

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA

2E
114

**MODELO DE SIMULACION DEL SISTEMA PRINCIPAL
DE DRENAJE DEL DISTRITO FEDERAL**

TESIS PROFESIONAL ● INGENIERO CIVIL

BERNARDO LESSER HIRIART ● 1983



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 esta 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.

I N D I C E

Tema	Pág
1. Introducción	1
2. Descripción del Sistema Principal de Drenaje	4
2.1 Descripción del sistema	4
2.2 Perspectivas de desarrollo futuro del sistema	8
3. Cálculo de los hidrogramas de ingreso al sistema	15
3.1 Análisis de tormentas	15
3.2 Cálculo de los volúmenes de ingreso al sistema	17
3.3 Cálculo de los hidrogramas de ingreso al sistema	17
4. Desarrollo teórico del modelo de simulación	21
4.1 Esquema del modelo de simulación	21
4.2 Modelación de los elementos del sistema	24
4.3 Calibración del modelo de simulación	32
5. Manual del programa	37
5.1 Lectura de datos	38
5.2 Impresión	52
6. Ejemplo de aplicación	57
6.1 Descripción del ejemplo	57
6.2 Resultados	59
7. Conclusiones y recomendaciones	67
Bibliografía y Referencias	

1. INTRODUCCION

La ciudad de México ha realizado a lo largo de su historia grandes esfuerzos por desalojar las aguas negras y pluviales que se generan en ella. Cabe mencionar obras como el Tajo de Nochistongo, en la época de la colonia, el tunel de Tequizquiac y el Gran Canal de Desague, entre 1870 y 1900, y en este siglo el interceptor del poniente y el emisor del poniente, así como el sistema de drenaje profundo, todavía en desarrollo.

El creciente incremento en la densidad de población, los hundimientos en la ciudad, el constante peligro de inundaciones graves y la necesidad de dar servicio de drenaje a todos los habitantes de la ciudad de México hacen indispensable el continuo desarrollo de la infraestructura de drenaje.

La columna vertebral de esta infraestructura es el sistema principal de drenaje del Distrito Federal. Las posibilidades de ampliación de este sistema deben estudiarse detalladamente para dar la solución adecuada a los requerimientos de la ciudad de acuerdo con los recursos disponibles.

Es por esto que surge la necesidad de realizar un diagnóstico del sistema principal de drenaje para identificar los requerimientos básicos, así como contar con elementos para evaluar diversas alternativas para su desarrollo.

Anteriormente se han hecho simulaciones aisladas de algunos elementos del sistema principal (ref.1), así como estudios de las necesidades prioritarias de drenaje en el Distrito Federal que incluyen diversas propuestas de desarrollo (ref.2). Sin embargo, en estos trabajos no ha sido posible efectuar un estudio global del sistema principal de drenaje, debido principalmente a la incapacidad de incluir dentro de un modelo las discontinuidades físicas y operacionales de los elementos del sistema y sus interrelaciones.

En este trabajo se presenta un modelo de simulación que permite eliminar las limitaciones de estudios anteriores para poder efectuar un análisis del sistema principal de drenaje en forma integral, aunque para ello se sacrifique el grado de detalle en la solución.

Mediante el modelo será posible realizar un diagnóstico del sistema principal en su estado actual, así como probar la eficiencia, ventajas y desventajas de posibles desarrollos futuros.

En el capítulo 2 se hace una descripción del sistema principal de drenaje del Distrito Federal, de los elementos que lo componen, sus funciones e interrelaciones. También se describen los problemas más graves, en cuanto a drenaje, y algunas alternativas de desarrollo futuro.

Para poder desarrollar un modelo de simulación eficaz y de fácil manejo fue necesario elaborar un método simple para estimar las avenidas de ingreso al sistema con base en un análisis de tormentas ocurridas en el Valle de México y en las características físicas de las cuencas del Distrito Federal. Un resumen de

de estos estudios que se realizaron en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (ref.3) se presenta en el capítulo 3.

Las bases teóricas del modelo y la descripción de la estructura del mismo se dan en el capítulo 4. Ahí mismo se mencionan las ventajas y desventajas del modelo , sus restricciones y las pruebas de calibración que se efectuaron.

En el capítulo 5 se da un instructivo para la utilización del programa y en el capítulo 6 se describe un ejemplo de aplicación del modelo de simulación.

En el último capítulo se mencionan las conclusiones a que se llegó en este trabajo y se hacen algunas recomendaciones para mejorar el modelo de simulación.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PRINCIPAL DE DRENAJE.

En este capítulo se pretende dar una explicación de lo que se entiende por "Sistema Principal de Drenaje del Distrito Federal" haciendo una descripción de los elementos que lo componen, sus características y sus funciones. Se mencionan también, algunos de los posibles desarrollos a futuro del sistema.

2.1. Descripción del sistema.

El sistema principal de drenaje del Distrito Federal está compuesto por una serie de elementos, ríos, conductos cerrados, túneles, presas, plantas de bombeo, relacionados unos con otros para cumplir con la función de regular y desalojar las aguas negras y pluviales del Distrito Federal. El sistema principal recibe las descargas de la red primaria de drenaje, la que a su vez las recibe de la red secundaria (atarjeas).

El sistema principal de drenaje descarga las aguas residuales y pluviales fuera del Distrito Federal a través del Tajo de Nochistongo, de los túneles del Tequiquiac y del portal de salida del drenaje profundo.

Con el objeto de describir la función de cada elemento del sistema principal

de drenaje, podemos definir cuatro grandes zonas de drenaje en el Distrito Federal, cada una con características y problemas diferentes. Estas zonas son: la del poniente, la del sur, la del oriente y la del centro. En la figura 2.1 puede verse la delimitación de estas zonas.

El sistema principal de drenaje cuenta con varios elementos que pueden incluirse en dos grandes grupos:

- 1) Un grupo de conductos con orientación general sur-norte que van interceptando las aguas que escurren en dirección poniente-oriente. A este grupo de conductos se le llamará sistema de interceptores.
- 2) Un grupo de elementos que conducen las aguas en dirección poniente-oriente; esta formado en su mayoría por ríos antiguos, gran parte de ellos entubados. Casi todos estos elementos descargan sus aguas al sistema de interceptores.

En la figura 2.2 se muestra un esquema de los elementos del sistema principal de drenaje; a continuación se da una descripción de cada uno de ellos:

1) Elementos del sistema de interceptores:

- a) El sistema de interpresas del poniente. Está formado por treinta y dos presas pequeñas, las cuales reciben y regulan los escurrimientos que se generan en la zona alta del poniente de la ciudad. Las presas están intercomunicadas y pueden descargar los gastos regulados al interceptor del poniente y/o al río Hondo (que a su vez las conduce al Vaso del Cristo) y al río Churubusco.
- b) Interceptor del poniente. Recibe los escurrimientos generados en la zona poniente de la ciudad que no han sido regulados por el siste-

ma de interpresas del poniente y los conduce al norte de la ciudad para descargarlos en el Vaso del Cristo.

- c) Interceptor centro-poniente. Es un elemento del sistema de drenaje profundo cuya función es drenar las agua generadas al oriente del interceptor del poniente, desde el río Consulado hasta el emisor central, donde descarga. Durante situaciones críticas puede servir de alivio al interceptor del poniente. Drena parte de la zona poniente y parte de la zona centro del Distrito Federal.
- d) Interceptor central. Es parte, también, del sistema de drenaje profundo. Su función es drenar la parte de la zona centro de la ciudad situada al oriente de los interceptores del poniente y centro-poniente, desde el río de la Piedad hasta el emisor central, donde descarga.
- e) Interceptor oriente. Al igual que los dos elementos anteriores, es parte del drenaje profundo. Controla con ayuda del gran canal de desague los escurrimientos ocurridos en las zonas oriente y centro del Distrito Federal, limitados, al poniente, por los interceptores central y del poniente y por el río Consulado, al sur, por el río Churubusco y lago de Texcoco, y al norte, por el interceptor oriente. Conduce las aguas hasta descargarlas al emisor central.
- f) Gran canal de desague. Como ya se mencionó drena las zonas centro y oriente de la ciudad junto con el interceptor oriente. Descarga fuera de la ciudad a los túneles del Tequizquiac.
- g) Vaso del Cristo. Es un elemento de regulación que puede considerar-

se parte del sistema interceptor ya que recibe y regula la descargas del río Hondo (sistema de interpresas del poniente) y del interceptor del poniente. Los gastos regulados los descarga al río de los Remedios y/o al emisor del poniente (fuera de la ciudad).

2) Grupo de elementos con orientación poniente-orientado:

- a) Río Churubusco. Es el elemento principal de drenaje de la zona sur de la ciudad, limitada, al norte, por el propio río Churubusco y por el lago de Texcoco. Recibe los escurrimientos de la zona sur por medio de plantas de bombeo y los conduce al lago de Texcoco. Durante su trayecto puede derivar parte de su caudal hacia el gran canal de desagüe, a través de la planta de bombeo Aculco y del colector Churubusco.
- b) Planta de bombeo Aculco. Es un elemento regulador que recibe descargas del río Churubusco, del canal de Miramontes y de la zona situada entre el río de la Piedad y el río Churubusco. Puede descargar hacia el colector Churubusco (que a su vez descarga al gran canal de desagüe) o hacia el río Churubusco. Puede considerarse como unión de la zonas sur, orientado y centro de la ciudad.
- c) Río de la Piedad. Recibe los escurrimientos generados entre su traza y la del río Consulado. Conduce las aguas hasta el colector Churubusco (quien las descarga al gran canal de desagüe).
- d) Colector Churubusco. Se puede considerar como la prolongación sur del gran canal de desagüe. Recibe las aportaciones del río de la Piedad y del río Churubusco (a través de la planta de bombeo Aculco).

- e) Río Consulado. Drena los escurrimientos generados en la parte norte de la zona centro de la ciudad, situada entre su propia traza y la del río de los Remedios. Descarga al gran canal de desagüe pero puede derivar una parte hacia el interceptor central.
- f) Río de los Remedios. Se encuentra en la zona central del Distrito Federal, en el límite norte de éste. Conduce las aportaciones del Vaso del Cristo, del río San Javier y del río Tlalnepantla para conducir las hasta el gran canal de desagüe. Al igual que el río Consulado, puede derivar parte de su caudal al interceptor central.

En la figura 2.3 se presenta un esquema que muestra la asignación de cuencas a los principales elementos del sistema. Cabe hacer notar que ésta asignación de cuencas es tan solo una aproximación, ya que las cuencas reales de cada elemento no son fijas sino que pueden variar según la operación del sistema durante las tormentas.

2.2 Perspectivas de desarrollo futuro del sistema.

El sistema de drenaje del Distrito Federal es insuficiente para evacuar con eficiencia las aguas negras y pluviales de la ciudad, sobre todo durante tormentas que ocurren en el Valle de México (ref. 2). Esta insuficiencia se ve acentuada principalmente por la gran concentración demográfica, siempre en aumento, y por el hundimiento de la ciudad.

Las zonas de la ciudad que presentan los problemas más graves son:

- La zona sur. En esta zona el 53% de los habitantes no cuentan con servicios de drenaje, lo que refleja la insuficiencia del sistema de

drenaje en el sur de la ciudad. Esta insuficiencia se debe a la poca pendiente (acentuada por los hundimientos) y falta de capacidad en los conductos que drenan hacia el río Churubusco, como son el canal de Miramontes, el canal Nacional, parte baja del río San Buenaventura y canal de Chalco. Hay que hacer notar que debido a los hundimientos, todas las descargas al río Churubusco se hacen mediante bombeo.

- La zona oriente. La baja capacidad de desalojo del gran canal de desagüe debida a su baja pendiente, aunada al tamaño de la cuenca que drena, es la causa principal de la insuficiencia de drenaje de esta zona. Una vez más esto se ve agravado por los hundimientos diferenciales de la ciudad, que en algunos casos provocan que el agua no llegue a las bombas, lo que ocasiona inundaciones.

De lo anterior se desprende la necesidad de modificar y ampliar el sistema principal de drenaje del Distrito Federal para poder desalojar eficientemente las aguas de la ciudad.

Entre las alternativas de desarrollo futuro destacan:

- Prolongación del sistema de drenaje profundo hacia el sur. La figura 2.4 muestra la posible ampliación de este sistema.
- Creación de lagunas de regulación en el sur de la ciudad.
- Rectificación del cauce del río de los Remedios y del canal Nacional.
- Ampliación de la capacidad del sistema de interpresas del poniente. Esto requiere el desazolvamiento de las presas, el saneamiento de las cuencas y una reforestación de la zona alta del poniente de la ciudad.

- La sustitución del canal de Chalco y canal Nacional por túneles.
- Creación de nuevas plantas de bombeo, sobre todo en la zona sur de la ciudad.
- Construcción de un túnel que una el río de la Magdalena con el río San Buenaventura.

A las alternativas anteriores hay que agregar el aumento de la capacidad de las redes primaria y secundaria de drenaje con la construcción de nuevos colectores y el desazolvamiento de los actuales. Tampoco se debe olvidar el constante mantenimiento del sistema.

