

# Cálculo de Transitorios en redes (\*)

Por FRANCISCO LAGUNA PEÑUELAS  
y EDUARDO MARTINEZ MARIN

Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos,  
Cátedra de Hidráulica e Hidrología  
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
Universidad Politécnica de Madrid

*Se presenta una metodología original para el cálculo de redes, válida tanto para redes abiertas como cerradas, estudiándose el régimen transitorio y el permanente como equilibrio de un transitorio, lo cual permite una simulación completa de la explotación de una red y la optimización económica de su diseño.*

## I. INTRODUCCION

La metodología clásica de cálculo de redes, plantea la separación entre redes abiertas y cerradas, y por otra parte o bien se desprecian los efectos de los transitorios o bien se valoran estos con cálculos aproximados realizados generalmente a posteriori del cálculo general.

El presente trabajo desarrolla una metodología original, para el tratamiento completo de las redes válida tanto para redes abiertas como cerradas, estudiándose el régimen transitorio y permanente como equilibrio de un transitorio.

El lector podrá pensar que un planteamiento tan general inducirá unas ecuaciones más complejas que métodos clásicos como el Hardy-Cross que producirán tiempos de cálculo en el ordenador más altos. Esta idea es cierta pero en la situación actual de los costes informáticos estos incrementos son moderadamente bajos, estando justificados, tanto desde el punto de vista técnico como desde el económico. Un mayor ajuste en los resultados de los cálculos puede representar ahorros importantes en la ejecución de la obra.

Por otra parte el cálculo de régimen transitorio es justificable en sí mismo en algunos casos. Aunque actualmente se puede prever la aplicación de instrumentos de control y de gestión en las redes que aumenten sensiblemente

los períodos transitorios. No estamos lejos de la existencia de redes que a través de sensores y de equipos manejados de forma remota, sean gestionadas y controladas por sistemas informáticos de forma dinámica produciendo períodos transitorios en su explotación. Por último presenta la ventaja de eliminar el cálculo manual de las condiciones iniciales para el régimen permanente ya que con este método se puede partir de caudales nulos y alturas piezométricas prefijadas, y el propio cálculo establece el régimen permanente final.

## II. HIPOTESIS DE PARTIDA

La red queda definida por su topología a través de una serie de ramales unidos entre sí por nudos.

Los nudos pueden ser de tres tipos:

- Nudos depósito en los que se conoce la altura piezométrica en función del tiempo.
- Nudos de descarga en los que se conoce el caudal en función del tiempo.
- Nudos de descarga en función de la altura piezométrica.

Los ramales quedan definidos por dos nudos, pudiendo definirse ramales paralelos.

Se considera el fluido como incomprensible y que los elementos que componen la red, tuberías, depósitos, etc., no son flexibles a efecto de variación de volumen contenido.

(\*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de diciembre de 1985.



Esta matriz es simétrica y como se puede observar contiene tanto las ecuaciones de energía (3.2) como las de continuidad (3.4) así como las igualdades de los términos de piezometría fija. Por otra parte la ecuación de continuidad de caudales en nudo se podría generalizar incluyendo un término de pérdida de caudal (fugas) en función de la presión en el nudo. Este tipo de condiciones puede hacer que parte de la matriz (3.5) tenga en su diagonal elementos no nulos. Quedando la matriz en la forma:

$$\begin{array}{c|cc|cc|c|c}
 & & i & j & & & \\
 \hline
 K & 1 & & & & Q_1^* & m_1 \\
 & & 1 & & & Q_k^* & m_k \\
 & & & 1 & & & \\
 \hline
 i & & & -1 & d_1 & H_1 & QE_1 \\
 j & & & & 1 & H_j & QE_j \\
 & & & & & & \\
 & & & & & d_n & H_n & QE_n
 \end{array} \quad [3.6]$$

La matriz anterior tiene una dimensión de  $p \times p$ , siendo  $n$  el número de nudos incógnitas y  $nr$  el número de ramales tendremos:

$$p = n + nr$$

Si se considera una red amplia el número de ramales es muy superior al número de nudos, siendo el orden de magnitud tal que:

$$n.^{\circ} \text{ de ramales} = 2 (n.^{\circ} \text{ de nudos})$$

En esta hipótesis tendremos un sistema de ecuaciones de aproximadamente  $3 \times (n.^{\circ} \text{ de nudos})$ .

El método que se propone presenta la ventaja de reducir este sistema a una ecuación por nudo siendo la matriz a tratar reducida a  $n \times n$ , siendo  $n$  el número de nudos incógnita (eliminando los nudos tipo depósito).

