYC=NICAL) GO TO 11
20700 WRITE(5,501) IYC
20800 CONTINUE
20900 DO 132 I=1,NBC
21000 U(I,1)=0
21100 B(I)=0
21200 KT(I)=1
21300 DO 134 I=1,NTA
21400 J=HTH(I)
21500 F(J)=JF(I)
21600 DO 92 J=1,NUTRA1
21700 K=HUB(J,1)
21800 L=HUB(J,2)
21900 JK=KT(K)+1
22000 JL=KT(L)+1
22100 KT(K)=JK
22200 KT(L)=JL
22300 QAB=AS(Q(J))
22400 IF (QAB=0) GO TO 142
22500 ALF(J)=.
22600 GM(J)=.
22700 GO 10 152
22800 H(F(J))=1./((J)+2.3)
22900 GAM(J)=2.(J)ALF

```

```

17500
17600
17700
17800
17900
18000
18100
18200
18300
18400
18500
18600
18700
18800
18900
19000
19100
19200
19300
19400
19500
19600
19700
19800
19900
20000
20100
20200
20300
20400
20500
20600
20700
20800
20900
21000
21100
21200
21300
21400
21500
21600
21700
21800
21900
22000
22100
22200
22300
22400
22500
22600
22700
22800
22900

```

```

233. U(K,1)=U(K,1)-ALF(J)
234. U(L,1)=U(L,1)-ALF(J)
235. U(K,JK)=ALF(J)
236. U(L, JL)=ALF(J)
237. A(K)=B(K)+GA*(J)
238. A(L)=B(L)-GA*(J)
93. CONTINUE
240. DO 76 J=UTRA2,UTRA
241. K=NUO(J,1)
242. L=NUO(J,2)
243. GA=BS(Q(J))
244. IF(Q(J)=GT.0.0) GO TO 95
245. ALF(J)=0.01
246. GA*(J)=0.
247. GO TO 97
95. ALF(J)=1./((J)*249)
248. GA*(J)=Q(J)*ALF(J)
97. U(L,1)=U(L,1)-ALF(J)
249. A(L)=B(L)-A(K)+ALF(J)-GA*(J)
96. CONTINUE
250. CALL GAMES(C,L)
251. K=NUO(J,1)
252. L=NUO(J,2)
253. GA*(J)=Q(J)
254. A(K)=ALF(J)+A(K)-A(L)+GA*(J)
255. IF(IFC=NL,NICAL) GO TO 12
256. JRA1=(S-7)
257. WKILL(S,271)
12. CONTINUE
260. LO 29, J=1,NUO(S)
261. K=NUO(J,1)
262. L=NUO(J,2)
263. I=NUO(J)
264. JJ=UT(J)
265. H2(J)=-1.0-UT(I)+4(J)
266. IF(A(J)=T.0) GO TO 29
267. K=NUO(K)
268. IF(IK=NL,NICAL) GO TO 29
269. MPAL(S,3LU) JJ,Q(J),K,T,(J),H2(J)
270. GO TO 29
271. L=NUO(L)
272. QH(J)=-A(J)
273. IF(IFC=NL,NICAL) GO TO 29
274. CRIT(S,3CU) JJ,QH(J),L,I,H(J),H2(J)
29. CONTINUE
275. DO 31 J=NUO(S),UT+A
276. K=NUO(J,1)
277. L=NUO(J,2)
278. JJ=UT(J)
279. IF(Q(J)=T.0) GO TO 305
280. K=NUO(K)
281. IF(IFC=NL,NICAL) GO TO 31
282. JRA1(S,3LU) JJ,Q(J),K
305. L=NUO(L)
283. QH(J)=-A(J)
284. IF(IFC=NL,NICAL) GO TO 31

```



```

340 J2
350 J3
351 J4
352 J5
353 J6
354 J7
355 J8
356 J9
357 J10
358 J11
359 J12
360 J13
361 J14
362 J15
363 J16
364 J17
365 J18
366 J19
367 J20
368 J21
369 J22
370 J23
371 J24
372 J25
373 J26
374 J27
375 J28
376 J29
377 J30

```

```

41  STOP
    END
    SUBROUTINE GAUSS (NUDOS)
    DIMENSION Y(35)
    COMMON HG(35), A(35,9), B(35), NAS(35), OMEGA, N1, T, TOL
    KOL=1
1.  L=L+1
    KOC=KOC+1
    DO 3, I=1, NUDOS
    Y(I)=U
    XK=NAS(I)
    DO 2, J=1, XK
    K=K+1
2.  Y(I)=Y(I)+A(I,J)*HG(K)
    Y(I)=(Y(I)-Y(I))/A(I,1)
    E2=OMEGA*(Y(I)-E)
    E=E+(Y(I)-E)
3.  HG(I)=HG(I)+E
    IF(E.LT.TOL) GO TO 4
    IF(KOL.LT.N1) GO TO 35
    E1=E
    GO TO 1
35  OMEGA=L/(1+SQRT(ABS(1-E/E1)))
4.  WRITE(3,5L) KOC, OMEGA, E
5.  FORMAT(5L, 'NUMERO DE ITERACIONES', I5, 'X', 'OMEGA=', F8.2, 'Y', 'ERROR=',
    * F3.4)
7.  FORM T(2X, 'ERROR=', F10.5, //)
    RETURN
    END

```

```

12 34 30
13 35 31
14 36 32
15 37 33
16 38 34
17 39 35
18 40 36
19 41 37
20 42 38
21 43 39
22 44 40
23 45 41
24 46 42
25 47 43
26 48 44
27 49 45
28 50 46
29 51 47
30 52 48
31 53 49
32 54 50
33 55 51
34 56 52
35 57 53
36 58 54
37 59 55
38 60 56
39 61 57
40 62 58
41 63 59
42 64 60
43 65 61
44 66 62
45 67 63
46 68 64
47 69 65
48 70 66
49 71 67
50 72 68
51 73 69
52 74 70
53 75 71
54 76 72
55 77 73

```


2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200

201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300

11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200

201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250

251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300

1
4
12
41

97.00
97.11
97.16
97.50

5.00
2.10
1.10
1.50

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

RESUMEN DE LOS TUSOS

DIAMETRO	LOCALIDAD	VOLUMEN A EXCAVAR
M.	M.	M ³
1.100	0.000	0.00
1.200	17600.000	1165.71
1.300	0.000	0.00
1.400	11400.000	15.51
1.500	2770.000	7.24
1.600	0.000	0.00
1.800	10000.000	10.71
1.900	24145.000	1156.20
2.000	0.000	0.00

APENDICE B**MANUAL DE USUARIO DEL PROGRAMA**

B.1

INSTRUCTIVO DE USO DEL PROGRAMA

a) información requerida para el programa.

- 1.- Determinar la configuración de la red y numerar nudos y -- tubos. Cabe aclarar que tal numeración es arbitraria, pero se recomienda seguir cierto orden para facilitar su localización en los planos correspondientes.
- 2.- Determinar los puntos de entrada de agua (nudos de carga - constante), la carga del tanque y su cota topográfica.
- 3.- Determinar los nudos con gasto de egreso (nudos con demanda), su gasto y su cota topográfica.
- 4.- Para cada tubo definir sus nudos extremos, características de longitud, diámetro y coeficiente de Manning.

b) definición de variables.

Las variables que se utilizan en el programa y que deben proporcionarse como datos son las siguientes:

NUDOS: número de nudos

NUTRA: número de tramos

NTRTA: número de tramos asociados a tanques

NTA : número de tanques (nudos de carga constante)

NTINA: número de nudos con demanda conocida

NUDOS 1: número más grande dado en la numeración de los nudos
 NICAL : número de iteraciones
 OMEGA : Factor del método SOR, se recomienda 1.85
 TOL : Tolerancia en el método SOR, se recomienda 0.01
 NIT : número máximo de iteraciones en el método SOR, se recomienda 200.
 VATAN : Coeficiente que afecta a los consumos
 J : número del tubo o tramo
 NUD(I,1): número del extremo 1 de cada tubo
 NUD(I,2): número del extremo 2 de cada tubo
 ELE : Longitud del tubo en metros
 DIAM : Diámetro del tubo en metros
 ENE : Coeficiente de fricción de Manning
 NTAN(I): número del nudo donde se ubica el tanque
 B(I) : Carga del tanque en metros (cota topográfica + nivel en el tanque)
 COTAN(I): Cota topográfica del tanque en metros
 NTIN(J) : número del nudo con demanda
 QD(J) : Demanda del nudo NTIN(J) en m^3/s
 COTAN(J): Cota topográfica del nudo NTIN(J)

c) orden de introducción de los datos con su formato correspondiente en FORTRAN.

Primera línea o tarjeta: NUDOS, NUTRA, NTRTA, NTA, NTINA, NUDOS 1,
NICAL

Formato: 7I5

Segunda línea o tarjeta: OMEGA, TOL, NIT, VATAN

Formato: 2F10.0, I5, F10.0

Siguientes líneas o tarjetas: J, (NUD (I,K), K=1,2), ELE, DIAM,
ENE

Formato: 3I5, 3F10.0

- Notas:
- a) La numeración de los nudos es arbitraria
 - b) La numeración de los tubos es arbitraria; para -- los tubos conectados a tanques, el NUD(I,1) deberá ser el número del nudo del tanque
 - c) Los tubos ligados a tanques se colocan al final
 - d) Se debe utilizar una tarjeta o línea por cada tramo, por lo que el número de líneas depende del número de tramos que tenga la red.

Siguientes líneas o tarjetas: NTAN(I), B(I), COTAN(I)

Formato: I5, 2F10.0

Nota; Se utiliza una línea o tarjeta por cada tanque.

Siguientes líneas o tarjetas: NTIN(J), QD(J), COTAN(J)

Formato: I5, 2F10.0

Nota: Se utiliza una línea o tarjeta por cada nudo con demanda.

Dado el volumen de datos que se tiene y que llega a ser muy --

grande en redes formadas por muchos tramos, se debe crear un - archivo de datos, éste será leído desde el programa principal.

d) Interpretación de resultados.

Una vez que se tiene el programa sin errores, se puede "correr" para obtener resultados, en una primera etapa proporciona en - forma ordenada los datos que se introdujeron (ver apéndice A). Después proporciona la configuración de la red de tubos; es - decir, para cada nudo indica con que otros nudos se une y por medio de que tramos, empleando la numeración que se dió origi- nalmente para los nudos y los tubos.

A continuación aparecen los resultados, el gasto que fluye en cada tubo y de que nudo sale dicho gasto, esta indicación del nudo de salida sirve para conocer el sentido de circulación -- del agua en cada uno de los tramos; el nivel piezométrico y la carga total en cada nudo. Aquí es importante señalar que cuando se tienen cargas negativas, se debe interpretar como insufi- ciencia para satisfacer la demanda recuerda en dicha zona.

e) -Ilustración de la introducción de datos.

En la siguiente hoja para codificación, se muestran algunos da- tos correspondientes a la red primaria de agua potable que fué simulada. La codificación se realiza de acuerdo a los formatos correspondientes explicados anteriormente. No se muestran to- dos los datos utilizados para las simulaciones, ya que pueden - obtenerse de los resultados que se muestran en el apéndice A.