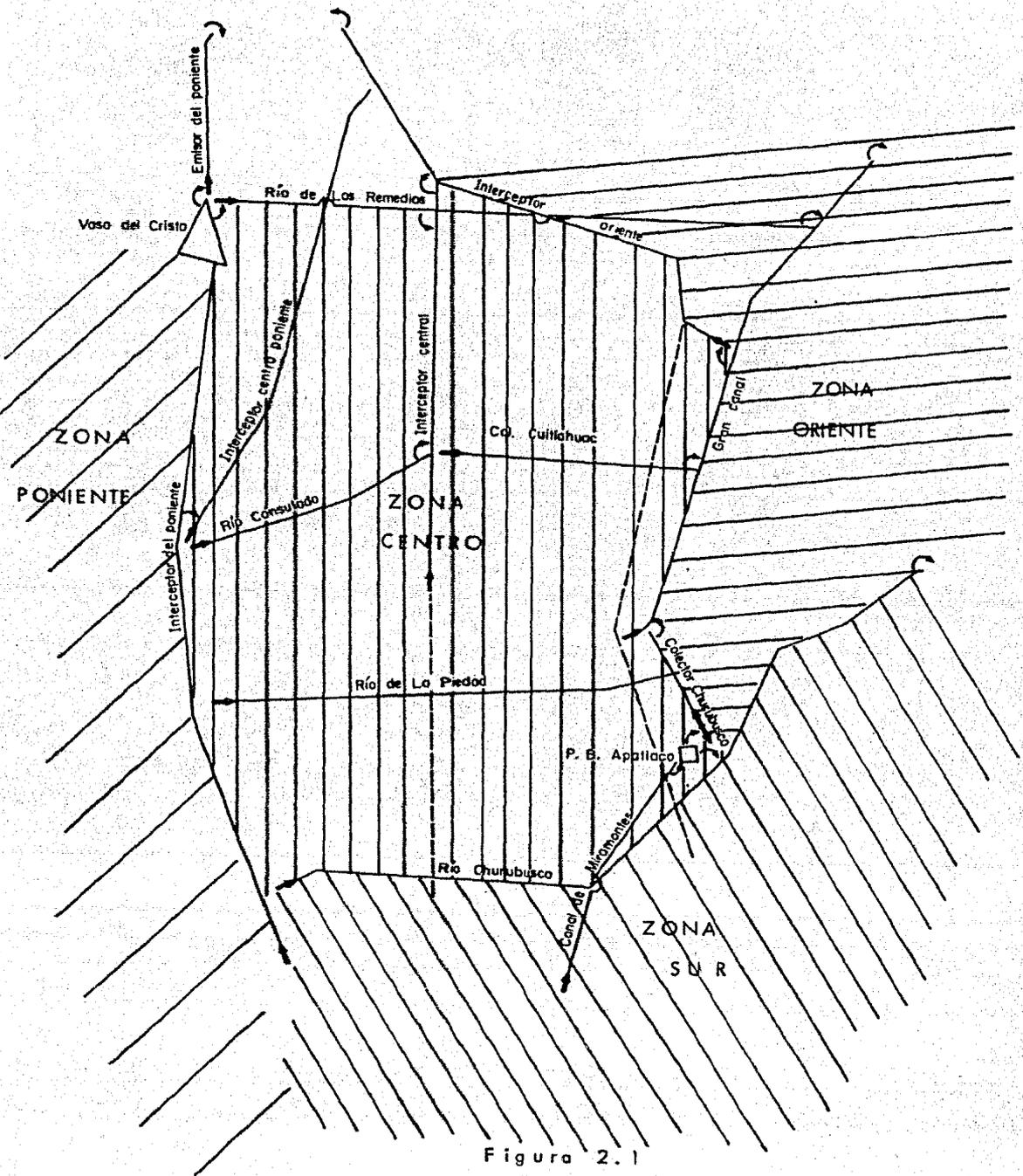


Figura 2.1

3. CALCULO DE LOS HIDROGRAMAS DE INGRESO AL SISTEMA.

Para poder simular varias alternativas de desarrollo del sistema principal de drenaje, era necesario elaborar un método simplificado para calcular los hidrogramas de ingreso al sistema. En el Instituto de Ingeniería de la UNAM se desarrolló un método para el cálculo de las avenidas de ingreso en función de las características físicas de las cuencas. Para ello fue necesario un estudio probabilístico de tormentas ocurridas en el Valle de México.

Se resumen a continuación los trabajos realizados en el Instituto de Ingeniería (ref. 3) para el cálculo de hidrogramas de ingreso.

3.1 Análisis de tormentas

Aunque ya se habían efectuado análisis de tormentas en el Valle de México (ref. 4) se limitaban a estudios en cuencas pequeñas y los resultados obtenidos eran muy conservadores, lo que provocaba errores considerables al extrapolar los resultados

para cuencas mayores a 100 km^2 .

Por lo anterior fue necesario efectuar un análisis de tormentas históricas cuya magnitud fuera tal que afectara todo o gran parte del sistema principal de drenaje.

Para el análisis se eligieron 18 tormentas ocurridas en el Valle de México a lo largo de 5 años (de Septiembre de 1968 a Agosto de 1973). Se definieron cinco cuencas circulares con diferente área cada una:

- a) 80 km^2 ;
- b) 220 km^2 ;
- c) 400 km^2 ;
- d) 600 km^2 ;
- e) 820 km^2 ;

concéntricas en un mismo punto ubicado en el centro de la ciudad.

De acuerdo con el método de Thiessen (método de las áreas de influencia) se obtuvieron para cada tormenta los siguientes valores :

- precipitación máxima absoluta, P_{\max} ;
- precipitación máxima en cada cuenca, $P_{\max}(a)$, $P_{\max}(b)$, etc. ;
- precipitación media en cada cuenca, $P_m(a)$, $P_m(b)$, etc. ;
- factor de reducción, r , para cada cuenca. Este factor es una relación entre la precipitación media y máxima de cada cuenca .

Con base en los datos anteriores se graficó, en papel semilogaritmico, el factor de reducción medio de cada cuenca en función del área correspondiente. La gráfica se muestra con línea continua en la figura 3.1.

Al comparar estos resultados con los obtenidos por otros autores (ref. 5) se puede observar que, para cuencas pequeñas, el valor del factor de reducción es demasiado bajo. Esto puede deberse a que el centro real de la tormenta no coincidiera, en muchos casos, con el centro propuesto. Por lo anterior y la falta de datos de un mayor número de tormentas, se propuso ajustar la curva "factor de reducción medio-área"

a la mostrada con línea punteada en la figura 3.1 .

3.2 Cálculo de los volúmenes de ingreso al sistema.

El volumen de ingreso a un determinado elemento del sistema es función del área de la cuenca que drena, el coeficiente de escurrimiento, la precipitación y la duración de la tormenta.

El área de cada cuenca puede obtenerse de la asignación de cuencas a cada elemento (ver capítulo 2). El coeficiente de escurrimiento varía, para zonas urbanizadas, entre 0.35 y 0.55 (ref. 5) y para zonas poco urbanizadas entre 0.02 y 0.15.

De acuerdo con la observación y análisis de tormentas, la duración de estas puede considerarse de tres horas; tormentas de más de tres horas de duración son poco representativas y las menores de tres horas no afectarían a todo el sistema principal de drenaje.

Con los datos anteriores y definidas las características de cada cuenca y tormenta, puede obtenerse una estimación de los volúmenes de ingreso a los elementos del sistema.

3.3 Cálculo de los hidrogramas de ingreso al sistema.

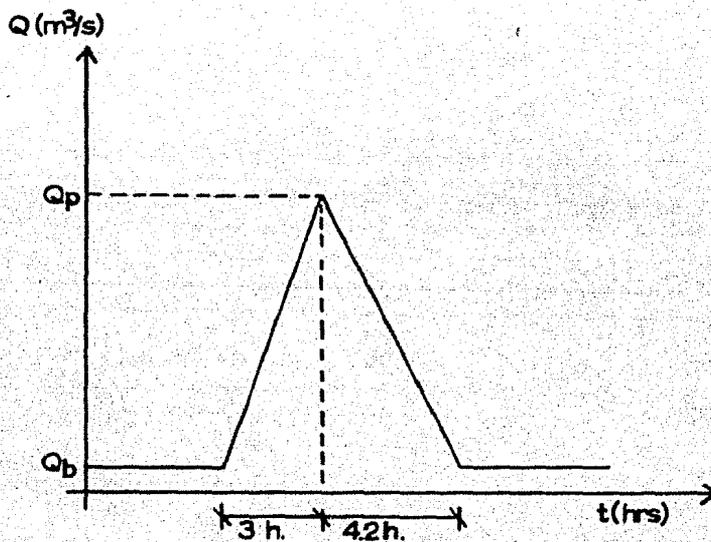
De la observación de registros históricos de avenidas en el Valle de México, se pueden identificar dos tipos de hidrogramas, los de forma triangular y los de forma trapecial. En el primer caso el tiempo de concentración de la cuenca es mayor o igual a la duración de la tormenta, en el segundo es menor.

En ambos casos puede considerarse un gasto base, calculado en función de la población servida.

Partiendo del cálculo del volumen de ingreso y de una estimación del tiempo de concentración de la cuenca, pueden obtenerse los hidrogramas de la manera siguiente:

a) Forma triangular

$t_{con} \geq 3 \text{ hrs}$



$$Q_b = f(\# \text{ habitantes})$$

$$Q_p = \frac{VI}{3.6 \times 3600}$$

donde :

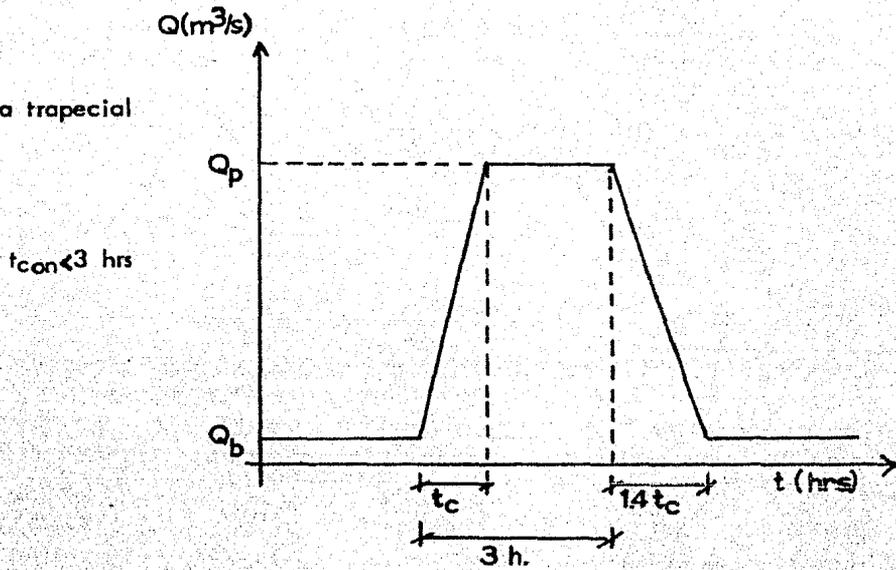
t_{con} tiempo de concentración de la cuenca, en horas