#### IV. RESOLUCION DEL SISTEMA

El proceso de resolución del sistema de ecuaciones se basa en las particularidades del pro-

pio sistema. Para detallarlo denominaremos la matriz base por cajas según:

$$\begin{array}{|c|c|} \hline I \\ \hline EN^T \\ \hline \end{array} * \begin{array}{|c|c|} \hline E \\ \hline A \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline Q \\ \hline H \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline M \\ \hline QE \\ \hline \end{array} \quad [3.7]$$

La submatriz denominada  $I$  es unitaria teniendo elementos unidad en su diagonal y con tamaño  $nr \times nr$ . La submatriz  $E$  está formada por elementos  $+C_k$  y  $-C_k$  en cada nudo  $ij$  que corresponden al ramal  $k$ .

La submatriz  $EN^T$  (submatriz  $E$  «normalizada» y traspuesta), se puede obtener de la matriz  $E$  «normalizando» los elementos, es decir, sustituyendo los términos  $+C_k$  y  $-C_k$  por  $+1$  y  $-1$  y trasponiéndola, por último la submatriz  $D$  es una matriz cuadrada nula con la excepción de algunos términos en su diagonal.

Con esta distribución de elementos se puede realizar una serie de combinaciones lineales de elementos por filas de forma que se anulen los términos de la matriz  $EN^T$  con los siguientes criterios:

- a) Si  $i \leq n$  se realiza la operación con la fila  $i$  de forma que

$$A_{ii} = A_{ii} - C_k$$

$$A_{ji} = A_{ji} + C_k$$

$$(QE)_i = (QE)_i + M_k$$

- b) Si  $j \leq n$  se realiza la operación con la fila  $j$  según:

$$A_{ij} = A_{ij} + C_k$$

$$A_{jj} = A_{jj} - C_k$$

$$(QE)_j = (QE)_j - M_k$$

- c) Si  $j > n$  (cuando el tramo incide en un nudo «depósito») la transformación sólo afecta a los términos independientes.

$$(QE)_i = (QE)_i - C_k H_j + M_k$$

- d) Si  $i > n$  (cuando el tramo sale de un nudo «depósito») la transformación tan sólo afecta al término independiente según:

$$(QE)_j = (QE)_j + C_k H_i - M_k$$

Realizando estas operaciones la estructura de la ecuación (e.7) queda en la forma

$$\begin{bmatrix} I & E \\ O & A^s \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M \\ QE^s \end{bmatrix}$$

Donde las submatrices  $A^s$  y  $QE^s$  representan a las submatrices  $A$  y  $QE$  con todas las transformaciones indicadas en el párrafo anterior. Mientras que la  $EN^T$  queda reducida a la matriz nula.

Por lo que para resolver el sistema bastaría operar con la submatriz  $A^s$ . Calculados los valores del vector  $H$ , se operaría con la parte superior de la matriz donde está la submatriz  $I$  (unitaria) y la submatriz  $E$  despejando directamente los valores de los caudales (vector  $Q$ ).

La metodología indicada presenta una ventaja adicional al no tener que montar de forma explícita la matriz general sino sólo la submatriz  $A$  y los vectores  $Q$ ,  $H$ ,  $M$ , y  $QE$  con el consiguiente ahorro de espacio de memoria en el ordenador así como de tiempo de proceso.

Es de notar que dado que el proceso es transitorio este deberá de ser repetido para cada incremento de tiempo.

## V. PROGRAMA DE ORDENADOR

La anterior formulación ha sido codificada en basic para un ordenador personal con una capacidad de memoria de usuario de 128 K que permite redes de hasta 100 nudos.

El programa ha sido probado para varios casos reales de redes de distribución obteniendo resultados plenamente satisfactorios.

El programa está disponible para el tipo de ordenador indicado en el laboratorio de hidráulica de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de Madrid.

## VI. CONCLUSIONES

La metodología propuesta para el cálculo de redes presenta sobre otros métodos las siguientes

ventajas:

- a) Elimina la obligación de suponer régimen permanente.
- b) Elimina la necesidad del cálculo de condiciones iniciales.
- c) Permite simular completamente la explotación de una red.
- d) Elimina frente a otros métodos la definición topológica de mallas sustituyéndola por una entrada de datos muy simple basada en nudos y ramales.
- e) Permite una optimización económica en el diseño de la red.

Por último, se puede utilizar como método de cálculo de redes en régimen permanente teniendo garantizada totalmente la convergencia del proceso. Otros métodos presentan en casos límites problemas de convergencia.

## BIBLIOGRAFIA

1. OSUNA MARTINEZ, A.: «Hidráulica», Servicio de Publicaciones de la E.T.S. de Caminos. Madrid, 1978.
2. JAEGER, C.: «Fluid Transients», Blackie, London, 1977.

Francisco Vicente Laguna Peñuelas



Promoción 1969. Jefe Dirección Proceso Datos de EPTISA hasta 1975. Jefe Departamento Proceso de Datos de INCISA hasta 1978. Jefe Sección Producción Departamento Informática de Empresarios Agrupados en 1985.

Eduardo Martínez Marín



Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, Promoción 1971, desde 1973 es encargado de curso en las Cátedras de Hidráulica y de Obras Hidráulicas de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de Madrid. Es desde 1975 jefe del Departamento de Proceso de Datos de EPTISA.