Los puntos colocados en columnas, indican los datos intermedios que no se han escrito; por ejemplo en el primer bloque se codificarón los tramos 1, 2 y 4 y se dió un salto al 375 que es el último de dicho bloque. Esta hoja de codificación tiene la finalidad de ejemplificar los formatos descritos anteriormente.

B.2

EJEMPLO SIMPLE DE APLICACION DEL METODO NUMERICO DE SOLUCION

Determinar en la red de agua potable que se muestra en la figura 6.2, las cargas disponibles en los nudos y la distribución de gastos que circulan en los tramos de tubería.

Considerar un gasto máximo horario de 500 lts/seg. en total.

Datos:

Tramo	Diámetro pulg. mts.	Longitud (m)	Coef. de fricción de Darcy
5-1	42 1.0668	600	0.01
1-2	22 0.5588	800	0.01
1-3	22 0.5588	500	0.01
3-4	12 0.3048	800	0.01
2-4	12 0.3048	500	0.01

Nudo	Cota topog. (m)	Demanda de gastos en los nudos (m^3/s)
5	275	0.00
1	258	0.20
2	260	0.05
3	255	0.15
4	262	0.10

Carga total en el nudo ⑤ $275 + 2.0 = 277 m.$

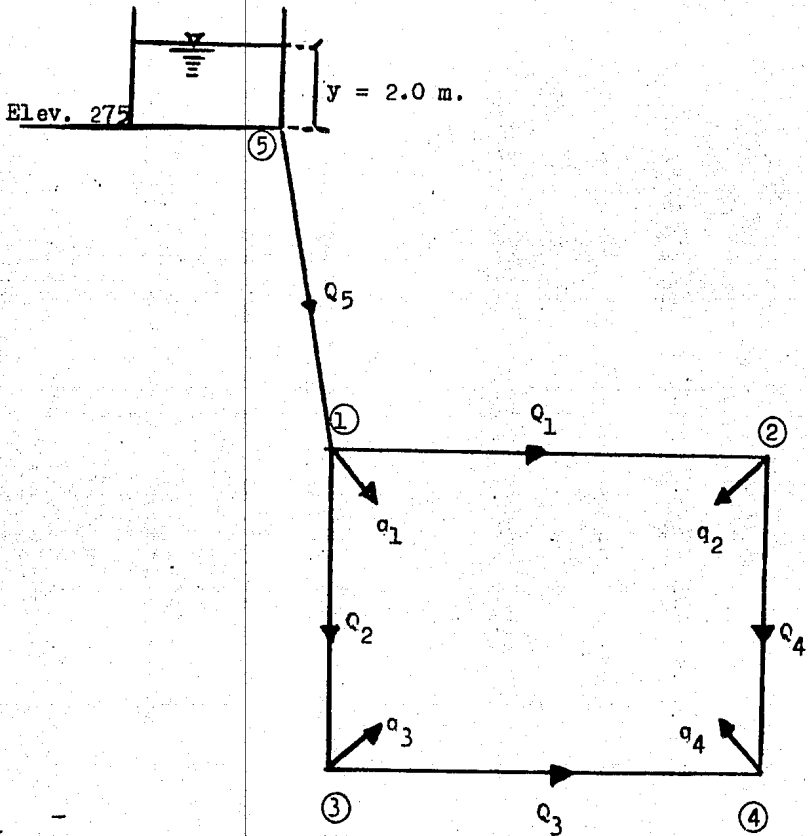


Fig. 6.2 Red de Agua Potable con Gastos de Demanda (q_i) y Distribución de Gastos (Q_j) en los Tubos.

Solución:

De la ecuación de continuidad se tiene:

nudo	ecuación
1	$-Q_1 - Q_2 + Q_5 = q_1$
2	$Q_1 - Q_4 = q_2$
3	$Q_2 - Q_3 = q_3$
4	$Q_3 + Q_4 = q_4$

Al establecer las ecuaciones anteriores, se toma en cuenta la siguiente convención. Los gastos de salida del nudo son negativos y los de entrada al nudo son positivos.

Del desarrollo de Taylor (capítulo III) se obtuvo:

$$Q_j^k = \alpha_j^{k-1} (h_{sj}^k - h_{ij}^k) + \gamma_j^{k-1} \quad (3.14)$$

$$\alpha_j^{k-1} = \frac{1}{mc_j \left| Q_j^{k-1} \right|^{m-1}} \quad (3.15)$$

$$\gamma_j^{k-1} = \frac{m-1}{m} Q_j^{k-1} \quad (3.16)$$

Si se aplica la ecuación 3.14 a cada gasto que circula en la red se tiene:

$$Q_1^k = \alpha_1^{k-1} (h_1^k - h_2^k) + \gamma_1^{k-1}$$

$$Q_2^k = \alpha_2^{k-1} (h_1^k - h_3^k) + \gamma_2^{k-1}$$

$$Q_3^k = \alpha_3^{k-1} (h_3^k - h_4^k) + \gamma_3^{k-1}$$

$$Q_4^k = \alpha_4^{k-1} (h_2^k - h_4^k) + \gamma_4^{k-1}$$

$$Q_5^k = \alpha_5^{k-1} (h_5^k - h_1^k) + \gamma_5^{k-1}$$

Sustituyendo los valores de Q en función de los niveles piezo-métricos se tiene:

Para el nudo 1

$$-\alpha_1^{k-1} h_1^k + \alpha_1^{k-1} h_2^k - \gamma_1^{k-1} + \alpha_2^{k-1} h_3^k - \gamma_2^{k-1} + \alpha_5^{k-1} h_5^k -$$

$$-\alpha_5^{k-1} h_1^k + \gamma_5^{k-1} - \alpha_2^{k-1} h_1^k = q_1$$

Factorizando y pasando los términos γ_j^{k-1} al segundo miembro

$$(-\alpha_1^{k-1} - \alpha_2^{k-1} - \alpha_5^{k-1}) h_1^k + \alpha_1^{k-1} h_2^k + \alpha_2^{k-1} h_3^k = q_1 - \alpha_5^{k-1} h_5^k +$$

$$+\gamma_1^{k-1} + \gamma_2^{k-1} - \gamma_5^{k-1}$$

Para el nudo 2

$$\alpha_1^{k-1} h_1^k - \alpha_1^{k-1} h_2^k + \gamma_1^{k-1} - \alpha_4^{k-1} h_2^k + \alpha_4^{k-1} h_4^k - \gamma_4^{k-1} = q_2$$

Factorizando:

$$\alpha_1^{k-1} h_1^k + (-\alpha_1^{k-1} - \alpha_4^{k-1}) h_2^k + \alpha_4^{k-1} h_4^k = q_2 - \gamma_1^{k-1} + \gamma_4^{k-1}$$

Para el nudo 3

$$\alpha_2^{k-1} h_1^k - \alpha_2^{k-1} h_3^k + \gamma_2^{k-1} - \alpha_3^{k-1} h_3^k + \alpha_3^{k-1} h_4^k - \gamma_3^{k-1} = q_3$$

$$\alpha_2^{k-1} h_1^k + (-\alpha_2^{k-1} - \alpha_3^{k-1}) h_3^k + \alpha_3^{k-1} h_4^k = q_3 - \gamma_2^{k-1} + \gamma_3^{k-1}$$

Para el nudo 4

$$\alpha_3^{k-1} h_3^k - \alpha_3^{k-1} h_4^k + \gamma_3^{k-1} + \alpha_4^{k-1} h_2^k - \alpha_4^{k-1} h_4^k + \gamma_4^{k-1} = q_4$$

$$\alpha_4^{k-1} h_2^k + \alpha_3^{k-1} h_3^k + (-\alpha_3^{k-1} - \alpha_4^{k-1}) h_4^k = q_4 - \gamma_3^{k-1} - \gamma_4^{k-1}$$

De acuerdo a esto se tiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} (-\alpha_1^{k-1} - \alpha_2^{k-1} - \alpha_5^{k-1}) h_1^k + \alpha_1^{k-1} h_2^k + \alpha_2^{k-1} h_3^k = q_1 - \alpha_5^{k-1} h_5^k + \\ + \gamma_1^{k-1} + \gamma_2^{k-1} - \gamma_5^{k-1} \end{aligned}$$

$$\alpha_1^{k-1} h_1^k + (-\alpha_1^{k-1} - \alpha_4^{k-1}) h_2^k + \alpha_4^{k-1} h_4^k = q_2 - \gamma_1^{k-1} + \gamma_4^{k-1} \quad (a)$$

$$\alpha_2^{k-1} h_1^k + (-\alpha_2^{k-1} - \alpha_3^{k-1}) h_3^k + \alpha_3^{k-1} h_4^k = q_3 - \gamma_2^{k-1} + \gamma_3^{k-1}$$

$$\alpha_4^{k-1} h_2^k + \alpha_3^{k-1} h_3^k + (-\alpha_3^{k-1} - \alpha_4^{k-1}) h_4^k = q_4 - \gamma_3^{k-1} - \gamma_4^{k-1}$$

Expresado en forma general queda como:

$$\left\{ \alpha_j^{K-1} \right\} \left\{ h^K \right\} = \left\{ q_i, \gamma_j^{K-1} \right\}$$

Método iterativo

Para $K=0$

suponiendo la siguiente distribución de gastos en m^3/seg .

$$Q_1 = 0.10$$

$$Q_2 = 0.20$$

$$Q_3 = 0.05$$

$$Q_4 = 0.05$$

$$Q_5 = 0.50 \text{ (dato)}$$

con las ecuaciones 3.15 y 3.16, se calculan α_j y γ_j .