Q_b gasto base, en m^3/seg

Q_p gasto pico, en m^3/seg

VI volumen de ingreso, en m^3

b) Forma trapezoidal



$$Q_p = \frac{VI}{3600(3+0.2t_{con})}$$

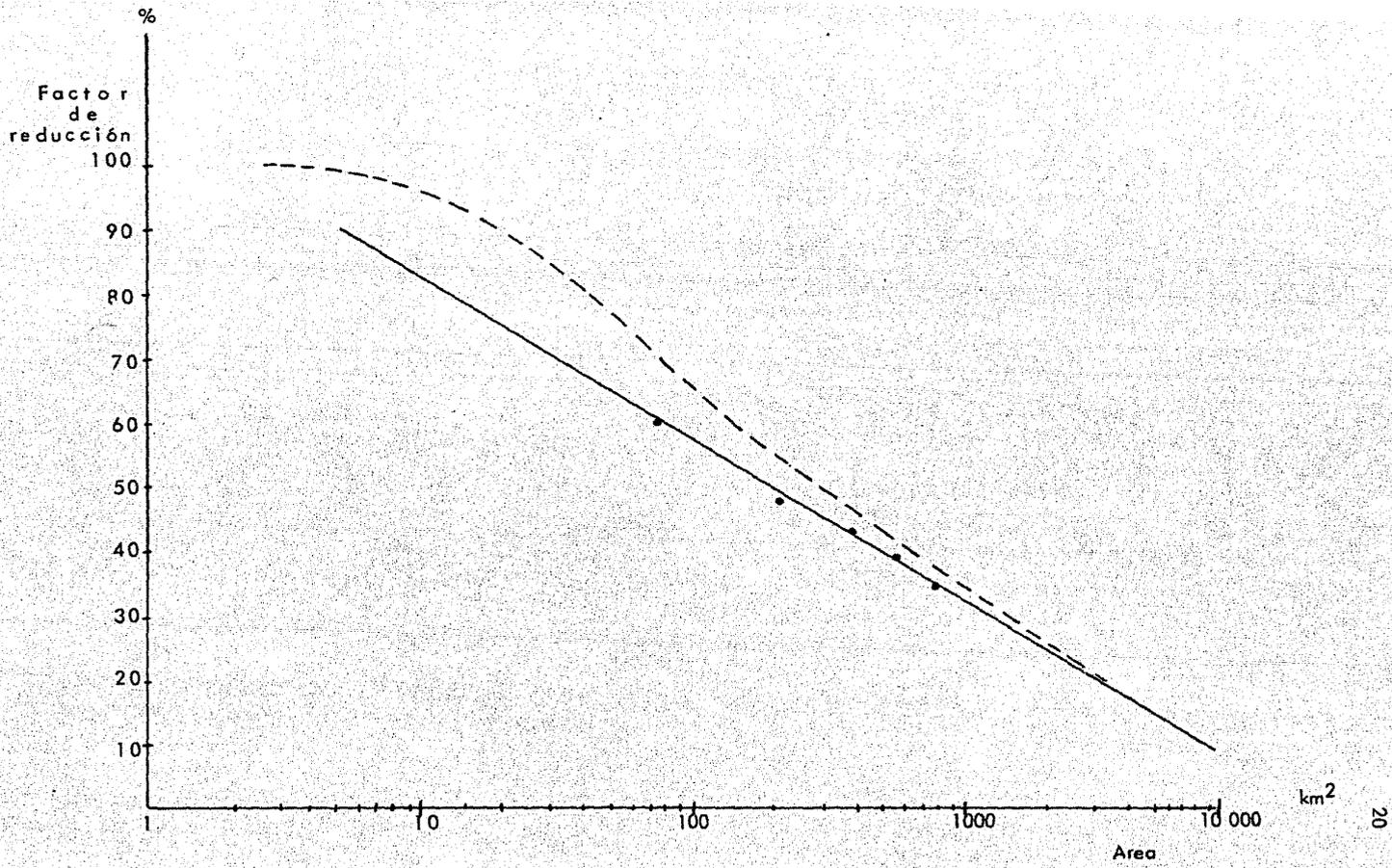


Figura 3.1

4. DESARROLLO TEORICO DEL MODELO DE SIMULACION

Aunque se han elaborado modelos anteriores (ref. 1), sólo se han limitado a la simulación de algunos elementos del sistema principal de drenaje (rfo Churubusco, sistema de interpresas del poniente, etc.) y de los colectores más importantes de la red primaria de drenaje. En estos modelos, basados en una simulación de redes de colectores, no ha sido posible incluir las discontinuidades del sistema principal, como son la transferencia de gasto de un componente a otro de acuerdo con diversas políticas de operación, derivaciones parciales, plantas de bombeo, etc.

Para poder simular el sistema principal de drenaje se ha desarrollado este modelo, cuyas principales características se describen a continuación.

4.1 Esquema del modelo de simulación.

Para la elaboración de este esquema se estudio el sistema principal de drenaje, los elementos que lo componen, como estan relacionados y como se operan. El sistema

esta formado por una serie de elementos, conductos abiertos y cerrados, presas, plantas de bombeo, etc. relacionados entre si.

Cada elemento del sistema está representado en el modelo por un componente, mientras que las políticas de operación del sistema y los puntos de intercambio de gasto se idealizaron como nodos.

Al desarrollar el modelo simulación se procuró que fuera flexible y de fácil manejo, para permitir la simulación de diversas alternativas de desarrollo del sistema sin incluir grandes cambios o modificaciones en el modelo.

Estas características se lograron al elaborar un programa de cómputo de tipo modular, es decir, varios módulos ligados a un programa principal, de tal manera que, según las necesidades de simulación, se puedan modificar, eliminar o incluir nuevos módulos sin alterar la estructura básica del programa.

El modelo trabaja de la siguiente manera:

- a) Se leen las características generales de cada nodo y componente, así como las condiciones iniciales del sistema;
- b) para un tiempo T , se calculan los gastos de transferencia de cada nodo de acuerdo con las políticas de operación y el estado general del sistema en el tiempo $T-1$, esto significa que el intercambio de gasto entre los componentes se calcula en forma explícita;
- c) para el intervalo de tiempo ΔT correspondiente se hace el tránsito de avenidas de cada componente, tomando en cuenta los ingresos y egresos calculados en el paso b y los hidrogramas propios de cada elemento. El tránsito de avenidas se efectúa de manera implícita (el método utilizado se describe más adelante);
- d) se calculan las condiciones iniciales para el siguiente intervalo de tiempo

y se regresa al paso b .

Los tipos de nodos y de componentes que se incluyen en el modelo de simulación son los siguientes:

a) Nodos

- tipo 1. Representan plantas de bombeo que descargan a un componente del sistema (río Churubusco o gran canal de desagüe, por ejemplo) de acuerdo con el volumen de agua en la planta de bombeo.
- tipo 2. Estos nodos son similares al tipo 1, sólo que el gasto de transferencia se calcula en función del volumen del agua en la planta de bombeo y del tirante en uno o varios tramos del componente que recibe (es el caso de la planta de bombeo # 2 del gran canal de desagüe).
- tipo 3. Simulan la descarga final de un componente a otro (del interceptor del poniente al Vaso del Cristo o del río de los Remedios al gran canal de desagüe, por ejemplo).
- tipo 4. Estos nodos representan la transferencia de gasto de un componente tipo 3 (Vaso del Cristo, planta de bombeo Aculco) a otros componentes del sistema (emisor del poniente y río de los Remedios en el primer caso y río Churubusco y colector Churubusco en el segundo).
- tipo 5. Simulan la descarga parcial de un componente hacia otro, de acuerdo con el tirante del componente que aporta (como son las

transferencias del interceptor del poniente al interceptor centro-poniente o del gran canal de desague al interceptor oriente).

- tipo 6. Es un nodo similar al anterior, pero en este caso el gasto derivado es función de los niveles en ambos componentes, del que recibe y del que descarga.

b) Componentes

- tipo 1. Representan conductos cerrados de sección circular (río Churubusco, río Consulado, interceptor del poniente, interceptor oriente, etc.)
- tipo 2. Estos componentes simulan conductos abiertos de sección irregular (es el caso del río de los Remedios y del gran canal de desague).
- tipo 3. Simulan vasos y tanques de regulación (Vaso del Cristo, planta de bombeo Aculco).

4.2 Modelación de los elementos del sistema.

Nodos:

- tipo 1. La planta de bombeo recibe un hidrograma de una subcuenca del sistema, se contabiliza este ingreso y se hace un cálculo del volumen del agua en la planta con base en la ecuación de continuidad. Conocido el volumen y de acuerdo con la política de transferencia se obtiene el gasto de ingreso al tramo y componente respectivo.

- tipo 2. El procedimiento es similar al anterior, con la diferencia que al calcular el gasto de transferencia se considera el volumen de agua en la planta de bombeo y el tirante en el tramo del componente que recibe.
- tipo 3. En este caso solamente se asigna el gasto de descarga de un componente como gasto de ingreso a otro.
- tipo 4. De acuerdo con el volumen del agua en el componente tipo 3, en el instante $T-1$, se calcula el gasto de transferencia. Este gasto se contabiliza como un egreso del componente tipo 3 y se divide en dos partes, de acuerdo con las políticas de operación, para asignarlos como gastos de ingreso a los componentes correspondientes.
- tipo 5. Con el tirante del tramo del componente que aporta, en el tiempo $T-1$, y dada una relación tirante-gasto de transferencia, se asigna este gasto como un ingreso al componente que recibe y como un egreso al que aporta.
- tipo 6. El intercambio de agua se puede calcular conociendo los tirantes de los dos componentes (el que recibe y el que aporta) y con base en una política de operación. El gasto de transferencia se contabiliza como ingreso en un componente y como egreso en el otro.

Componentes :

- tipo 1 y tipo 2. El tránsito de avenidas en estos dos tipos de componentes se realiza de la misma manera, a excepción del cálculo de las características geométricas. Para cada tipo de componente se tiene una subrutina especial de cálculo de estas características, una para secciones circulares y otra para secciones irregulares.

Para efectuar el tránsito de avenidas se utilizó el "método de las diferencias finitas implícito" (ref. 6). Aunque más complejo que otros métodos, como el de Muskingum-Cunge (ref. 7), presenta varias ventajas, como son mayor detalle en la solución, trabajar con base en tirantes y velocidades (lo que facilita el cálculo de los intercambios de gasto), estabilidad del método a pesar de utilizar intervalos de tiempo grandes, permitir la inclusión de hidrogramas laterales y la división de cada componente en tramos.

El método se desarrolla a partir de las ecuaciones de cantidad de movimiento (I) y de continuidad (II).

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g(S_o - S_f) + \frac{q}{A} v_q \quad (I)$$

donde:

- V velocidad en el sentido principal del flujo, en m/seg
- t tiempo, en seg
- x coordenada en el sentido principal del flujo
- g aceleración de la gravedad, en m/seg²
- y tirante, en m
- S_o pendiente de la plantilla del componente, adimensional
- S_f gradiente hidráulico, adimensional
- V_q velocidad del gasto lateral, q, en la dirección x, en m/seg
- q gasto lateral por unidad de longitud, en m³/seg/m
- A área de la sección transversal del componente, en m²

$$B \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (II)$$

donde:

- B ancho de la superficie libre, en m

Para la aplicación de estas ecuaciones se consideran dos volúmenes de control, uno centrado en la velocidad, para la ecuación de cantidad de movimiento y otro centrado en el tirante, para la ecuación de continuidad tal como se muestra en la figura 4.1

Expresando estas ecuaciones en diferencias finitas y de acuerdo con los volúmenes de control:

$$\frac{v_j^{k+1} - v_j^k}{\Delta t} + v_j^{k+1} \frac{v_{j+1}^k - v_{j-1}^k}{2\Delta x} + g\psi \frac{H_j^{k+1} - H_{j+1}^{k+1}}{\Delta x} + g(1-\psi) \frac{H_j^k - H_{j+1}^k}{\Delta x} + g \frac{n^2 v_j^{k+1} |v_j^k|}{\left(\frac{R_{H,j+1/2}^k}{\psi}\right)^{4/3}} = 0 \quad (III)$$

$$\frac{B_j^k}{B_j} \frac{H_j^{k+1} - H_j^k}{\Delta t} + \frac{v_{j+1}^{k+1} A_{j+1/2}^k - v_{j-1}^{k+1} A_{j-1/2}^k}{\Delta x} = q_j^k \quad (IV)$$

donde:

- H elevación de la superficie libre del agua respecto al plano de comparación, en m
- ψ factor de peso del esquema de diferencias finitas (se recomienda utilizar $\psi=0.6$)
- n coeficiente de rugosidad de Manning
- r_h radio hidráulico de la sección transversal del componente.

El índice j y el superíndice k se refieren al número del tramo y al intervalo de tiempo, respectivamente. En la figura 4.2 puede verse la aplicación de los volúmenes de control a lo largo de un componente.

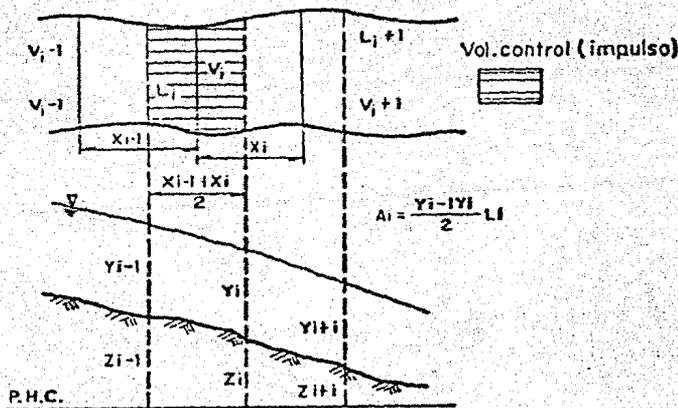
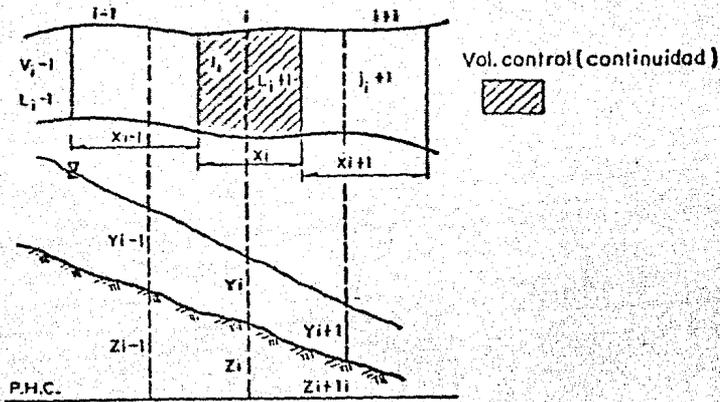


Figura 4.1

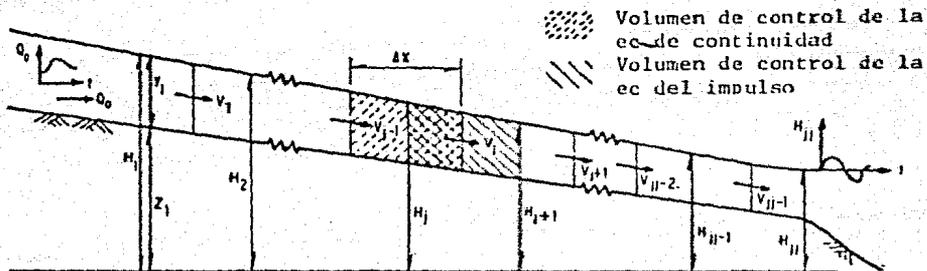


Figura 4.2

Ordenando las ecuaciones III y IV tenemos:

$$v_j^{k+1} = \frac{g \theta \psi (H_j^{k+1} - H_{j+1}^{k+1})}{1 + F_j + C_j} + M_j \quad (V)$$

$$-R_{j-1} v_{j-1}^{k+1} + H_j^{k+1} + R_j v_j^{k+1} = D_j \quad (VI)$$

donde:

$$\theta = \Delta t / \Delta x$$

$$F_j = g n_j^2 \Delta t |v_j^k| / \left(R_{H_j}^k + 1/2 \right)^{1/3}$$

$$C_j = \theta (v_{j+1}^k - v_{j-1}^k) / 2$$

$$M_j = \frac{v_j^k + g \theta (1 - \psi) (H_j^k - H_{j+1}^k)}{1 + F_j + C_j}$$

$$R_j = \theta A_{j+1/2}^k / \bar{B}_j^k$$

$$D_j = H_j^k + \Delta t q_j^k / \bar{B}_j^k$$

Sustituyendo la ecuación V en la VI obtenemos:

$$-\psi G_{j-1} H_{j-1}^{k+1} + (1 + \psi G_{j-1} + \psi G_j) H_j^{k+1} - \psi G_j H_{j+1}^{k+1} = D_j + N_{j-1} - N_j \quad (VII)$$

donde:

$$G_j = \theta g T_j$$

$$T_j = \frac{R_j}{1 + F_j + C_j}$$

$$N_j = M_j R_j$$

con lo que eliminamos el término v_j^{k+1}

Ahora, para cada tramo del componente podemos plantear una ecuación del tipo VII, con lo que tendríamos un sistema de $n-1$ ecuaciones, donde n es el número de tramos, en función de H_i^{k+1} .