Para calcular las pérdidas por fricción se utilizó la ecuación de Darcy-Weisbach, por lo que de la tabla 3.1 se tiene:

$$C_j = 0.0826 \frac{f_j L_j}{(d_j)^5} \quad m = 2$$

$$\alpha_1 = 0.412$$

$$\gamma_1 = 0.05$$

$$\alpha_2 = 0.330$$

$$\gamma_2 = 0.10$$

$$\alpha_3 = 0.040$$

$$\gamma_3 = 0.025$$

$$\alpha_4 = 0.006$$

$$\gamma_4 = 0.025$$

$$\alpha_5 = 2.788$$

$$\gamma_5 = 0.25$$

En base al sistema de ecuaciones (a) se tiene:

$$\begin{array}{rcl}
 -3.53 h_1 + 0.412 h_2 + 0.330 h_3 & = & -772.176 \\
 0.412 h_1 - 0.418 h_2 & + & 0.006 h_4 = 0.025 \\
 0.330 h_1 & - & 0.370 h_3 + 0.040 h_4 = 0.075 \\
 & + & 0.006 h_2 + 0.040 h_3 - 0.046 h_4 = 0.050
 \end{array}$$

La solución del sistema es:

$$h_1 = 276.91$$

$$h_2 = 276.83$$

$$h_3 = 276.55$$

$$h_4 = 275.50$$

Cálculo de gastos empleando la ecuación 3.14

$$Q_1 = 0.412 (276.91 - 276.83) + 0.05 \quad ; \quad Q_1 = 0.083$$

$$Q_2 = 0.330 (276.91 - 276.55) + 0.10 \quad ; \quad Q_2 = 0.219$$

$$Q_3 = 0.040 (276.55 - 275.50) + 0.025 \quad ; \quad Q_3 = 0.067$$

$$Q_4 = 0.006 (276.83 - 275.50) + 0.025 \quad ; \quad Q_4 = 0.033$$

$$Q_5 = 2.788 (277 - 276.91) + 0.25 \quad ; \quad Q_5 = 0.50$$

Si se comparan estos gastos con los iniciales, se verá que son diferentes, por lo tanto continuando el proceso, pero utilizando los valores anteriores para el cálculo de α_j y δ_j se tiene:

Para $K = 1$

$$\alpha_1 = 0.497$$

$$\gamma_1 = 0.042$$

$$\alpha_2 = 0.301$$

$$\gamma_2 = 0.110$$

$$\alpha_3 = 0.030$$

$$\gamma_3 = 0.034$$

$$\alpha_4 = 0.097$$

$$\gamma_4 = 0.017$$

$$\alpha_5 = 2.788$$

$$\gamma_5 = 0.25$$

Con los valores anteriores el sistema de ecuaciones es:

$$-3.586 h_1 + 0.497 h_2 + 0.301 h_3 = -772.174$$

$$0.497 h_1 - 0.594 h_2 + 0.097 h_4 = 0.025$$

$$0.301 h_1 - 0.331 h_3 + 0.03 h_4 = 0.074$$

$$0.097 h_2 + 0.030 h_3 - 0.127 h_4 = 0.049$$

La solución del sistema es:

$$h_1 = 276.910$$

$$h_2 = 276.778$$

$$h_3 = 276.637$$

$$h_4 = 276.360$$

Cálculo de gastos.

$$Q_1 = 0.497 (276.91 - 276.778) + 0.042 \quad ; \quad Q_1 = 0.108$$

$$\begin{aligned}
 Q_2 &= 0.301 (276.91 - 276.637) + 0.110 & ; Q_2 &= 0.192 \\
 Q_3 &= 0.030 (276.637 - 276.36) + 0.034 & ; Q_3 &= 0.042 \\
 Q_4 &= 0.097 (276.778 - 276.36) + 0.017 & ; Q_4 &= 0.058 \\
 Q_5 &= 2.788 (277 - 276.91) + 0.25 & ; Q_5 &= 0.50
 \end{aligned}$$

Para $K = 2$

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= 0.382 & \gamma_1 &= 0.054 \\
 \alpha_2 &= 0.344 & \gamma_2 &= 0.096 \\
 \alpha_3 &= 0.047 & \gamma_3 &= 0.021 \\
 \alpha_4 &= 0.055 & \gamma_4 &= 0.029 \\
 \alpha_5 &= 2.788 & \gamma_5 &= 0.25
 \end{aligned}$$

Con los valores anteriores el sistema de ecuaciones es:

$$\begin{aligned}
 -3.514 h_1 + 0.382 h_2 + 0.344 h_3 & & & = -772.176 \\
 0.382 h_1 - 0.437 h_2 & + 0.055 h_4 & & = 0.025 \\
 0.344 h_1 & - 0.391 h_3 + 0.047 h_4 & & = 0.075 \\
 & 0.055 h_2 + 0.047 h_3 - 0.102 h_4 & & = 0.05
 \end{aligned}$$

La solución del sistema es:

$$\begin{aligned}
 h_1 &= 276.91 \\
 h_2 &= 276.766 \\
 h_3 &= 276.635 \\
 h_4 &= 276.215
 \end{aligned}$$

Cálculo de gastos.

$$Q_1 = 0.382 (276.91 - 276.766) + 0.054 \quad ; \quad C_1 = 0.109$$

$$Q_2 = 0.344 (276.91 - 276.635) + 0.096 \quad ; \quad Q_2 = 0.191$$

$$Q_3 = 0.047 (276.635 - 276.215) + 0.021 \quad ; \quad Q_3 = 0.041$$

$$Q_4 = 0.055 (276.766 - 276.215) + 0.029 \quad ; \quad Q_4 = 0.059$$

$$Q_5 = 2.788 (277.00 - 276.91) + 0.25 \quad ; \quad Q_5 = 0.50$$

Se puede notar que estos valores se aproximan más a los de la iteración anterior.

Para $K = 3$

$$\alpha_1 = 0.378$$

$$\gamma_1 = 0.055$$

$$\alpha_2 = 0.345$$

$$\gamma_2 = 0.096$$

$$\alpha_3 = 0.049$$

$$\gamma_3 = 0.021$$

$$\alpha_4 = 0.054$$

$$\gamma_4 = 0.030$$

$$\alpha_5 = 2.788$$

$$\gamma_5 = 0.25$$

Con los valores anteriores el sistema de ecuaciones es:

$$-3.511 h_1 + 0.378 h_2 + 0.345 h_3 \quad = -772.175$$

$$0.378 h_1 - 0.432 h_2 \quad + 0.054 h_4 = 0.025$$

$$0.345 h_1 \quad - 0.394 h_3 + 0.049 h_4 = 0.075$$

$$0.054 h_2 + 0.049 h_3 - 0.103 h_4 = 0.049$$

La solución del sistema es:

$$h_1 = 276.91$$

$$h_2 = 276.76$$

$$h_3 = 276.63$$

$$h_4 = 276.22$$

Cálculo de gastos.

$$Q_1 = 0.378 (276.91 - 276.76) + 0.055 \quad ; \quad Q_1 = 0.110$$

$$Q_2 = 0.345 (276.91 - 276.63) + 0.096 \quad ; \quad Q_2 = 0.191$$

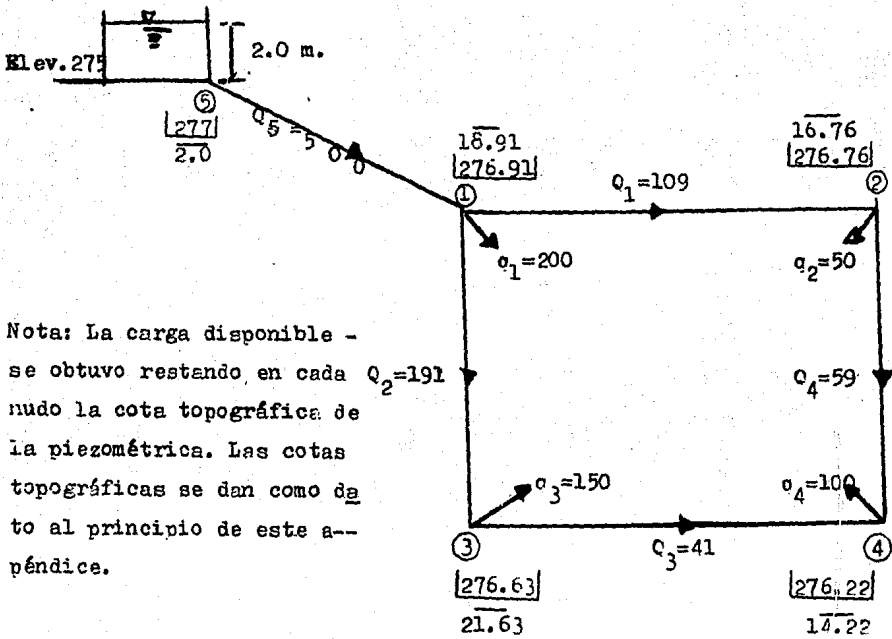
$$Q_3 = 0.049 (276.63 - 276.22) + 0.021 \quad ; \quad Q_3 = 0.041$$

$$Q_4 = 0.054 (276.76 - 276.22) + 0.030 \quad ; \quad Q_4 = 0.059$$

$$Q_5 = 2.788 (277.00 - 276.91) + 0.25 \quad ; \quad Q_5 = 0.50$$

Se puede notar que los valores de los gastos son iguales a los anteriores, por lo que se da por concluido el proceso. Las cargas obtenidas en la última iteración, son la solución al problema y los gastos corresponden a la distribución real para las cargas obtenidas.

En la figura 6.3 se muestran los resultados.



Nota: La carga disponible - se obtuvo restando, en cada nudo la cota topográfica de la piezométrica. Las cotas topográficas se dan como dato al principio de este apéndice.

Simbología

- número del nudo
- cota piezométrica en m.
- carga disponible en m.
- Q_j gasto en el tramo j en lts./seg.
- o_i gasto demandado en el nudo i en lts./seg.

Fig. 6.3 Red de agua potable con los resultados de gastos y presiones.

Bibliografía y referencias

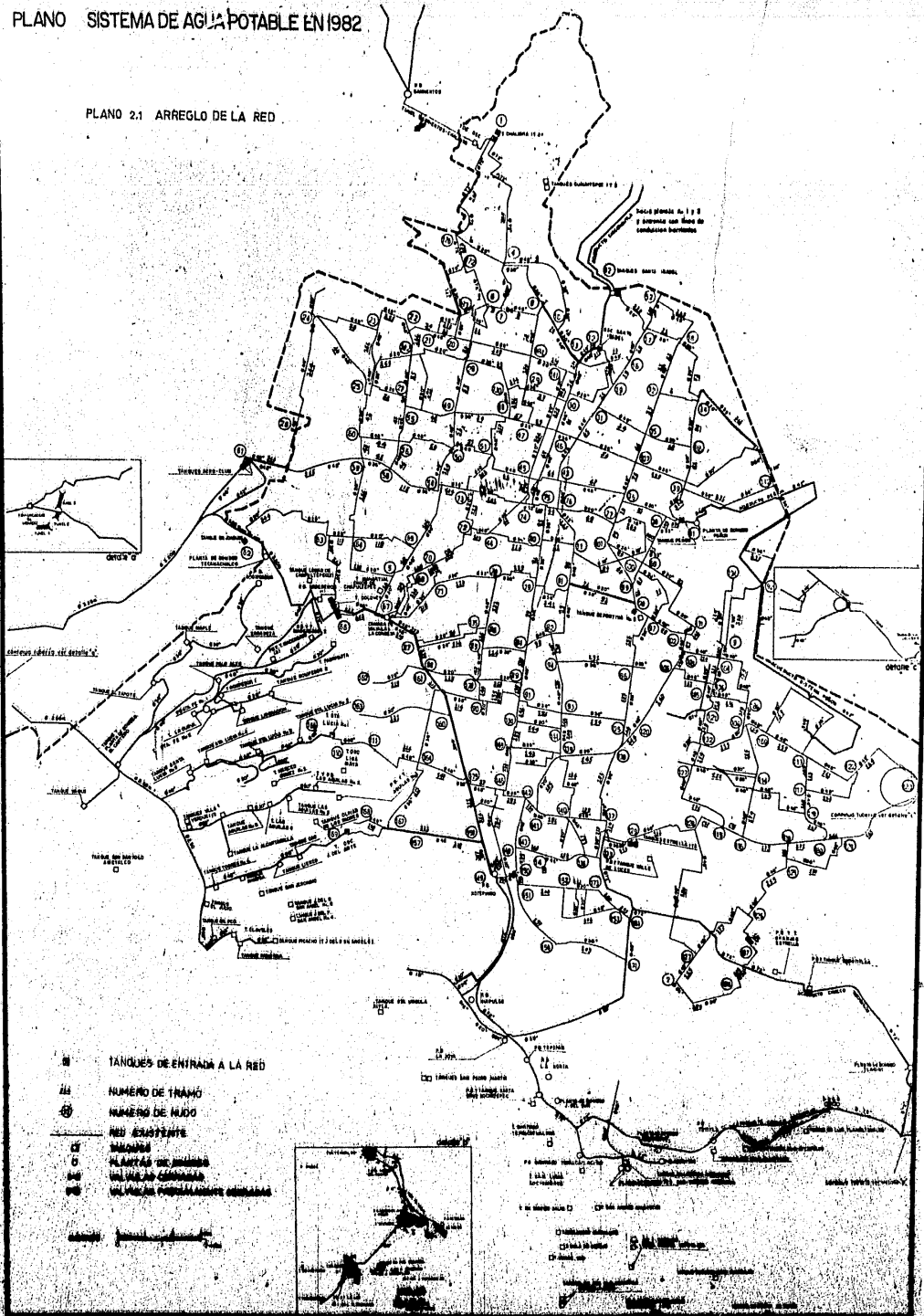
- 1.- Gracia Sánchez, G. Prado, " Somero Análisis de la Fluctuación de Presiones en la Red Primaria de Agua Potable de la Ciudad de México " , D.G.C.O.H, México, 1984.
- 2.- D.G.C.O.H , " Manual de Hidráulica Urbana Tomo I, II, III", D.G.C.O.H.
- 3.- D.G.C.O.H , " El Sistema Hidráulico del Distrito Federal " Departamento del Distrito Federal.
- 4.- Jeppeson, RW y Davis, AL, " Pressure Reducing Values in -- Pipe Network Analysis " , Journal Hydraulics División, ASCE Jul. 1976.
- 5.- González, F y Capella, A , " Modelos Para Análisis de Redes de Abastecimiento de Agua Potable " , Instituto de Ingeniería, UNAM, No-286, Jun. 1971.
- 6.- Sánchez Bibriesca José Luis , " Doce Algoritmos Para Resolver Problemas de Hidráulica " , Instituto de Ingeniería, - UNAM, No-412, Ago. 1978.
- 7.- Smith, G,D , " Numerical Solution of Partial Diferencial - Equations " , Oxford, Gran Bretaña, 1975.
- 8.- Wood, Dj, y Charles, CO , " Hydraulic Network Análisis - - Using Linear Theory " , Journal Hydraulics División, Jul. 1972.

- 9.- Burden Faires y Reynolds , " Numerical Analysis " , Prin--
dle, Weber and Schmidt, 1979.
- 10.- Sotelo Avila Gilberto , " Hidráulica General " , Limusa .
Vol. I.
- 11.- Iriarte Balderrama Rafael y Borrás García Hugo , " Apun--
tes de Métodos Numéricos " , Facultad de Ingeniería.
- 12.- J.M de Azevedo y Guillermo Acosta , " Manual de Hidráulica " , Harla.
- 13.- H.W. King , " Hidráulica " , Tallas.
- 14.- Daniel D, Mac Cracken , " Programación Fortran IV " , ---
Limusa.

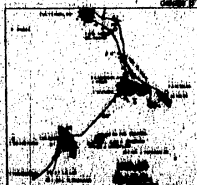
ANEXO DE PLANOS

PLANO SISTEMA DE AGUA POTABLE EN 1982

PLANO 2.1 ARREGLO DE LA RED



- 11 TANQUES DE ENTRADA A LA RED
- 12 NUMERO DE TRAMO
- 13 NUMERO DE NUDO
- RED EXISTENTE
- 14 PLANTAS DE BOMBEO
- 15 VALVULAS DE COMPUERTA
- 16 VALVULAS DE REGULACION DE CAUDAL



- 17 TANQUE DE ALMACENAMIENTO
- 18 LINEA DE CONDUCCION
- 19 LINEA DE DISTRIBUCION
- 20 LINEA DE SERVIDOR
- 21 LINEA DE SERVIDOR
- 22 LINEA DE SERVIDOR
- 23 LINEA DE SERVIDOR
- 24 LINEA DE SERVIDOR
- 25 LINEA DE SERVIDOR
- 26 LINEA DE SERVIDOR
- 27 LINEA DE SERVIDOR
- 28 LINEA DE SERVIDOR
- 29 LINEA DE SERVIDOR
- 30 LINEA DE SERVIDOR
- 31 LINEA DE SERVIDOR
- 32 LINEA DE SERVIDOR
- 33 LINEA DE SERVIDOR
- 34 LINEA DE SERVIDOR
- 35 LINEA DE SERVIDOR
- 36 LINEA DE SERVIDOR
- 37 LINEA DE SERVIDOR
- 38 LINEA DE SERVIDOR
- 39 LINEA DE SERVIDOR
- 40 LINEA DE SERVIDOR
- 41 LINEA DE SERVIDOR
- 42 LINEA DE SERVIDOR
- 43 LINEA DE SERVIDOR