Considerando condiciones de frontera podemos modificar la primera y la última ecuación como sigue:

- a) Frontera aguas arriba. En este tramo H_{i-1} es igual a cero, además se tiene un hidrograma de punta con lo que la ecuación VII quedaría:

$$(1 + \psi G_1)H_1^{k+1} - \psi G_1 H_2^{k+1} = D_1 - N_1 + \theta Q_0^{k+1}/B_1^k$$

- b) Frontera aguas abajo. En el último tramo podemos considerar como condición de frontera un tirante constante, con lo que la ecuación VII sería:

$$-\psi G_{jj-2} H_{jj-2}^{k+1} + 1 + \psi G_{jj-2} + \psi G_{jj-1} H_{jj-1}^{k+1} = D_{jj-1} + N_{jj-2} - N_{jj-1} + \psi G_{jj-1} H_{jj}^{k+1}$$

El sistema de ecuaciones quedaría, expresado en forma matricial, tal como se muestra en la figura 4.3, cuya solución se facilita debido a que la matriz de coeficientes es tridiagonal y simétrica.

Resolviendo el sistema de ecuaciones obtenemos la elevación H_i de cada tramo del componente para el instante $k+1$. Sustituyendo estos valores en la ecuación V podemos calcular la velocidad V_i de cada tramo para el instante $k+1$. Estas elevaciones y velocidades serán las iniciales para el próximo intervalo de tiempo y definen el estado del sistema, en términos del cual se calculan las transferencias de gastos en los nodos.

-tipo 3. El tránsito de avenidas en estos componentes se realiza con base en la ecuación de continuidad y en una relación volumen-gasto de salida.

$$V = (Q_i - Q_s) \Delta t \quad (\text{VIII})$$

$$V = f(Q_s) \quad (\text{IX})$$

donde:

V volumen almacenado en el componente, en m^3

Q_i gasto de ingreso al componente, en m^3/seg

Q_s gasto de salida del componente, en m^3/seg

La ecuación de continuidad puede expresarse como:

$$V^{k+1} - V^k = \frac{1}{2} \Delta t (Q_i^{k+1} + Q_i^k - Q_s^k) - \frac{1}{2} \Delta t Q_s^{k+1} \quad (\text{X})$$

que junto con la ecuación IX forma un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, V^{k+1} y Q_s^{k+1} , cuya solución da las condiciones del componente en el instante $k+1$.

Cabe hacer notar que el gasto de ingreso Q_i incluye al hidrograma propio del componente y a las entradas y salidas de gastos de transferencia, calculados anteriormente en los nodos.

La figura 4.4 muestra el diagrama de flujo del modelo de simulación.

4.3 Calibración del modelo de simulación.

Una vez elaborado el modelo de simulación se procedió a efectuar varias "corridas de calibración" del programa con el objeto de verificar la simulación de cada nodo y componente y en caso de ser necesario, modificar el modelo. Estas pruebas de calibración se hicieron utilizando datos de algunos elementos del sistema principal de drenaje.

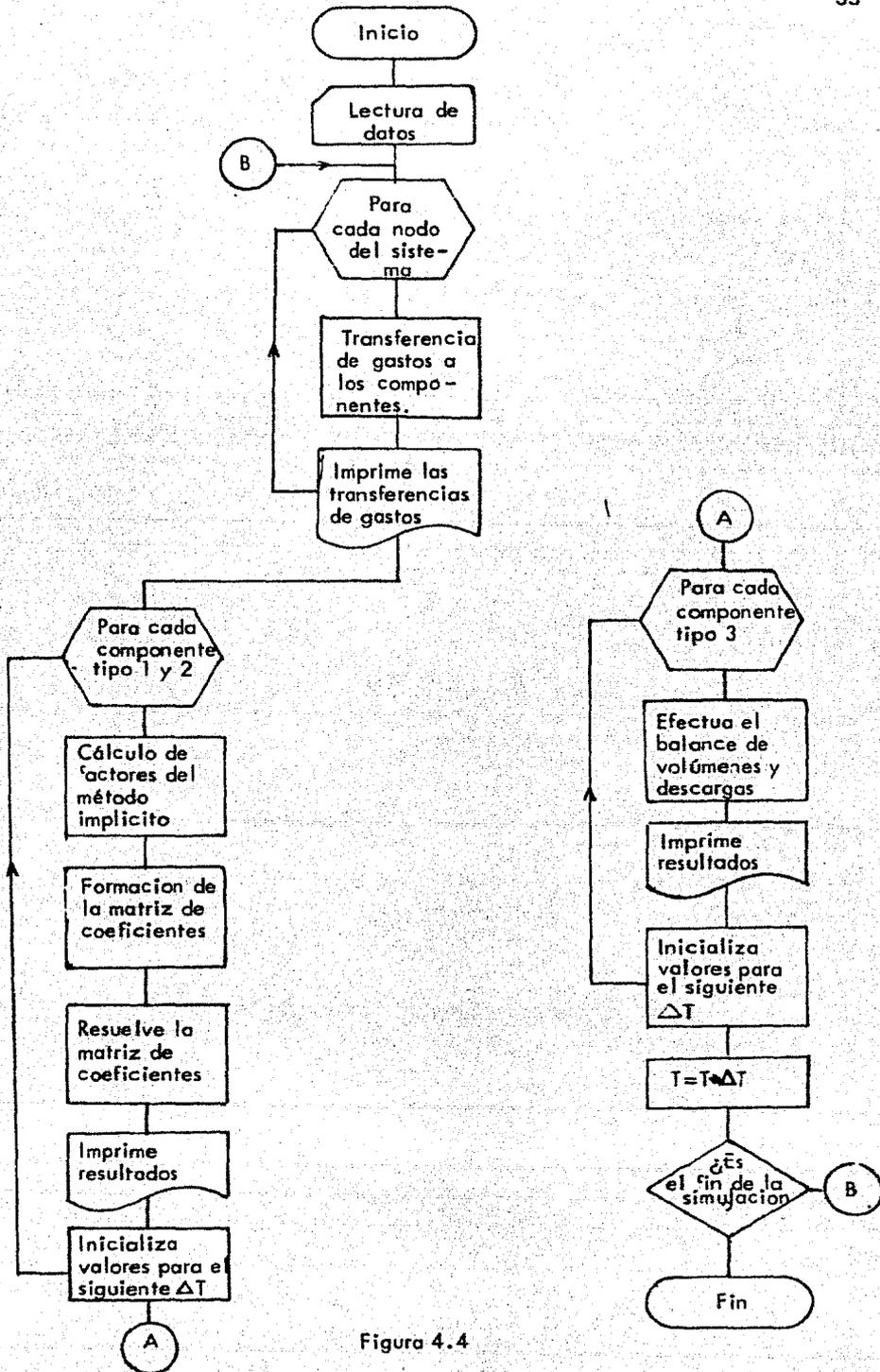


Figura 4.4

En total se hicieron cuatro pruebas de calibración.

1. Un componente tipo 1 (conducto circular) con un hidrograma de punta y cinco hidrogramas laterales. Los resultados de esta corrida se compararon con los obtenidos con un programa para tránsito de avenidas en redes de colectores (TRAVEN; ref. 8), siendo la simulación bastante satisfactoria.
2. Un componente tipo 1 con hidrograma de punta y cuatro nodos tipo 1 (plantas de bombeo). Se presentaron inestabilidades en las plantas de dimensiones pequeñas al utilizar intervalos de tiempo grandes.
3. Dos componentes tipo 1 (uno con un hidrograma de punta y cinco hidrogramas laterales), un nodo tipo 3 (descarga final de un componente a otro) y un nodo tipo 5 (derivación parcial de un componente a otro, de acuerdo con el tirante del tramo del componente que aporta). Los resultados en ambos nodos fueron satisfactorios, sin embargo, cabe hacer notar que en los nodos tipo 5 una política alejada de la realidad puede causar fuertes fluctuaciones en los tramos de los componentes.
4. Dos componentes tipo 1 (uno con hidrograma de punta y cinco hidrogramas laterales), un componente tipo 2 (conducto abierto de sección irregular) y un componente tipo 3 (elemento de regulación). Estos cuatro componentes están relacionados por un nodo tipo 3 y un nodo tipo 4 (descarga de un componente tipo 3 a otros dos componentes). Tanto la simulación de los componentes tipo 2 y tipo 3, como la del nodo tipo 4 se realizó sin problemas.

En la figura 4.5 aparece un esquema de cada una de las corridas de calibración.

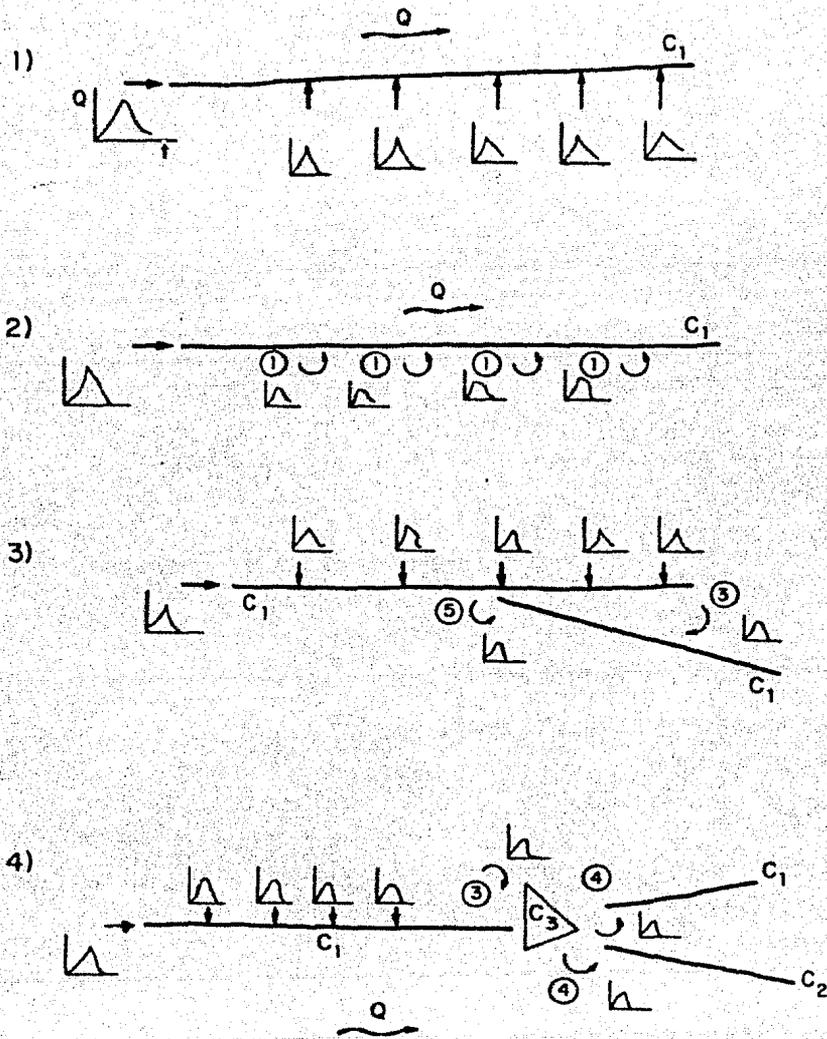


Figura 4.5

Cabe destacar algunas restricciones y modificaciones del modelo que se concluyeron de las corridas de calibración:

- la representación del sistema en su estado actual, no utiliza los nodos tipo 2 y tipo 6, es por esta razón que no se incluyeron en la calibración, sin embargo, esto no excluye su utilización posterior;
- las inestabilidades en los modos tipo 1 se pueden evitar utilizando intervalos de tiempo no muy grandes (60 seg, por ejemplo) o bien, cuando se trata de plantas de pequeñas dimensiones, sustituyendo el nodo por un hidrograma lateral (despreciando la regulación);
- la condición de frontera en los componentes tipo 1 y tipo 2 (tirante constante) provoca problemas cuando existe una gran diferencia entre la carga de presión en el penúltimo tramo y la condición de frontera, lo que ocasiona pendientes muy fuertes que pueden conducir a un cambio de régimen para lo que el método es poco preciso. Esto puede solucionarse cambiando la condición de frontera o evitando usar tirantes de frontera pequeños;
- el tirante está definido al centro del tramo, por lo que la condición de frontera en tramos muy largos no es muy exacta;
- algunas políticas de operación son difíciles de simular por el componente humano que interviene en su aplicación, sin embargo debe procurarse representarl^as lo más apegado a la realidad para evitar inconsistencias durante la simulación.