- 44 LINEA DE SERVIDOR
- 45 LINEA DE SERVIDOR
- 46 LINEA DE SERVIDOR
- 47 LINEA DE SERVIDOR
- 48 LINEA DE SERVIDOR
- 49 LINEA DE SERVIDOR
- 50 LINEA DE SERVIDOR
- 51 LINEA DE SERVIDOR
- 52 LINEA DE SERVIDOR
- 53 LINEA DE SERVIDOR
- 54 LINEA DE SERVIDOR
- 55 LINEA DE SERVIDOR
- 56 LINEA DE SERVIDOR
- 57 LINEA DE SERVIDOR
- 58 LINEA DE SERVIDOR
- 59 LINEA DE SERVIDOR
- 60 LINEA DE SERVIDOR
- 61 LINEA DE SERVIDOR
- 62 LINEA DE SERVIDOR
- 63 LINEA DE SERVIDOR
- 64 LINEA DE SERVIDOR
- 65 LINEA DE SERVIDOR
- 66 LINEA DE SERVIDOR
- 67 LINEA DE SERVIDOR
- 68 LINEA DE SERVIDOR
- 69 LINEA DE SERVIDOR
- 70 LINEA DE SERVIDOR
- 71 LINEA DE SERVIDOR
- 72 LINEA DE SERVIDOR
- 73 LINEA DE SERVIDOR
- 74 LINEA DE SERVIDOR
- 75 LINEA DE SERVIDOR
- 76 LINEA DE SERVIDOR
- 77 LINEA DE SERVIDOR
- 78 LINEA DE SERVIDOR
- 79 LINEA DE SERVIDOR
- 80 LINEA DE SERVIDOR
- 81 LINEA DE SERVIDOR
- 82 LINEA DE SERVIDOR
- 83 LINEA DE SERVIDOR
- 84 LINEA DE SERVIDOR
- 85 LINEA DE SERVIDOR
- 86 LINEA DE SERVIDOR
- 87 LINEA DE SERVIDOR
- 88 LINEA DE SERVIDOR
- 89 LINEA DE SERVIDOR
- 90 LINEA DE SERVIDOR
- 91 LINEA DE SERVIDOR
- 92 LINEA DE SERVIDOR
- 93 LINEA DE SERVIDOR
- 94 LINEA DE SERVIDOR
- 95 LINEA DE SERVIDOR
- 96 LINEA DE SERVIDOR
- 97 LINEA DE SERVIDOR
- 98 LINEA DE SERVIDOR
- 99 LINEA DE SERVIDOR
- 100 LINEA DE SERVIDOR

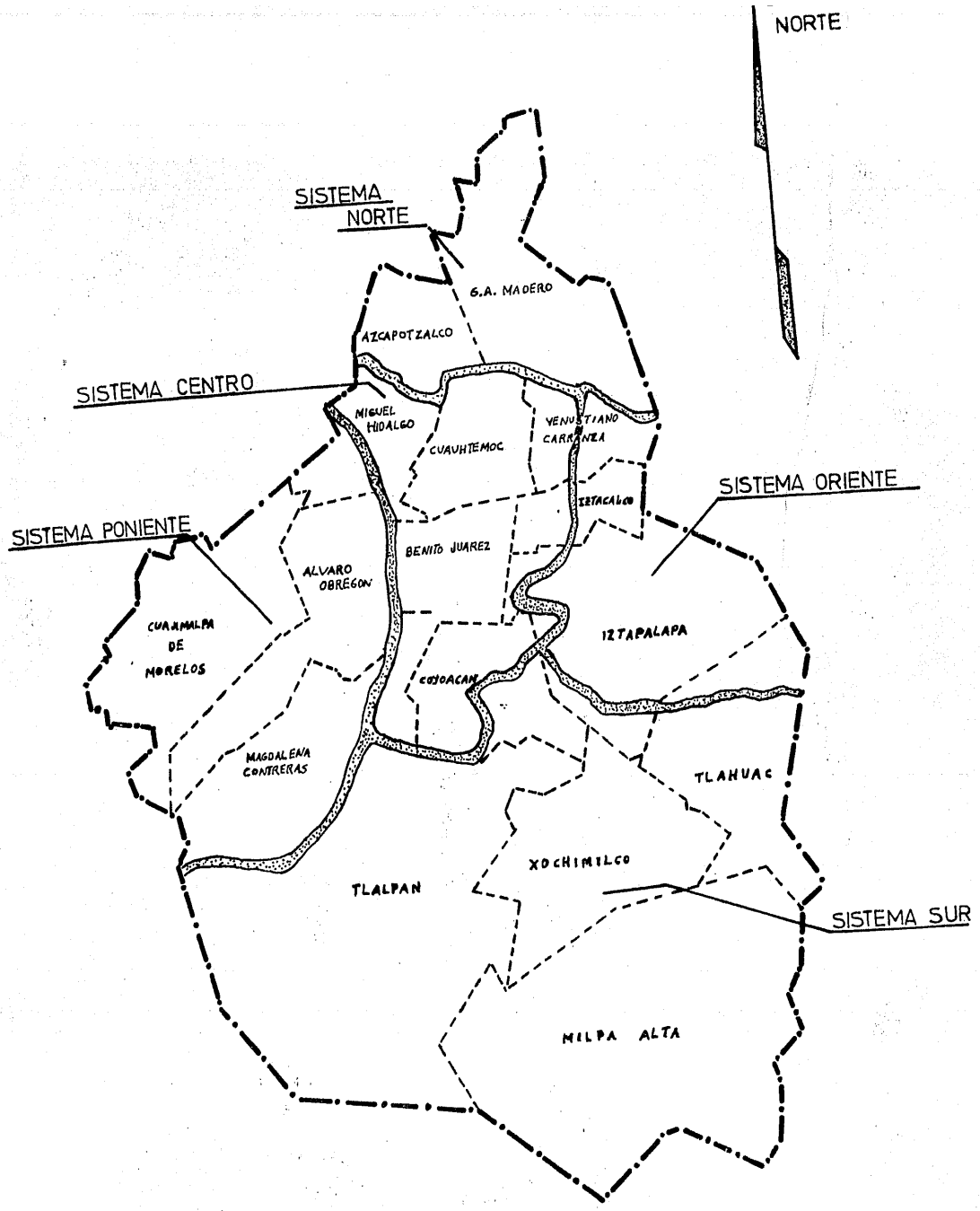
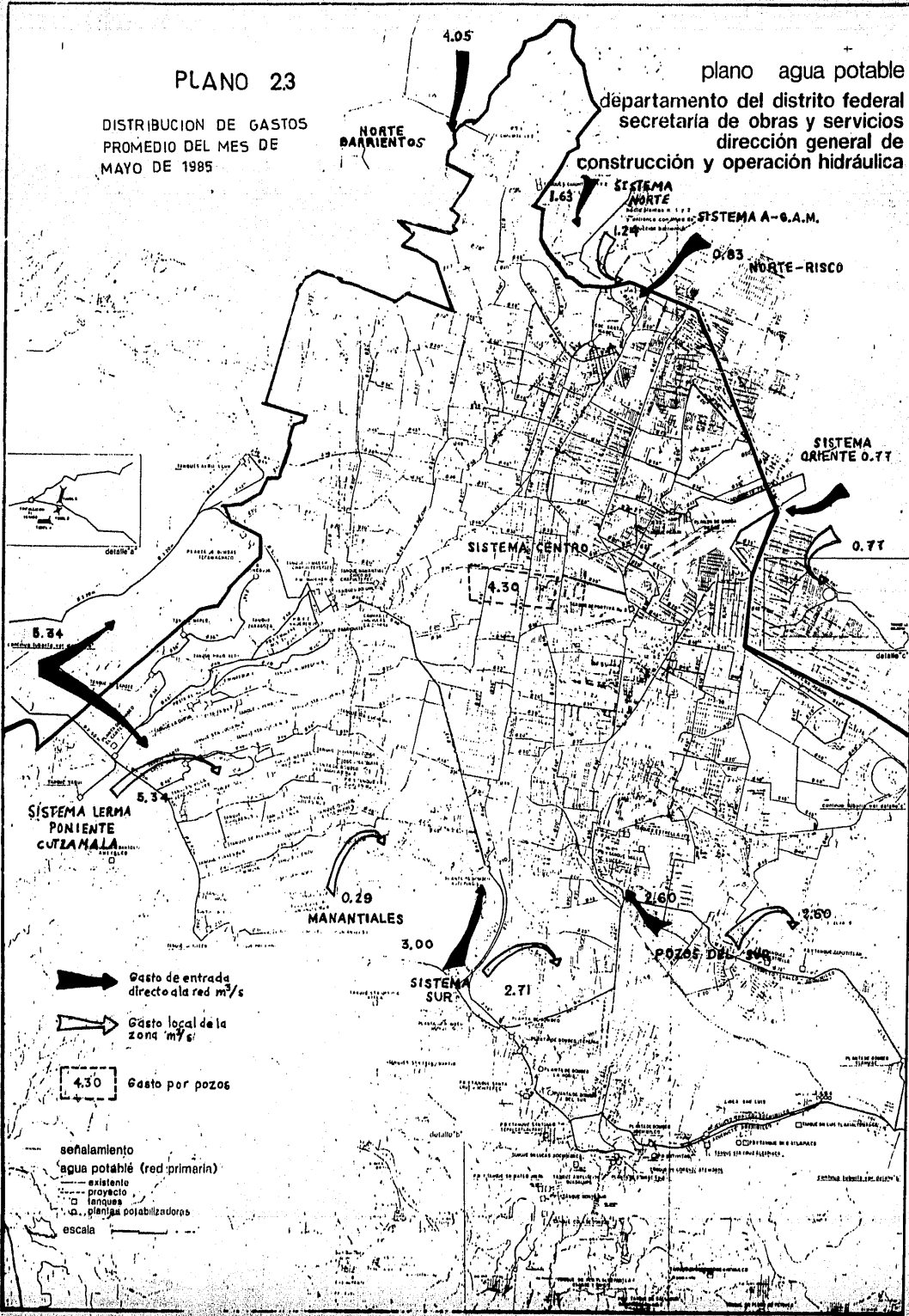


DIAGRAMA 2.2 REGIONALIZACION DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE

PLANO 23

DISTRIBUCION DE GASTOS
PROMEDIO DEL MES DE
MAYO DE 1985

plano agua potable
departamento del distrito federal
secretaría de obras y servicios
dirección general de
construcción y operación hidráulica

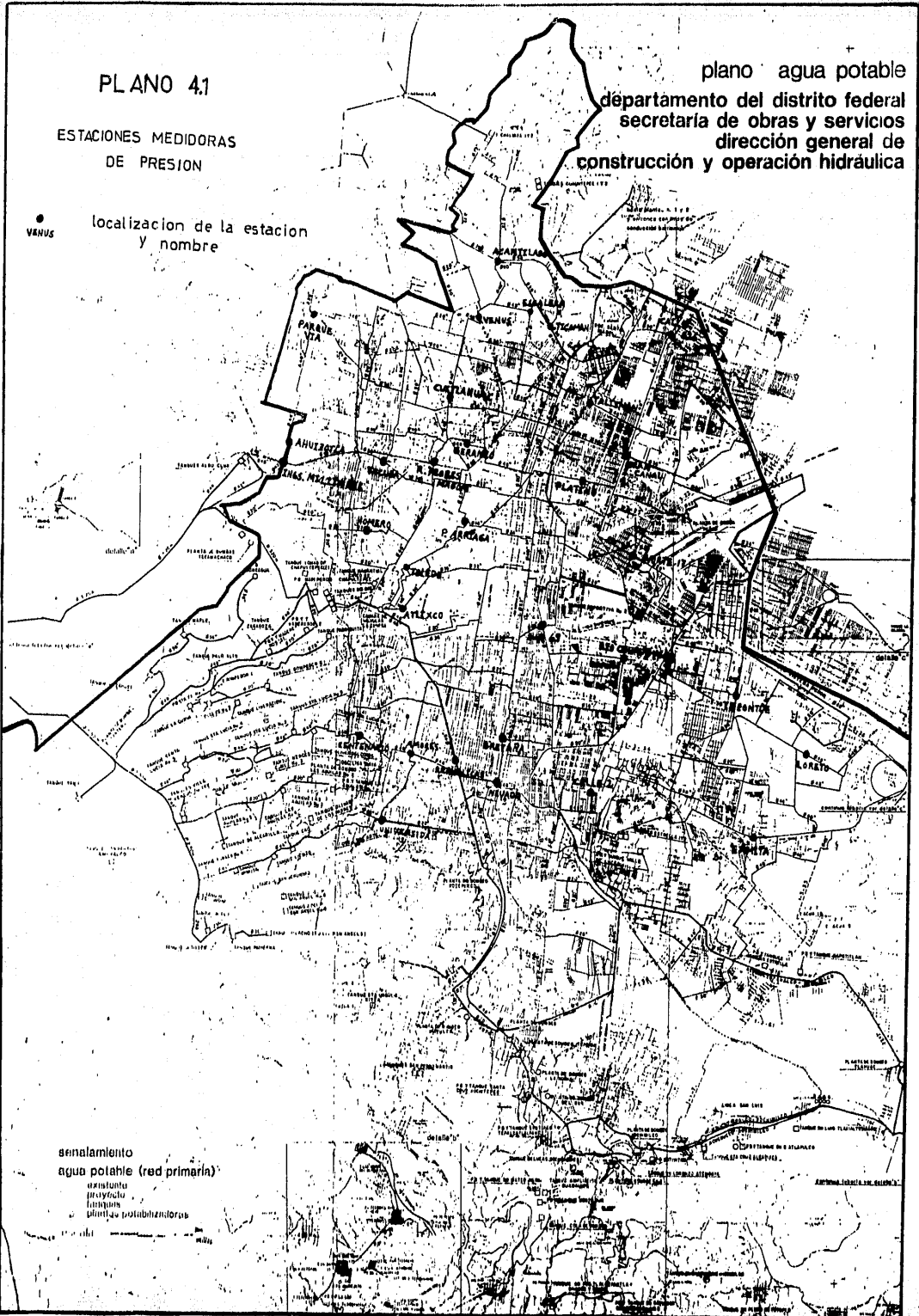


PLANO 4.1

ESTACIONES MEDIDAS
DE PRESION

plano agua potable
departamento del distrito federal
secretaría de obras y servicios
dirección general de
construcción y operación hidráulica

● VAVUS
localización de la estación
y nombre



señalamiento
agua potable (red primaria)

- estación
- presión
- tuberías
- tuberías de distribución

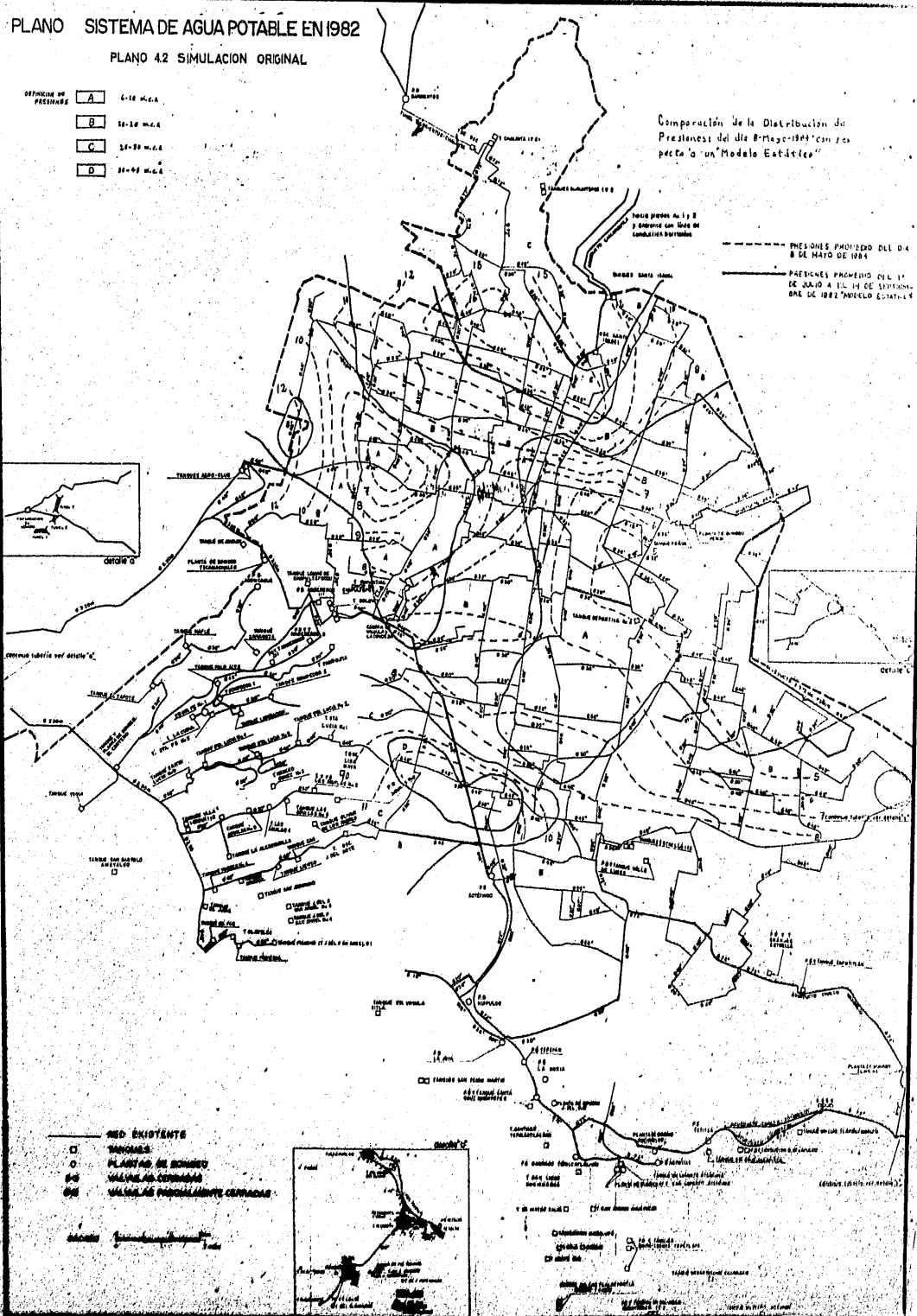
PLANO SISTEMA DE AGUA POTABLE EN 1982

PLANO 4.2 SIMULACION ORIGINAL

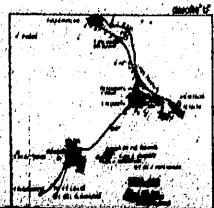
- DEFINICION DE PRESIONES
- A 4-10 M.C.A.
 - B 10-15 M.C.A.
 - C 15-20 M.C.A.
 - D 20-25 M.C.A.

Comparación de la Distribución de Presiones del día 8 de Mayo 1984 con las de un Modelo Estático

--- PRESIONES PROYECTAS DEL DIA 8 DE MAYO DE 1984
 — PRESIONES PROMEDIO DEL 1º DE JUNIO A EL 14 DE SEPTIEMBRE DE 1982 MODELO ESTÁTICO



- RED EXISTENTE**
- TANQUES
 - PLANTAS DE BOMBEO
 - VALVULAS EXISTENTES
 - VALVULAS PROHIBIDAS CERRADAS

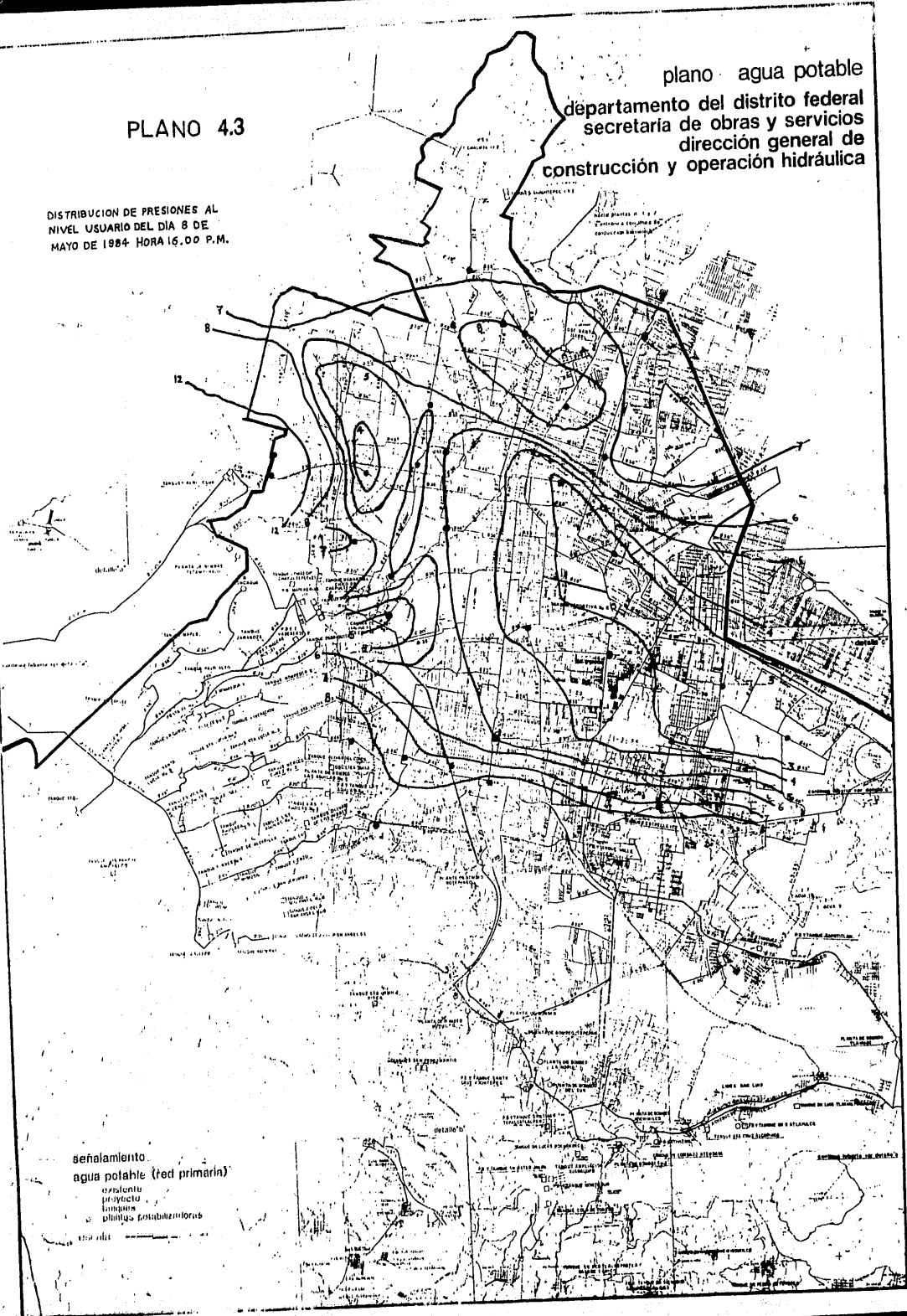


Escala: 1:50,000

PLANO 4.3

DISTRIBUCION DE PRESIONES AL NIVEL USUARIO DEL DIA 8 DE MAYO DE 1984 HORA 16.00 P.M.

plano agua potable
departamento del distrito federal
secretaría de obras y servicios
dirección general de
construcción y operación hidráulica



señalamiento
agua potable (red primaria)
casavento
pl-1/2/3/4
línea de
planta potabilizadora

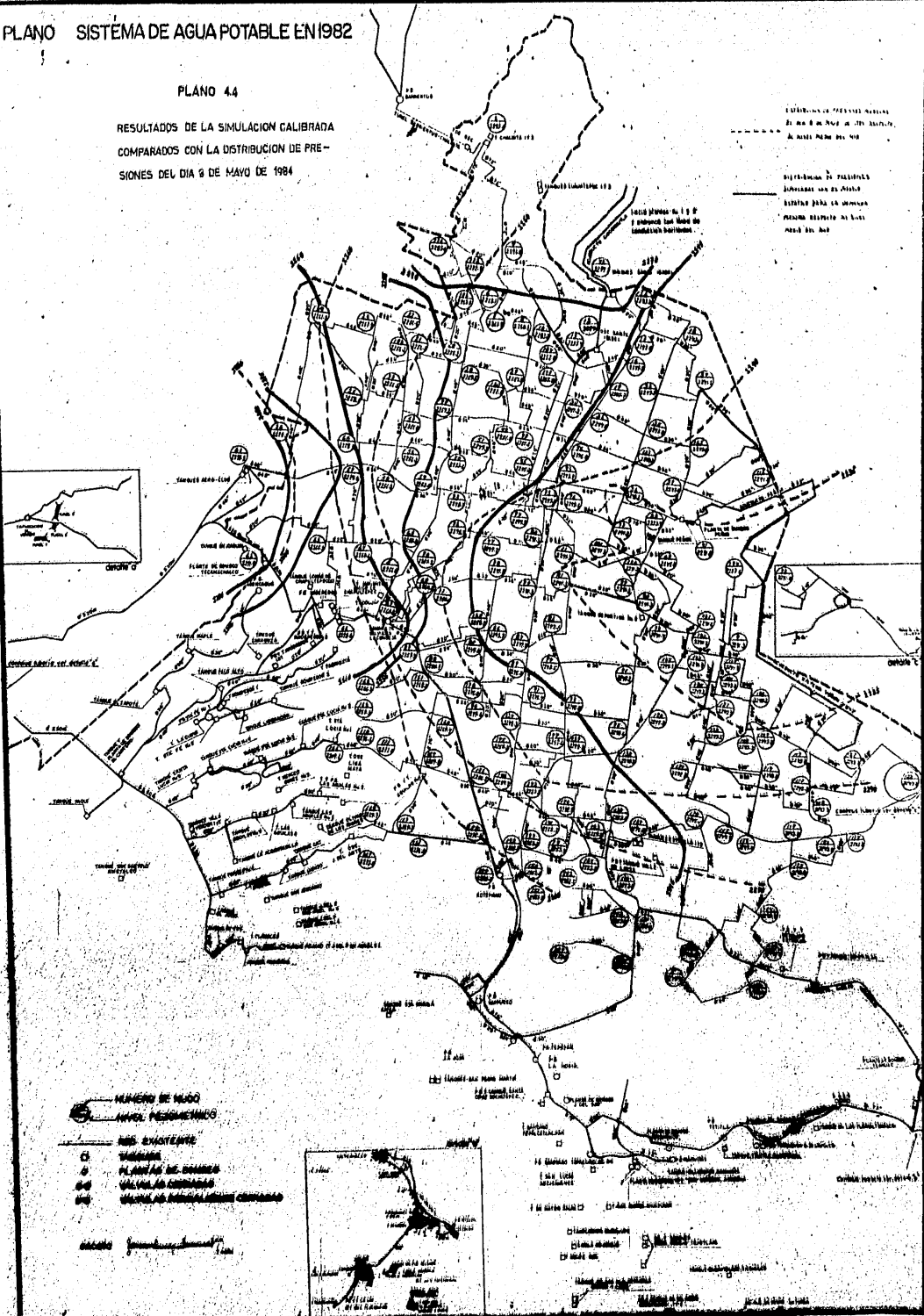
PLANO SISTEMA DE AGUA POTABLE EN 1982

PLANO 44

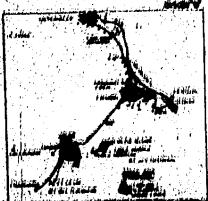
RESULTADOS DE LA SIMULACION CALIBRADA
COMPARADOS CON LA DISTRIBUCION DE PRE-
SIONES DEL DIA 9 DE MAYO DE 1984

--- LINEAS DE PRESIONES
EN UN 8 DE MAYO DE 1984
& EN UN 9 DE MAYO DE 1984

--- LINEAS DE PRESIONES
SIMULADAS EN EL DIA 9 DE MAYO DE 1984
--- LINEAS DE PRESIONES
RECORDADAS EN EL DIA 9 DE MAYO DE 1984



- NUMERO DE NUDO**
TIPO DE EQUIPAMIENTO