5. MANUAL DEL PROGRAMA

En este capítulo se describe la manera de utilizar el programa del modelo de simulación del sistema principal de drenaje del Distrito Federal.

Se da un instructivo para la lectura de datos, definiendo cada variable de entrada y el formato que se debe utilizar. También se comenta la impresión de datos y resultados del programa.

Las bases teóricas del programa están descritas en el capítulo anterior "Descripción teórica del modelo de simulación".

5. MANUAL DEL PROGRAMA

5.1 LECTURA DE DATOS

Primer grupo de tarjetas. Datos generales

a) Primera tarjeta

TIT

TIT Título de la simulación

FORMATO 20A4

b) Segunda tarjeta

DELTP, NINTS, NIMP

DELTP Intervalo de tiempo utilizado para la simulación, en seg

NINTS Número de intervalos de tiempo por simular

NIMP Frecuencia de impresión de resultados

FORMATO F8.0, 2I4

Segundo grupo de tarjetas. Datos de los nodos del sistema

a) Primera tarjeta

NODOS 1, NODOS 2, NODOS 3, NODOS 4, NODOS 5, NODOS 6

NODOS 1 Número de nodos tipo 1. Este tipo de nodos representan cajas de bombeo que reciben un hidrograma y a su vez descargan otro en un componente del sistema de acuerdo con el volumen del agua en la caja.

- NODOS 2 Número de nodos tipo 2. Son similares a los nodos tipo 1 solo que descargan al sistema de acuerdo al nivel del agua en la caja y a las condiciones generales del sistema. Este tipo de nodos aún no está considerado en el programa
- NODOS 3 Número de nodos tipo 3. Representan la descarga total final de un componente hacia otro
- NODOS 4 Número de nodos tipo 4. Estos nodos simulan la transferencia de agua de un elemento regulador del sistema (carcamo, vaso, etc) a dos o más componentes del sistema de acuerdo al nivel del agua en el elemento regulador.
- NODOS 5 Número de nodos tipo 5. Simulan la descarga parcial de un componente hacia otro en función del tirante del componente que descarga.
- NODOS 6 Número de nodos tipo 6. Representan la transferencia de agua de un componente a otro de acuerdo a los tirantes de ambos componentes. Estos nodos aún no están incluidos en el programa.

FORMATO 1615

A continuación se leen los datos de cada uno de los

nodos. El primer grupo es para los nodos tipo 1, se leen las siguientes tarjetas para cada nodo tipo 1.

b.1) Segunda tarjeta:

KJ, IRR(J), NTR(J), NPH(J), NPQE(J)

KJ Indicador del número de nodo que se esta leyendo. Se utiliza solo para llevar un control de las tarjetas

IRR(J) Número del componente que recibe el gasto de transferencia del nodo (J)

NTR(J) Número del tramo del componente IRR(J) que recibe el gasto de transferencia del nodo (J)

NPH(J) Número de puntos del hidrograma que ingresa al nodo (J)

NPQE(J) Número de puntos de la política de transferencia de gastos del nodo (J). Esta dada como una curva Volumen (de la caja) - Gasto de transferencia .

FORMATO 16I5

b.2) Tercera tarjeta

AJ, (TH(J,N), QH(J,N), N = 1, NPH(J))

AJ Indicador del número de nodo que se esta leyendo. Es semejante a KJ

TH(J,N) Enésimo tiempo del hidrograma de ingreso al nodo (J)

QH(J,N) Enésimo gasto del hidrograma de ingreso al nodo (J). TH(J,N) y QH(J,N) se van leyendo como parejas desde el primer punto del hidrograma hasta el último (NPH(J))

FORMATO 10F8.0

b.3) Cuarta tarjeta:

AJ, (VOL(J,N), Q(J,N), N = 1, NPQE(J))

VOL(J,N) Enésimo volumen de la curva volumen - Gasto del nodo (J)

Q(J,N) Enésimo gasto de transferencia de la curva volumen - Gasto del nodo (J). Se lee de manera similar al hidrograma; por parejas desde el primer punto hasta NPQE(J)

FORMATO 10F8.0

b.4) Quinta tarjeta:

AJ, VOLINN(J), QSALN(J)

VOLINN(J) Volumen inicial en la caja de bombeo correspondiente al nodo (J)

QSALN (J) Gasto de transferencia inicial del nodo (J)

FORMATO 10F8.0

La siguiente tarjeta se lee para cada uno de los nodos tipo 3. Los nodos tipo 2 no se incluyen aún en el programa.

c) Sexta tarjeta:

KJ, IRR(J), NTR(J), IRA(J), NTA(J).

IRA(J) Número del componente que aporta el gasto de transferencia del nodo (J)

NTA(J) Número del tramo del componente que aporta el gasto de transferencia del nodo (J)

FORMATO 16I5

La siguiente tarjeta se lee para cada uno de los nodos tipo 4.

d) Séptima tarjeta:

KJ, IRC3N4(KKJ4), IRI(KKJ4), NT1(KKJ4), IR2(KKJ4), NT2(KKJ4), NPP1(KKJ4), NPP2(KKJ4)

IRC3N4 (KKJ4) Número del componente tipo 3 que aporta el gasto de transferencia asociado al nodo tipo 4 (KKJ4)

IRI(KKJ4) Número del componente que recibe parte del gasto de transferencia del nodo tipo 4 (KKJ4)

NT1(KKJ4) Número del tramo del componente IRI(KKJ4) que recibe el gasto del nodo tipo 4 (KKJ4)

IR2(KKJ4) Número del componente que recibe la otra parte del gasto de transferencia del nodo (KKJ4)

NT2(KKJ4) Número del tramo del componente IR2(KKJ4) que recibe parte del gasto de transferencia del nodo (KKJ4)

NPP1 Número de puntos de la política de transferencia de
(KKJ4) gastos del nodo (KKJ4) hacia el componente IRL(KKJ4)
Esta dada como una curva Volumen - Gasto.

NPP2 Número de puntos de la política de transferencia de
(KKJ4) gastos del nodo (KKJ4) hacia el componente IR2(KKJ4)

FORMATO 16I5

Las tarjetas siguientes se leen para cada uno de los
nodos tipo 4.

e.1) Octava tarjeta

AJ, (EL1(KKJ4,N), Q1(KKJ4,N), N = 1,NPP1 (KKJ4))

EL1 Enésima elevación de la política de transferencia
(KKJ4,N) del nodo tipo 4 (KKJ4) asociado al componente
IRI (KKJ4)

Q1(KKJ4,N) Enésimo gasto de la política de transferencia del no
do (KKJ4), asociada al componente IRL(KKJ4). Esta po
lítica se lee por parejas Elev-Gasto, desde el primer
punto de la política hasta el último,NPP1(KKJ4).

FORMATO 10F8.0

e.2) Novena tarjeta

AJ, (EL2(KKJ4,N), Q2(KKJ4,N),N= 1,NPP2(KKJ4))

EL2 Similar a EL1(KKJ4,N) solo que asociado al componen-
(KKJ4,N) te IR2 (KKJ4)

Q2

(KKJ4,N) Similar a Q1(KKJ4,N), pero asociado al componente IR2 (KKJ4). Se lee de manera similar a la política anterior

FORMATO 10F8.0

Las siguientes tarjetas se leen para cada nodo tipo 5

f.1) Décima tarjeta

KJ, IRR(J), NTR(J), IRA(J), NTA(J), NPP(KKJ5)

NPP(KKJ5) Número de puntos de la política de transferencia de gastos del nodo tipo 5 (KKJ5). Esta dada como una curva tirante (del componente que aporta)-Gasto

FORMATO 1615

f.2) Decimoprimer tarjeta:

AJ, (TIR(KKJ5,K), QT(KKJ5,K), K=1, NPP(KKJ5)

TIR (KKJ5,K) K-ésimo tirante de la política de transferencia del nodo tipo 5 (KKJ5)

QT (KKJ5,K) K-ésimo gasto de la política de transferencia, del nodo tipo 5 (KKJ5). La política se lee por pareja de datos, desde el primer punto de la curva hasta el último (NPP(KKJ5)).

FORMATO 10F8.0

Tercer grupo de tarjetas. Datos de los componentes del sistema.

- a) Primera tarjeta
NUCOM 1, NUCOM2, NUCOM3, NQLAT
- NUCOM1 Número de componentes del tipo 1. Son conductos cerrados de sección circular,
- NUCOM2 Número de componentes del tipo 2. Son conductos abiertos
- NUCOM 3 Número de componentes del tipo 3. Son elementos de regulación
- NQLAT Número total de hidrogramas laterales del sistema.

FORMATO 1615

Las siguientes tarjetas se leen para cada uno de los hidrogramas laterales.

- b.1) Segunda tarjeta
KNG, NPHL (NG)
- KNG Indicador del índice del hidrograma lateral que se esta leyendo
- NPHL (NG) Número de puntos del hidrograma lateral (NG)

FORMATO 1615

- b.2) Tercera tarjeta
ANG, (THL (NG,N), QHL (NG, N), N=1, NPHL(NG))
- ANG Indicador del índice del hidrograma lateral que se esta leyendo

THL(NG,N) Enésimo tiempo del hidrograma lateral (NG)

QHL(NG,N) Enésimo gasto del hidrograma lateral (NG). El hidrograma se lee por pareja de datos THL, QHL, desde el primer punto hasta NPHL (NG)

FORMATO 10F8.0

El siguiente grupo de tarjetas son para alimentar los datos de los componentes tipo 1. El grupo de tarjetas se debe leer para cada uno de los componentes tipo 1.

c.1) Cuarta tarjeta

(TICOM (I,NN), NN=1,20)

TICOM Nombre del componente (I)
(I,NN)

FORMATO 20A4

c.2) Quinta tarjeta

KI, NTOTRM(I), NPHP(I)

KI Indicador del número de componente que se esta leyendo

NTOTRM(I) Número total de tramos del componente (I)

NPHP(I) Número de puntos del hidrograma de punta del componente I

FORMATO 16I5

Las 2 tarjetas siguientes alimentan los datos de cada uno de los tramos del componente (I)

c.3.1) Sexta tarjeta

KI, KN, DXM (I,N), SMUDA, NMAN(I,N), DIAM(I,N),
IQLAT (I,N)

KN Indicador del número de tramo que se lee

DXM(I,N) Longitud del tramo (N) del componente (I)

SMUDA Pendiente del tramo

NMAN(I,N) Coeficiente de rugosidad de Manning del tramo N del
componente (I)

DIAM(I,N) Diametro de la sección del tramo (N)

IQLAT Indicador del número del hidrograma lateral (si lo
(I,N) hay) que ingresa al tramo (N) del componente (I)

FORMATO 2I4, 4 F8.0, 2I4

c.3.2) Séptima tarjeta

XKI, ZFM(I,N), ZFIM(I,N), VELINM(I,N), TIRINM(I,N)

XKI Indicador del número de componente que se esta
leyendo

ZFM(I,N) Cota al centro del tramo (N) del componente (I)

ZFIM(I,N) Cota mínima del tramo (N) del componente (I)

VELINM Velocidad inicial aguas arriba del tramo (N) del
(I,N) componente (I)

TIRINM Tirante inicial al centro del tramo (N) del
(I,N) componente (I)

FORMATO 10F8.0

Una vez leídas las 2 tarjetas anteriores para cada tramo del componente (I), se lee la siguiente tarjeta.

c.4) Octava tarjeta

AI, (THP (I,N), QHP (I,N), N=1, NPHP (I))

AI Indicador del índice del componente que se esta leyendo

THP (I,N) Enésimo tiempo del hidrograma de punta del componente (I)

QHP Enésimo gasto del hidrograma de punta del componente (I,N) (I). El hidrograma se lee por parejas de datos THP, QHP, desde el primer punto hasta NPHP (I)

FORMATO 10F8.0

El siguiente grupo de tarjetas se debe leer para cada uno de los componentes tipo 2

d.1) Novena tarjeta

(TICOM (I,NN), NN=1,20)

FORMATO 20A4

d.2) Décima tarjeta

KI, NTOTRM (I), NPHP (I)

FORMATO 16I5

Para cada uno de los tramos del componente (I) deben leerse las 3 tarjetas siguientes

d.3.1) Décimo primera tarjeta

KI, KN, DXM(I,N), SMUDA, NMAN(I,N), IQLAT(I,N),
JOM(I,N)

JOM(I,N) Número de puntos que definen la sección transversal del tramo (N) del componente (I)

FORMATO 2I4, 3F8.0, 2I4

d.3.2) Décimo segunda tarjeta

XKI, ZFM(I,N), ZFLM(I,N), VELINM(I,N), TIRINM(I,N)

FORMATO 10F8.0

d.3.3) Décimo tercera tarjeta

XKI, (SXM(I,N,J), SYM(I,N,J), J=1, JOM(I,N))

SXM Abscisa j-ésima de la sección transversal del tramo (I,N,J) (N) del componente (J)

SYM Ordenada j-ésima de la sección transversal del tramo (I,N,J) (N) del componente (I). La sección transversal se lee por parejas de datos, desde el punto 1 hasta el punto JOM(I,N)

FORMATO 10F8.0

Al terminar de leer los datos de cada uno de los trao

mos del componente (I), se lee el hidrograma de punta de este componente (I)

d.4) Décimo cuarta tarjeta

AI, (THP (I,N), QHP (I,N), N=1, NPHP (I))

FORMATO 10F8.0

Las tarjetas siguientes se leen para cada uno de los componentes tipo 3

e.1) Décimo quinta tarjeta

KI, NPPVE (II3)

NPPV (II3) Número de puntos de la curva elevación - volumen del componente tipo 3 (II3)

FORMATO 1615

e.2) Décimo sexta tarjeta

AI, (ELC (II3,N), VOLC (II3,N), N=1, NPPVE (II3))

ELC (II3,N) Enésima elevación de la curva elevación- volumen del componente tipo 3 (II3)

VOLC (II3,N) Enésimo volumen de la curva elevación - volumen del componente tipo 3 (II3). La curva se lee por parejas de datos ELC - VOLC, desde el punto 1 hasta el punto NPPVE (II3)

FORMATO 10F8.0

e.3) Décimo séptima tarjeta

AI, ELIN (II3), VOLIN (II3)

EL IN Elevación inicial del componente tipo 3 (II3)
(II3)

VOL IN Volumen inicial del componente tipo 3 (II3)
(II3)

FORMATO 10F8.0

e.4) Décimo octava tarjeta

AI, (THP (I,N), QHP (I,N), N=1, NP HP (I))

FORMATO 10F8.0

5.2 IMPRESION

I. IMPRESION DE DATOS

Primera parte. Datos generales

- a) Imprime el título de la simulación
- b) Imprime el intervalo de tiempo utilizado para la simulación, los instantes por simular y la frecuencia con que se hace la impresión de resultados

Segunda parte. Datos de los nodos

a) Nodos tipo 1

Imprime la topología de cada uno de los nodos 1: el número del nodo, el componente y su tramo que recibe el gasto de transferencia, el volumen inicial de la caja de bombeo asociada al nodo y el gasto inicial de transferencia.

A continuación imprime para cada nodo el hidrograma de ingreso a cada caja de bombeo (tiempo, en hrs; gasto en m^3/seg) y política de transferencia del nodo dada como una curva volumen -gasto

b) Nodos tipo 3

Solo imprime la topología de cada nodo tipo 3: el número del nodo, el componente y su tramo que recibe el gasto de transferencia y el componente y su tramo que aporta ese gasto.

c) Nodos tipo 4

Como topología de cada nodo 4 se imprime: el número del nodo, el componente que aporta el gasto (tipo 3) y los compo nentes y sus tramos respectivos que reciben el gasto de

transferencia. Continúa con la impresión de las políticas de operación de cada nodo (2 políticas por cada nodo) dadas como una curva elevación (del componente tipo 3) - gasto de transferencia.

d) Nodos tipo 5

La topología de cada nodo incluye; número del nodo, componente y tramo que recibe, componente y tramo que aporta el gasto de transferencia. A continuación se imprime para cada nodo, su política de transferencia representada por una curva tirante (del tramo del componente que aporta, en m) contra gasto de transferencia.

Tercera parte. Datos de los componentes

a) Hidrogramas laterales

Imprime para cada hidrograma lateral, su número de identificación y el hidrograma propiamente dicho, tiempo (en hrs) - gasto (en m^3/seg).

b) Componentes tipo 1

Imprime el nombre y número del componente.

Enseguida se imprime en forma de tabla, para cada tramo del componente, el número del tramo, su longitud (en m), el número del hidrograma lateral que ingresa en ese tramo (si lo hay), el tirante inicial (en m), la velocidad inicial (en m/seg), el coeficiente de rugosidad de Manning, la cota de la plantilla al centro del tramo (en m) y el diámetro de la sección transversal (en m).

En caso de existir, imprime a continuación el hidrograma de punta del componente.

c) Componentes tipo 2

Imprime los mismos datos que para los componentes tipo 1 a excepción del diametro de la sección transversal de cada tramo. En vez del diametro se imprime el número de puntos que definen la sección transversal de cada tramo. También se presenta en una tabla aparte los puntos de la sección transversal de cada tramo, dados como parejas de abcisas y ordenadas.

d) Componentes tipo 3

En este tipo de componentes se imprimen, el número del componente, su elevación (en m) y volumen (en m^3) iniciales para cada componente, y en seguida su curva respectiva elevación - volumen

II IMPRESION DE RESULTADOS

El programa presenta de acuerdo con la frecuencia de impresión (cada n intervalos de tiempo, siendo n la frecuencia de impresión) los resultados siguientes.

Primera parte

Número del intervalo de tiempo que se esta simulando y el tiempo transcurrido correspondiente a ese intervalo (en, hrs).

Segunda parte. Gastos de transferencia

Se muestran para cada nodo las transferencias de gastos que se realizaron en el intervalo de tiempo $T - 1$, y sus características.

a) Nodos tipo 1

Se imprime para cada nodo, su número, el gasto de transfe

rencia (en m^3/seg), el componente y tramo que recibe, el volumen final en la caja de bombeo (en m^3) y el gasto que ingreso a la caja de bombeo en el tiempo $T - 1$.

b) Nodos tipo 3

Como resultados se imprimen el número del nodo, el gasto de transferencia, el componente y tramo que recibe el gasto y el componente y tramo que lo aportó.

c) Nodos tipo 4

La impresión de los resultados de cada nodo incluye ; el número del nodo, el gasto que aportó el componente tipo 3 y los componentes y tramos que reciben, con su correspondiente gasto de transferencia

d) Nodos tipo 5

Presentan para cada nodo, su número, gasto de transferencia, componente y tramo que recibe y componente y tramo que aporta.

Tercera parte. Tránsito de las avenidas en los componentes

a) Componentes tipo 1 y 2

Para cada componente tipo 1 y 2 se muestran como resultados el nombre y número del componente. Después se presenta una tabla con las siguientes características de cada tramo, en el tiempo T : el número del tramo, su tirante y cota del agua (en m , al centro del tramo) la velocidad (aguas arriba del tramo, en m/seg), el área de la sección transversal al centro del tramo, y el gasto de entrada al tramo (en m^3/seg).

b) Componentes tipo 3

Los resultados de los componentes tipo 3 que se muestran son: el número del componente, el gasto que entra y el gasto que sale del componente, así como su volumen al final del tiempo T.

6. EJEMPLO DE APLICACION

La finalidad de este capítulo es mostrar la aplicación del programa de cómputo para la simulación del sistema principal de drenaje. En la elaboración del ejemplo se utilizaron datos reales de elementos del sistema de manera que se simularan los tres tipos de componentes y los cuatro tipos de nodos que presenta el modelo actualmente.

6.1 Descripción del ejemplo

El ejemplo es un esquema simplificado de las zonas sur y poniente del sistema principal de drenaje del Distrito Federal. La figura 6.1 muestra un croquis del mismo.

Se consideran los siguientes elementos:

a) Nodos

- tipo 1. Se tienen cuatro nodos de este tipo, todos descargan al río

Churubusco en diferentes tramos.

- tipo 3. Hay solo un nodo tipo 3 que simula la descarga del interceptor del poniente al Vaso del Cristo.
- tipo 4. Son dos nodos y representan la descarga del Vaso del Cristo al emisor central y al río de los Remedios y la descarga de la planta de bombeo Aculco al colector Churubusco y al río Churubusco.
- tipo 5. Son tres nodos de este tipo que simulan la descarga de:
 - interceptor del poniente al río Churubusco
 - interceptor del poniente al interceptor centro-poniente
 - río Churubusco a la planta de bombeo Aculco

b) Componentes

- tipo 1. Son cinco componentes y representan los siguientes conductos:
 - (1)*Río Churubusco (con un hidrograma de punta)
 - (2) Interceptor del poniente (con hidrograma de punta y cinco hidrogramas laterales)
 - (3) Colector Churubusco
 - (4) Interceptor centro-poniente
 - (5) Emisor del poniente
- tipo 2. Sólo hay un componente de este tipo:
 - (6) Río de los Remedios

* Número de identificación del componente.

- tipo 3. Son dos y representan a los siguientes elementos de regulación:

- (7) Vaso del Cristo
- (8) Planta de bombeo Aculco.

En el anexo 6.1 se dan los datos generales de cada elemento.

La simulación se realizó con un intervalo de tiempo de 60 segundos, durante 8:20 horas (500 intervalos); la impresión de resultados se hizo cada 20 intervalos.

El ejemplo se corrió dos veces, la primera ocasión tal como se muestra en la figura 6.1 y la segunda eliminando el interceptor centro-poniente.

6.2 Resultados

Primera corrida

En la figura 6.2 se tiene la variación de los niveles en el Vaso del Cristo y en la planta de bombeo Aculco con respecto al tiempo. Se pudo observar el cambio de niveles casi nulo en el Vaso del Cristo en comparación al de la planta de bombeo Aculco. Esto se debe a la diferencia en las capacidades de almacenamiento.

Los hidrogramas de punta del interceptor centro-poniente y del colector Churubusco, que son las derivaciones parciales del interceptor del poniente y de la planta de bombeo Aculco respectivamente, se muestran en la figura 6.3. La máxima derivación del interceptor del poniente al centro poniente fue de $8.6 \text{ m}^3/\text{seg}$.

El hidrograma de entrada al tramo 3 del río Churubusco, proveniente de un nodo tipo 1, así como el hidrograma de ingreso a dicho nodo se presentan en la fi-

gura 6.4 . El cambio de volumen de este nodo con respecto al tiempo se encuentra en la figura 6.5.

La figura 6.6 es una gráfica de los hidrogramas en los tramos 5, 6 y 10 del río Churubusco.

Segunda corrida

Esta corrida se efectuó eliminando el interceptor centro-poniente que servía de alivio al interceptor del poniente.

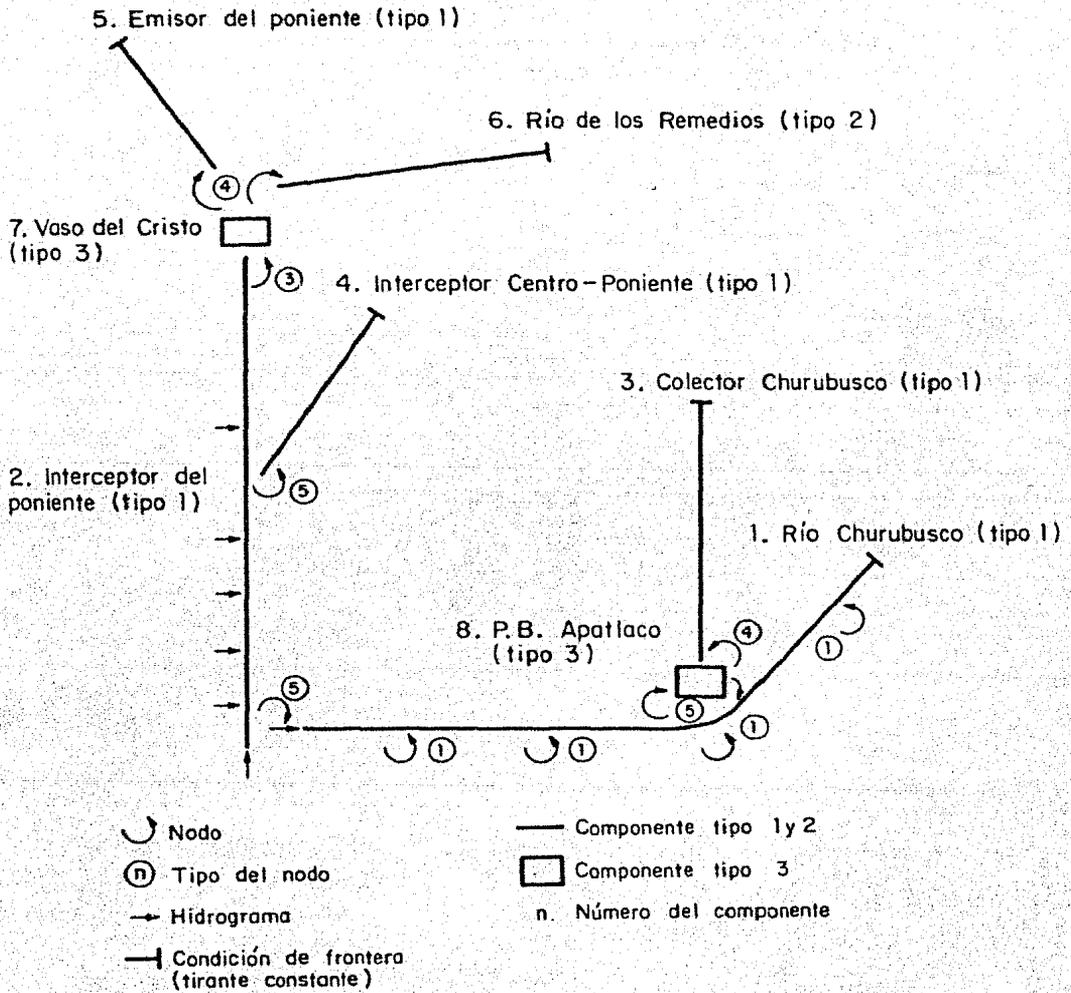
Para observar el efecto de este cambio, la figura 6.7 presenta una gráfica de los hidrogramas en los tramos 4 y 9 del interceptor del poniente durante la primera y segunda corrida. La diferencia en el pico del hidrograma del tramo 9 es de $5 \text{ m}^3/\text{seg}$. Notese que en el tramo 4 la diferencia no es notoria ya que la derivación hacia el interceptor centro-poniente se hace en el tramo 8.