- TANQUE
 - PLANTA DE TRATAMIENTO
 - VALVULA
 - VALVULA DE REGULACION



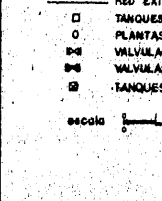
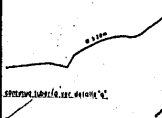
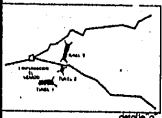
- NUMERO DE NUDO**
TIPO DE EQUIPAMIENTO
- TANQUE
 - PLANTA DE TRATAMIENTO
 - VALVULA
 - VALVULA DE REGULACION








PLANO SISTEMA DE AGUA POTABLE EN 1982

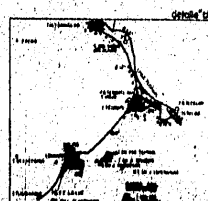
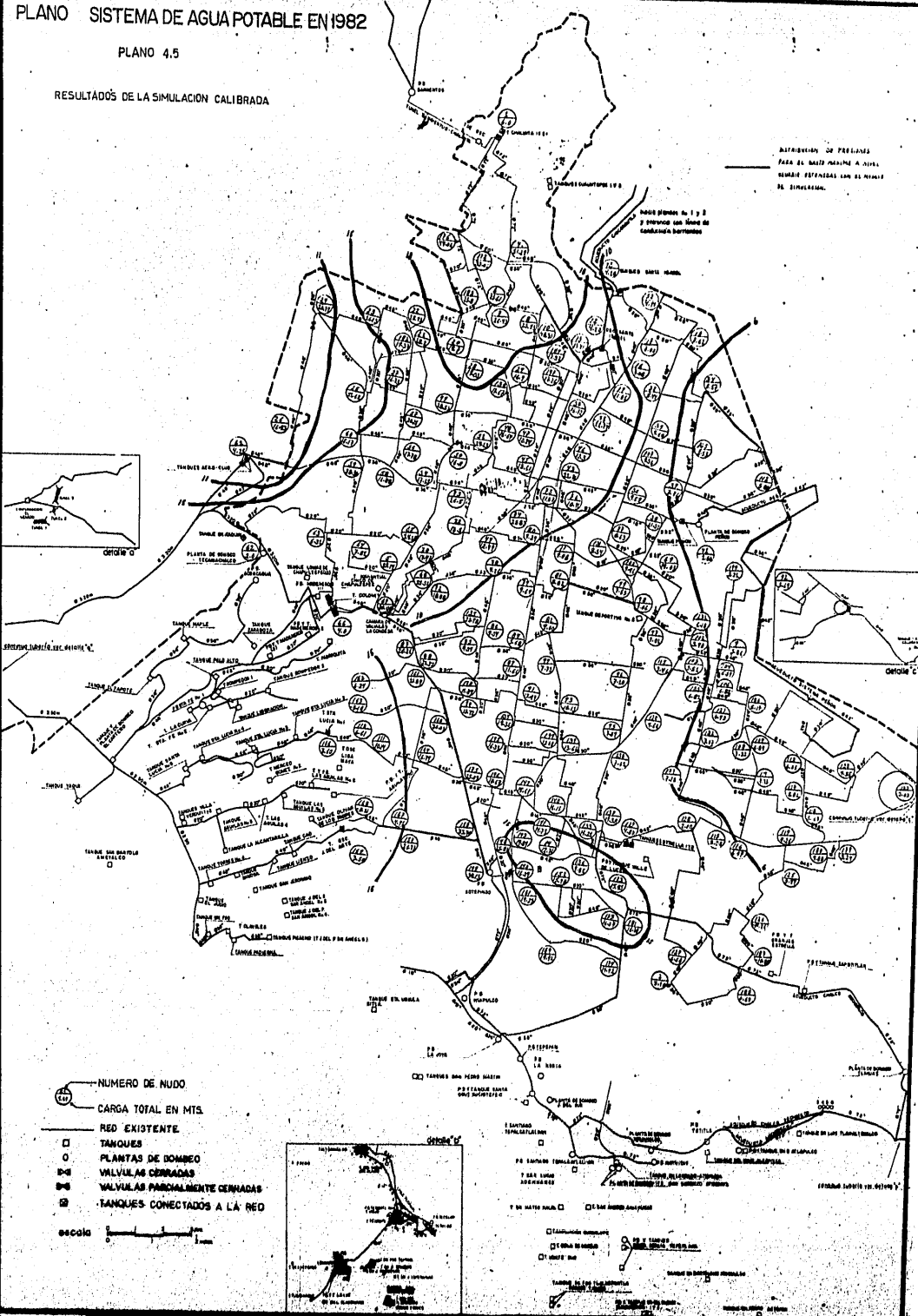
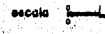
PLANO 4.5







RESULTADOS DE LA SIMULACION CALIBRADA

DISTRIBUCION DE PRECIPIOS
PARA EL SUJO MASIMO A UNAS
SEMANAS DEPENDIENDO CON EL RESULT
DE SIMULACION.



-  NUMERO DE NUDO
-  CARGA TOTAL EN M3
- RED EXISTENTE**
 -  TANQUES
 -  PLANTAS DE DOMBEO
 -  VALVULAS CERRADAS
 -  VALVULAS PARCIALMENTE CERRADAS
 -  TANQUES CONECTADOS A LA RED



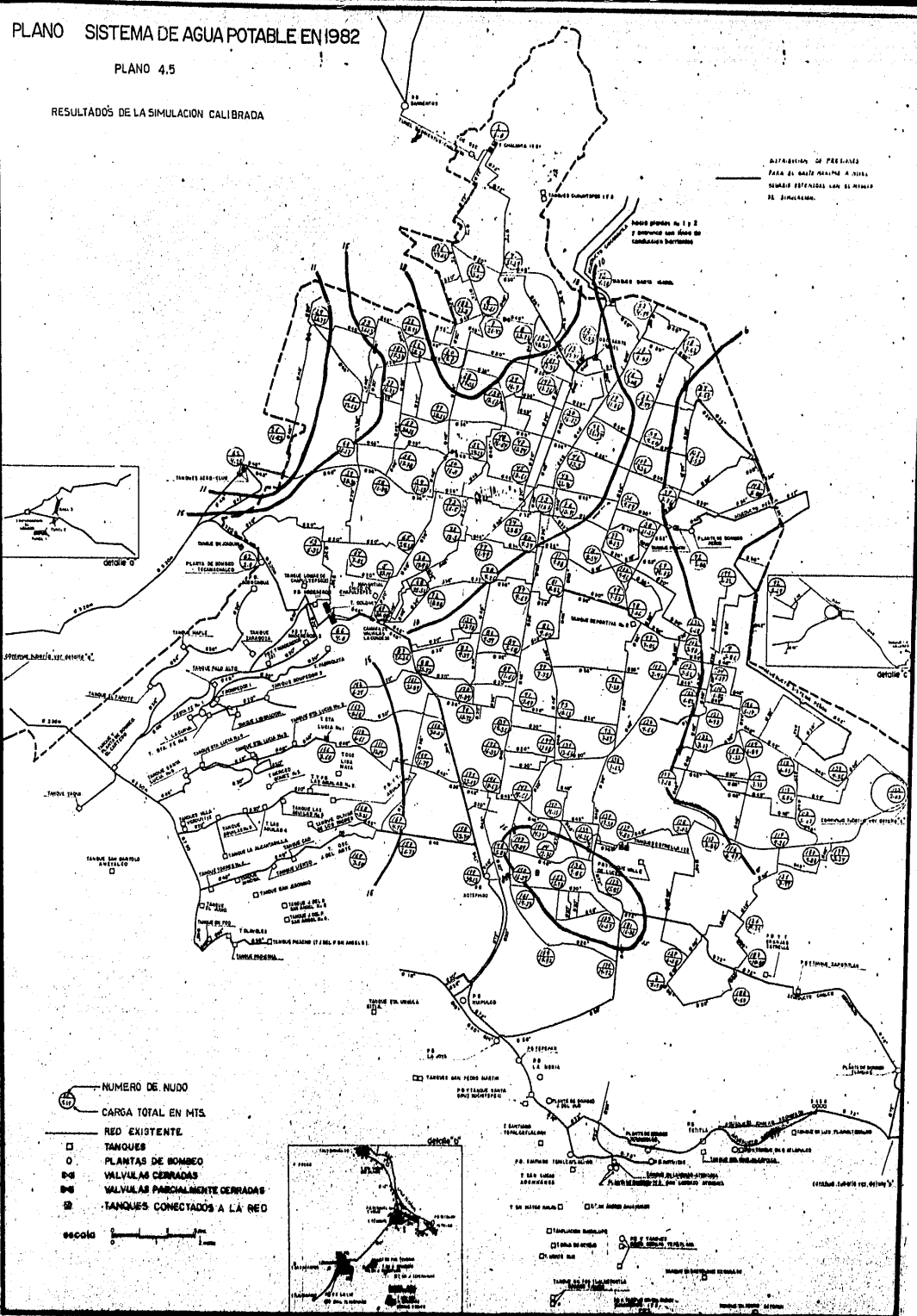
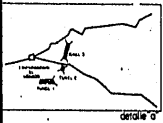
-  TANQUES CON NINGUN MARCA-  ESTACIONES DE TRATAMIENTO-  PLANTAS DE TRATAMIENTO-  VALVULAS CERRADAS
-  VALVULAS PARCIALMENTE CERRADAS
-  TANQUES CONECTADOS A LA RED

PLANO SISTEMA DE AGUA POTABLE EN 1982

PLANO 4.5

RESULTADOS DE LA SIMULACION CALIBRADA

DISTRIBUCION DE PRESIONES
PARA EL CASO MAXIMO A OTRAS
SINIENTE EFECTOS CON EL TIEMPO
DE SIMULACION.



NUMERO DE NUDO

CARGA TOTAL EN MTS

RED EXISTENTE

TANQUES

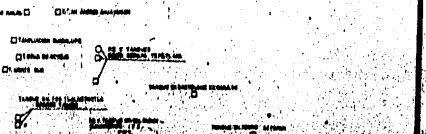
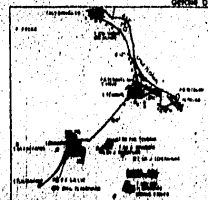
PLANTAS DE BOMBEO

VALVULAS CERRADAS

VALVULAS PARCIALMENTE CERRADAS

TANQUES CONECTADOS A LA RED

escala

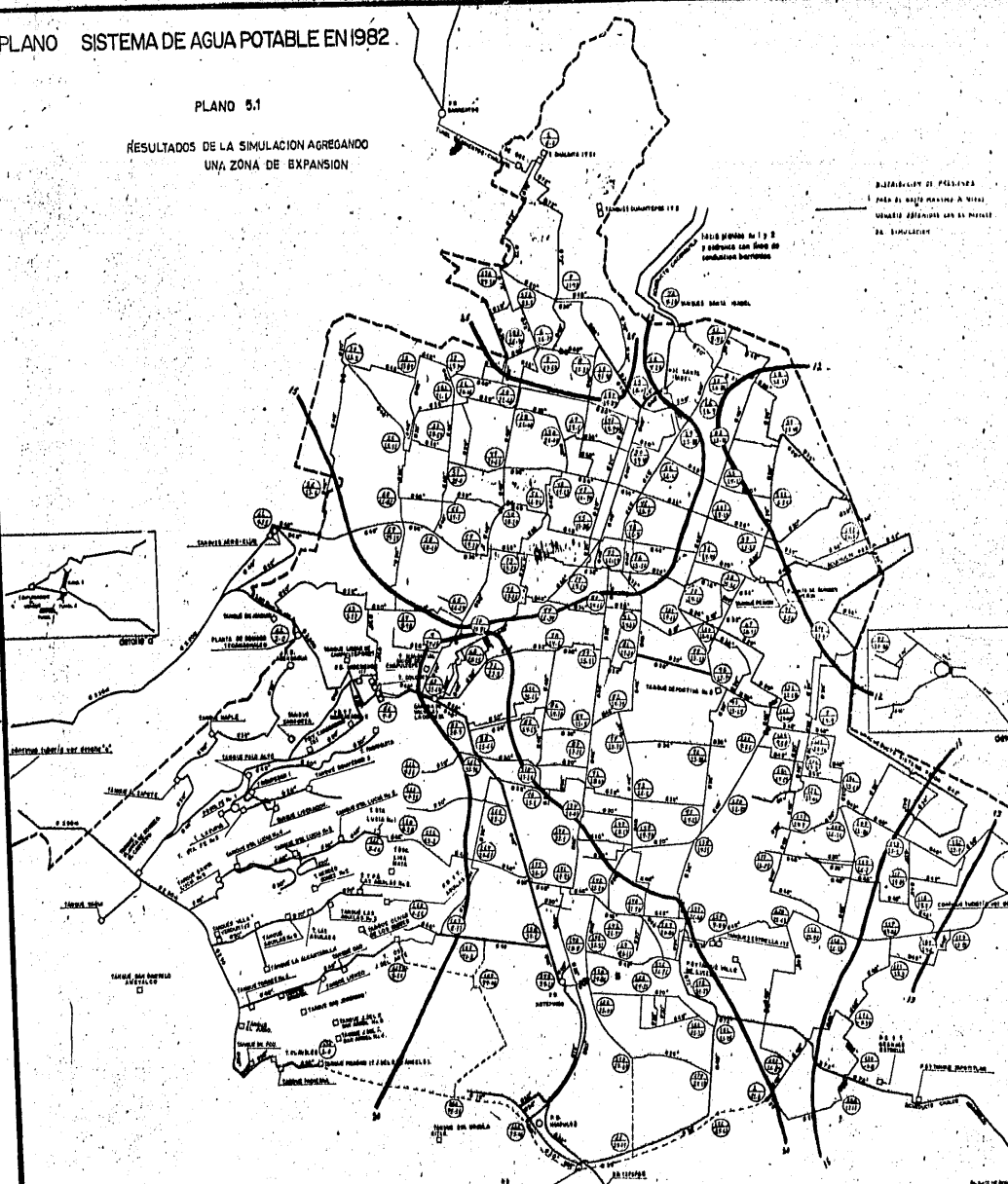


PLANO SISTEMA DE AGUA POTABLE EN 1982.

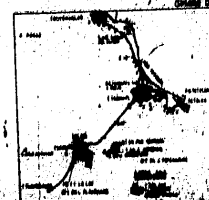
PLANO 5.1

RESULTADOS DE LA SIMULACION AGREGANDO
UNA ZONA DE EXPANSION

ELABORACION DE PLANOS
POR EL SERVICIO NACIONAL
DE AGUAS POTABLES Y
SANEAMIENTO BASADO EN LA
INFORMACION DE LA
COMUNIDAD



- NÚMERO DE NUDO
- CARGA TOTAL EN MTS
- RED DE LA ZONA DE EXPANSION
- RED EXISTENTE
- TANQUES
- PLANTAS DE BOMBEO
- VALVULAS CERRADAS
- VALVULAS PARCIALMENTE CERRADAS

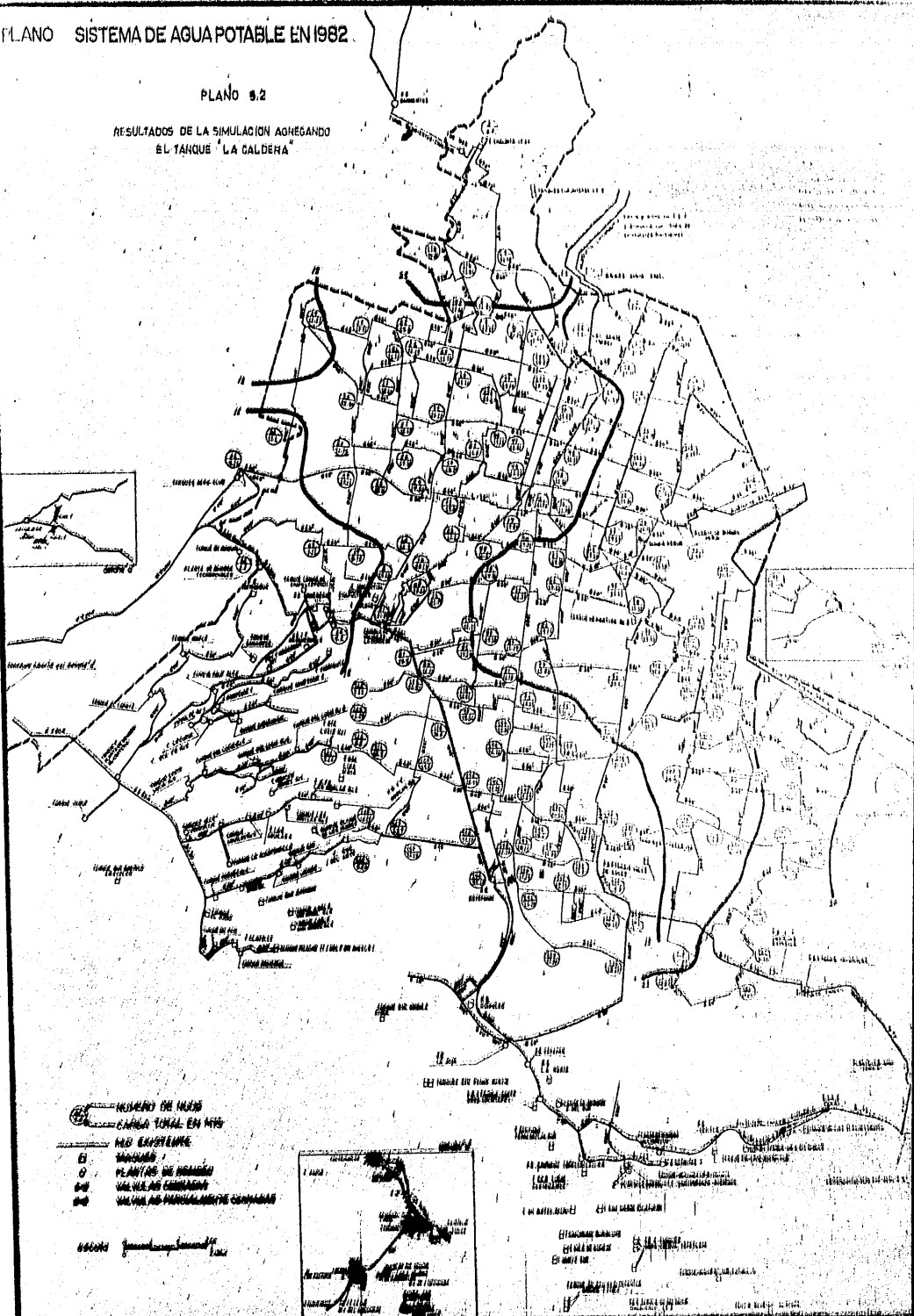


1. Fuente: ...
 2. Fuente: ...
 3. Fuente: ...
 4. Fuente: ...
 5. Fuente: ...
 6. Fuente: ...
 7. Fuente: ...
 8. Fuente: ...
 9. Fuente: ...
 10. Fuente: ...
 11. Fuente: ...
 12. Fuente: ...
 13. Fuente: ...
 14. Fuente: ...
 15. Fuente: ...
 16. Fuente: ...
 17. Fuente: ...
 18. Fuente: ...
 19. Fuente: ...
 20. Fuente: ...
 21. Fuente: ...
 22. Fuente: ...
 23. Fuente: ...
 24. Fuente: ...
 25. Fuente: ...
 26. Fuente: ...
 27. Fuente: ...
 28. Fuente: ...
 29. Fuente: ...
 30. Fuente: ...
 31. Fuente: ...
 32. Fuente: ...
 33. Fuente: ...
 34. Fuente: ...
 35. Fuente: ...
 36. Fuente: ...
 37. Fuente: ...
 38. Fuente: ...
 39. Fuente: ...
 40. Fuente: ...
 41. Fuente: ...
 42. Fuente: ...
 43. Fuente: ...
 44. Fuente: ...
 45. Fuente: ...
 46. Fuente: ...
 47. Fuente: ...
 48. Fuente: ...
 49. Fuente: ...
 50. Fuente: ...
 51. Fuente: ...
 52. Fuente: ...
 53. Fuente: ...
 54. Fuente: ...
 55. Fuente: ...
 56. Fuente: ...
 57. Fuente: ...
 58. Fuente: ...
 59. Fuente: ...
 60. Fuente: ...
 61. Fuente: ...
 62. Fuente: ...
 63. Fuente: ...
 64. Fuente: ...
 65. Fuente: ...
 66. Fuente: ...
 67. Fuente: ...
 68. Fuente: ...
 69. Fuente: ...
 70. Fuente: ...
 71. Fuente: ...
 72. Fuente: ...
 73. Fuente: ...
 74. Fuente: ...
 75. Fuente: ...
 76. Fuente: ...
 77. Fuente: ...
 78. Fuente: ...
 79. Fuente: ...
 80. Fuente: ...
 81. Fuente: ...
 82. Fuente: ...
 83. Fuente: ...
 84. Fuente: ...
 85. Fuente: ...
 86. Fuente: ...
 87. Fuente: ...
 88. Fuente: ...
 89. Fuente: ...
 90. Fuente: ...
 91. Fuente: ...
 92. Fuente: ...
 93. Fuente: ...
 94. Fuente: ...
 95. Fuente: ...
 96. Fuente: ...
 97. Fuente: ...
 98. Fuente: ...
 99. Fuente: ...
 100. Fuente: ...

PLANO SISTEMA DE AGUA POTABLE EN 1982.

PLANO 9.2

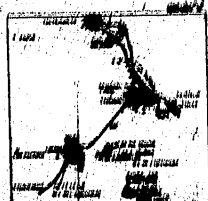
RESULTADOS DE LA SIMULACION ADEGANDO
EL TANQUE "LA CALDERA"



RESUMEN DE VALORES
CARGA TOTAL EN MMS
MMS EXISTENTE

- VALVULAS
- PLANTAS DE TRATAMIENTO
- VALVULAS COMBINADAS
- VALVULAS PARCIALMENTE COMBINADAS

660000



ESTACIONAMENTO DE AGUA
ESTACION DE TRATAMIENTO
ESTACION DE BOMBEO
ESTACION DE ALMACENAMIENTO
ESTACION DE DISTRIBUCION
ESTACION DE REGULACION
ESTACION DE CONTROL
ESTACION DE MONITOREO
ESTACION DE MANTENIMIENTO
ESTACION DE REPARACION
ESTACION DE REemplazo
ESTACION DE RECONSTRUCCION
ESTACION DE REFORMA
ESTACION DE RECONSTRUCCION
ESTACION DE REFORMA
ESTACION DE RECONSTRUCCION
ESTACION DE REFORMA