Esa diferencia se ilustra mejor en la figura 6.8 donde se observa el perfil máximo del interceptor del poniente en cada corrida. La diferencia entre los tirantes máximos es de 1.40 m .

Conclusiones

1. Para plantas de bombeo pequeñas se recomienda sustituir el nodo tipo 1 correspondiente por un hidrograma lateral, ya que la regulación de gastos a través de estas plantas es casi nula(ver figura 6.4). Además estos nodos presentan inestabilidades al utilizar intervalos de tiempo relativamente grandes (mayores a 60 segundos).
2. Los componentes con variaciones bruscas de pendiente (río de los Remedios) presentan problemas ya que pueden ocasionar un cambio de regimen lo que es difícil de simular.

3. Las condiciones en el río Churubusco fueron críticas, llegando a tener 50 m de carga en algunos tramos de este componente. Si se considera que los datos utilizados se asemejan a la realidad, puede observarse la insuficiencia del río Churubusco durante fuertes tormentas.
4. Aunque el interceptor del poniente no llega a estar en una situación crítica, puede verse la ventaja del alivio del interceptor centro-poniente. Durante situaciones más severas esta derivación es esencial.
5. Las descargas del Vaso del Cristo hacia el río de los Remedios y hacia el emisor central fueron prácticamente constantes (4 m³/seg a cada componente) debido a la escasa variación del volumen del agua en este almacenamiento.
6. La planta de bombeo Aculco llegó a derivar gastos del orden de los 25 m³/seg, descargando la mayor parte (17 m³/seg) al colector Churubusco y el resto al río Churubusco.
7. El colector Churubusco no tuvo problemas durante la simulación, sin embargo cabe recordar que su capacidad está limitada por las condiciones del gran canal de desagüe, el cual no se incluyó en este ejemplo.



Ejemplo de aplicación

Figura 6.1

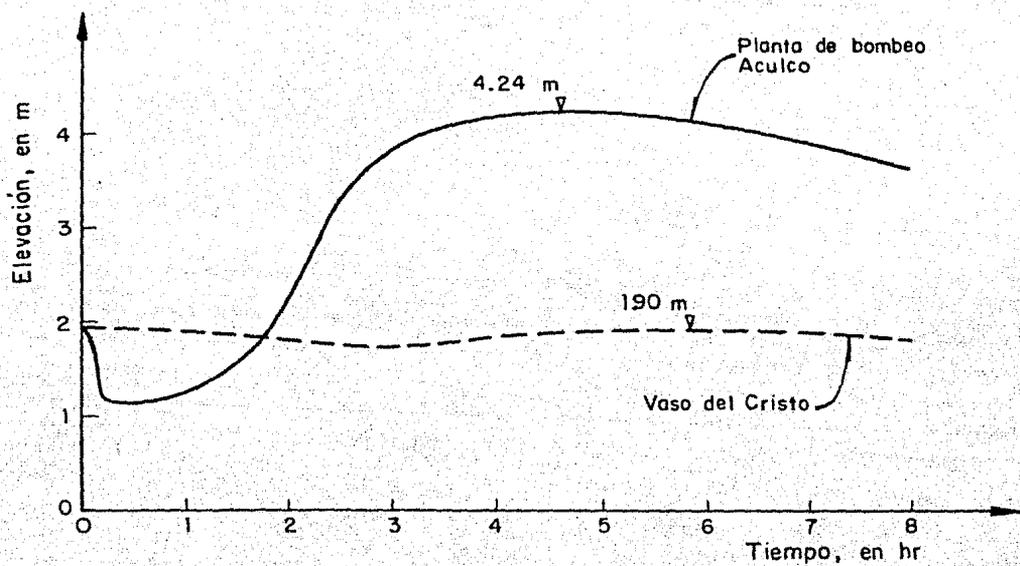


Figura 6.2

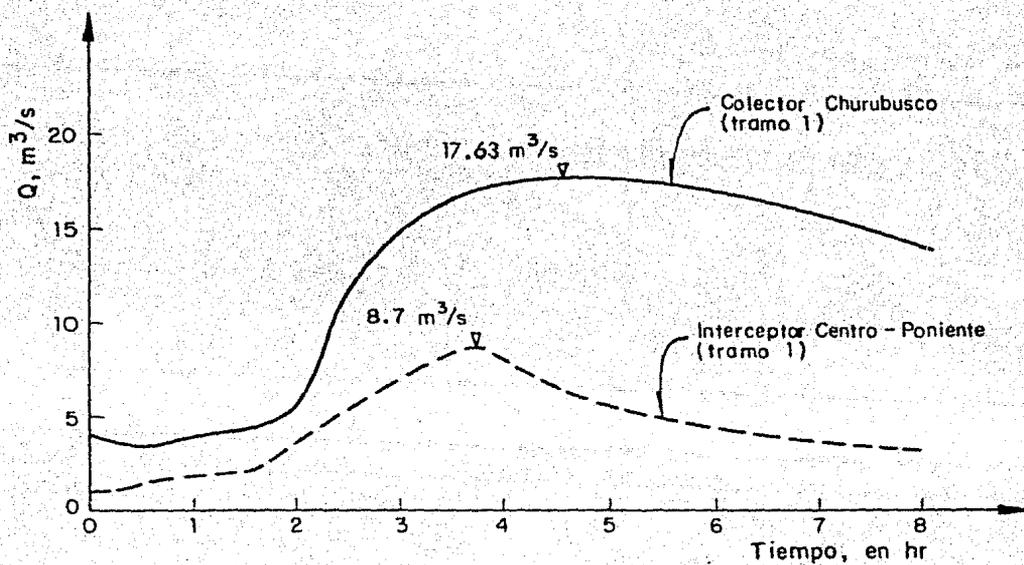


Figura 6.3

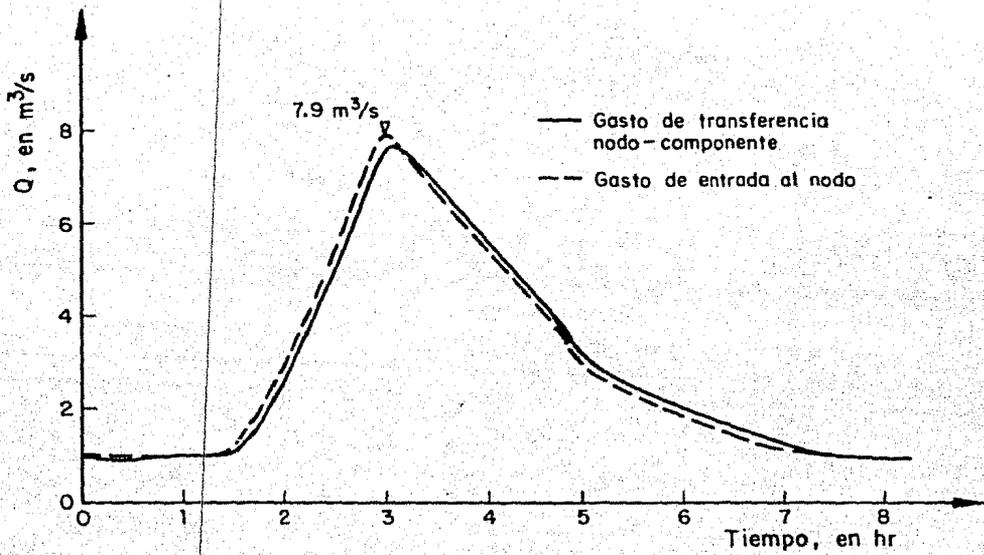


Figura 6.4

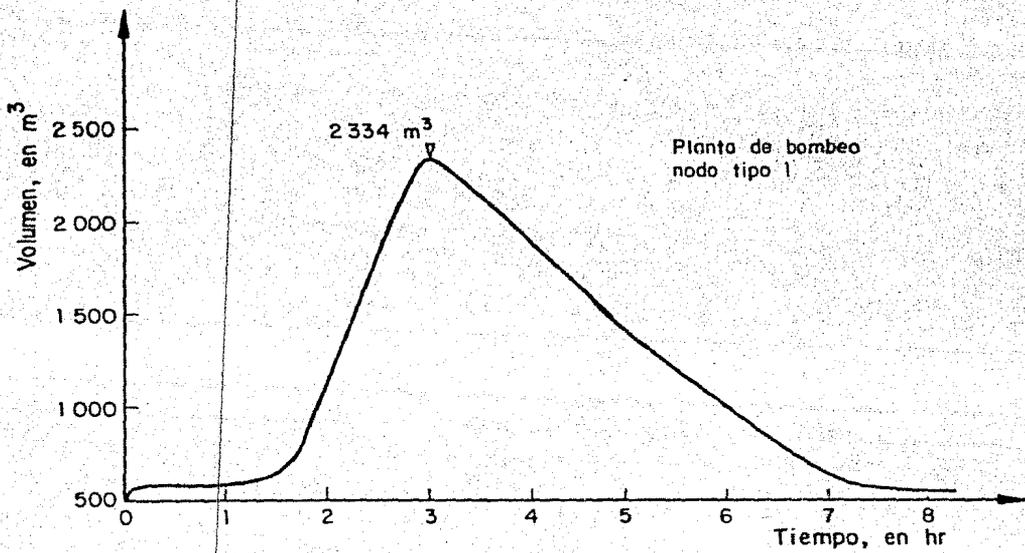


Figura 6.5

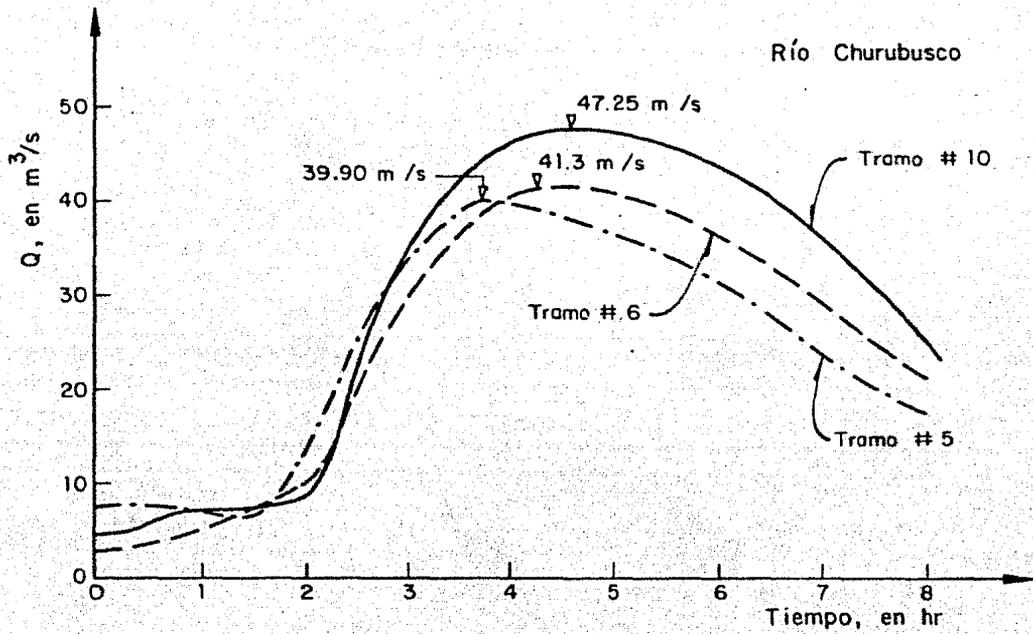


Figura 6.6

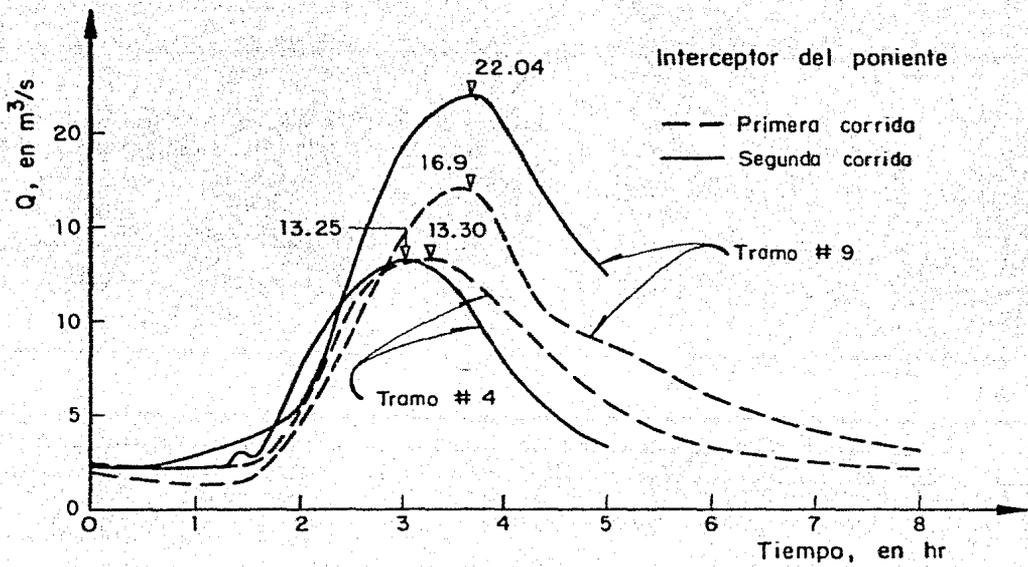


Figura 6.7

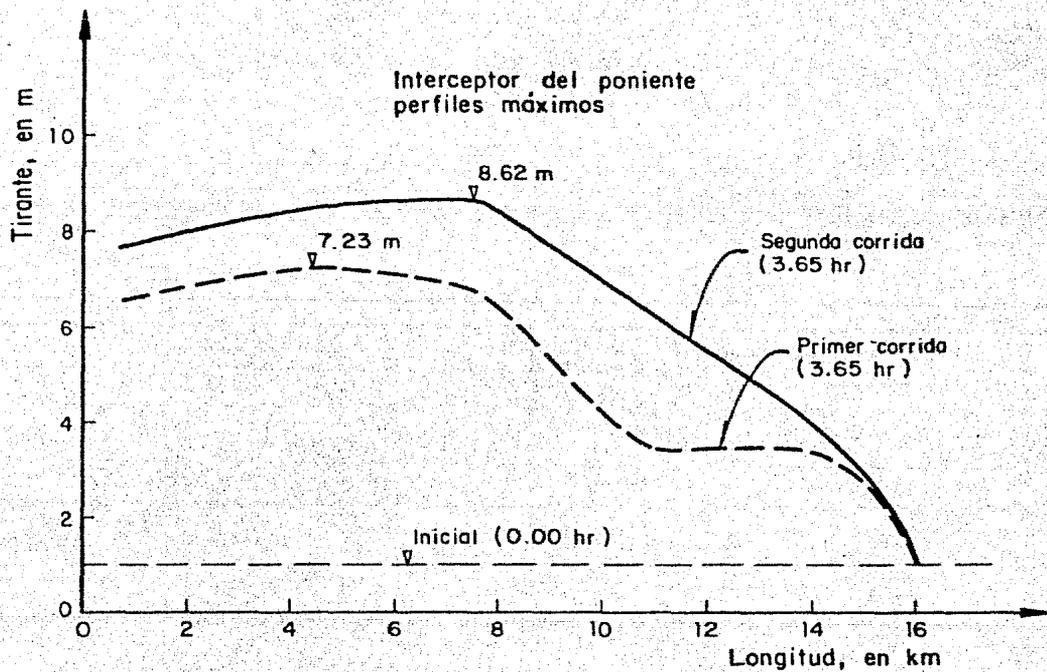


Figura 6.8



HOJA DE CALCULO
 PROYECTO: ANEXO 6.1
 DESCRIPCION: Simulación del sistema principal de drenaje
 REFERENCIA: Geometría de los componentes HOJA 1 DE 4

CLASIFICACION: FECHA:
 CALCULO:
 REVISO:
 APROBO:

TIPO 1

Componente: Rfo Churubusco

Tramo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Longitud(m)	1500	1420	830	1250	1500	1500	1600	1600	1500	1650	1100	1350
Pendiente(milésimas)	2.20	2.20	0.50	0.30	0.30	0.30	0.40	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Diámetro(m)	3.50	3.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	3.85	3.85
Cota al centro del tramo(m)*	43.00	39.19	38.02	37.63	37.21	36.76	36.27	35.78	35.55	35.31	35.13	34.95
IQLAT**												

Componente: Interceptor del puente

Tramo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Longitud(m)	1400	1200	1100	1400	1700	1400	2100	1150	1950	1600	1625	
Pendiente(milésimas)	0.29	0.29	0.50	0.50	0.50	0.50	0.29	0.87	0.62	0.23	0.46	
Diámetro(m)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	
Cota al centro del tramo(m)	63.00	62.62	62.17	61.55	60.71	60.00	59.95	59.76	58.65	57.86	57.23	
IQLAT	1	2	3			4		5				

Componente: Colector Churubusco

Tramo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Longitud(m)	930	930	480	1200	840							
Pendiente(milésimas)	1.80	1.00	-1.30	1.20	0.40							
Diámetro(m)	3.20	4.0	4.0	4.0	4.0							
Cota al centro del tramo(m)	33.50	32.20	32.05	31.64	30.75							
IQLAT												

* Todas las cotas estan medidas a partir de los 2200 m
 ** Número de identificación del hidrograma lateral



HOJA DE CALCULO

PROYECTO: ANEXO 6.1
DESCRIPCION: Simulación del sistema principal de drenaje
REFERENCIA: Datos componentes tipo 3

CLASIFICACION: FECHA:

CALCULO:

REVISO:

APROBO:

HOJA 3 DE 4

Componente: Vaso del Cristo

Curva elevación-volumen

elevación (m)	0.0	4.0
volumen (m ³)	0.0	1000.000

Componente: Planta de bombeo Apatlaco

Curva elevación-volumen

elevación (m)	0.0	4.0
volumen (m ³)	0.0	10000.0



HOJA DE CALCULO

CLASIFICACION:

FECHA:

PROYECTO:

ANEXO 6.1

CALCULO:

DESCRIPCION:

Simulación del sistema principal de drenaje

REVISO:

REFERENCIA:

Datos de los nodos

HOJA 4 DE 4

APROBO:

TIPO 1

Número	Componente que recibe	Tramo que recibe	Curva volumen(m ³)-gasto de transferencia(m ³ /seg)									
			V	Q	V	Q	V	Q	V	Q		
1	R. Churubusco	3	400.0	0.6	800.0	1.5	1200.0	2.6	1600.0	4.0	2400.0	8.0
2	R. Churubusco	5	400.0	0.4	800.0	1.1	1200.0	1.8	1600.0	2.8	2400.0	5.5
3	R. Churubusco	7	400.0	2.2	800.0	6.0	1200.0	11.6	1600.0	17.5	2400.0	35.0
4	R. Churubusco	10	400.0	0.6	800.0	1.5	1200.0	2.6	1600.0	4.0	2400.0	8.0

TIPO 3

Número	Componente que recibe	Tramo que recibe	Componente que aporta	Tramo que aporta
1	Vaso del Cristo	1	Int. del pte.	1

TIPO 4

Número	Comp. recibe	Tramo recibe	Componente aporta	Curvas elevación-gasto de transferencia							
				E	Q	E	Q	E	Q	E	Q
1	Em. pte. R. Remed.	1	Vaso del Cristo	0.0	0.0	2.3	5.0	3.1	10.0	4.0	20.0
				0.0	0.0	2.3	5.0	3.1	10.0	4.0	20.0
2	R. Chur. C. Chur.	7	P.B. Apatlaco	0.0	0.0	2.0	2.0	4.0	8.0	6.0	12.0
				0.0	0.0	2.0	4.0	4.0	16.0	6.0	30.0

TIPO 5

Número	Comp. recibe	Tramo recibe	Comp. aporta	Tramo aporta	Curvas tirante(m)-gasto de transf (m ³ /seg)							
					T	Q	T	Q	T	Q	T	Q
1	R. Chur.	1	Int. pte.	2	0.0	0.0	2.0	4.0	4.0	3.5	30.0	6.0
2	P.B. Apat	1	R. Chur.	7	0.0	0.0	2.5	2.5	4.5	20.0	30.0	35.0
3	l.ctro-pte	1	Int. pte.	8	0.0	0.0	2.0	5.0	4.0	10.0	30.0	15.0

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se logró desarrollar un modelo de simulación del sistema principal de drenaje que abarca todos los tipos de elementos que componen dicho sistema en su situación actual. Es, además, un modelo flexible que permite introducir modificaciones y adiciones sin cambiar la estructura básica del programa, lo que facilita la simulación de alternativas de desarrollo que pueden incluir nuevos tipos de elementos, de políticas de operación y de relaciones entre los componentes del sistema.

Sin embargo, la utilización de este modelo implica una disminución en la precisión de los resultados en comparación con los obtenidos con otros modelos (ref. 1). A cambio de esta pérdida de detalle en la solución se tiene una simulación del sistema en forma global que no se había alcanzado en otros trabajos. Es por esto que se recomienda complementar los estudios realizados para encontrar mejores soluciones.

Puede realizarse un diagnóstico global del sistema y de sus alternativas de desarrollo por medio del modelo presentado en este trabajo y de acuerdo con los resultados obtenidos estudiar en forma particular zonas o elementos que requieran un aná-

lisis más detallado utilizando modelos de simulación de colectores , como el que se describe en la referencia 1.

El modelo presenta, todavía, algunas desventajas que pueden eliminarse o disminuirse, por lo que se recomienda:

1. Cambiar la condición de frontera (tirante constante) de los componentes tipo 1 y tipo 2. Puede incluirse una subrutina que calcule para el último tramo de estos componentes el tirante crítico o normal (según las condiciones) y que lo convierta en condición inicial para el siguiente intervalo de tiempo.
2. Al definir el celdaje (división en tramos) de los componentes tipo 1 y tipo 2 procurar que el último tramo tenga una longitud pequeña para que el tirante de frontera, que se define al centro del tramo, se acerque más a la realidad.
3. Las plantas de bombeo, simuladas por los nodos tipo 1, que tengan una capacidad menor a 3000 m^3 pueden sustituirse por hidrogramas laterales ya que la regulación en ellas es casi nula. Esto permitiría incrementar el intervalo de tiempo Δt utilizado para la simulación, reduciendo así el tiempo de cómputo.
4. En los nodos tipo 1 podría hacerse, también, una segunda iteración para el cálculo del volumen del agua en la planta de bombeo. Esto daría una mayor estabilidad en la simulación de estas plantas y permitiría utilizar intervalos de tiempo mayores lo que reduciría el tiempo de cómputo.
5. Conforme al grado de desarrollo del sistema principal de drenaje, incluir otros tipos de nodos como podrían ser los del tipo 2 y los del tipo 6 definidos en el capítulo 4.

6. Recopilar información sobre las políticas de operación del sistema eliminando, en lo posible, el componente subjetivo que interviene en ellas. A partir de esta información podrían definirse otros tipos de nodos.
7. Calibrar el modelo de simulación comparando sus resultados con mediciones efectuadas en el sistema. Esta calibración sería tanto para el programa como para los datos que lo alimentan, por ejemplo el coeficiente de rugosidad de Manning. En el Instituto de Ingeniería se están realizando trabajos relativos a este punto (ref. 9).
8. Al realizar el celdaje de los componentes evitar, en lo posible, tramos con pendientes muy pronunciadas, así como cambios bruscos de pendiente y sección, ya que pueden provocar cambios de régimen para lo que el modelo es poco preciso y requiere intervalos de tiempo y longitudes de tramo pequeños para simularlos.
9. En general se desprecian los almacenamientos que se producen en las calles cuando se tienen inundaciones y encharcamientos. Sin embargo puede incluirse, sobre todo para el caso de las plantas de bombeo, una subrutina que contabilice estos almacenamientos.

BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

1. DDF, DGCOH, "El Sistema Hidráulico del Distrito Federal", Departamento del Distrito Federal, Mexico, 1982 .
2. Domínguez, R. y Lesser, B. , "Modelo de Simulación del Sistema Principal de Drenaje del Distrito Federal", Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe interno, Feb., 1982 .
3. DDF, "Estudio del Desague del Valle de México", Instituto de Ingeniería, UNAM, 1976 .
4. Bell, F., "The Aereal Reduction Factor in Rainfall Frecuences Estimation", Institute of Hydrology, Report # 35, Wallingford, England, 1976 .
5. DDF, DGCOH, "Plan Maestro de Drenaje de la Ciudad de México", realizado por DIRAC para el DDF, México, 1982 .
6. Berezowsky, M, "Esgurrimiento a Superficie Libre", Capítulo A.2.9, Manual de Obras Civiles, CFE, México, 1981 .
7. "Flood Studies Report", Natural Environment Research Council", London, 1981 .
8. Berezowsky, M, et al , "Métodos Numericos", Capítulo A.2.16, Manual de Obras Civiles, CFE, 1983 .
9. Domínguez, R. y Lesser, B., "Calibración del Modelo de Simulación del Sistema Principal de Drenaje del Distrito Federal", Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe interno, Oct., 1982 .

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Ramón Domínguez Mora, por su ayuda y sugerencias durante la dirección de esta tesis.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por las facilidades proporcionadas durante la ejecución de este trabajo.