

APORTACIONES AL CALCULO DE REDES DE DISTRIBUCION DE AGUA

Por FERNANDO ARCAS LUQUE

Ingeniero de Caminos.

Después de una exposición de la aplicación del método de Hardy-Cross al cálculo de redes de distribución de aguas, se dan unas interesantes aportaciones al mismo que lo hacen más convergente. En la segunda parte se indican el método seguido utilizando las máquinas electrónicas, proponiendo su adopción para una oficina central de proyectos.

Durante mi estancia en París, asistiendo a unos cursillos de Abastecimiento y Saneamiento de poblaciones, he tenido ocasión de conocer algunas variantes del clásico método de Hardy-Cross para el cálculo de redes de distribución de agua, así como también un nuevo método usado por la "Compagnie Générale des Eaux", basado en la utilización de las máquinas electrónicas.

Creo que una de las obligaciones de los que asistimos a estos cursillos en el extranjero es dar a conocer aquello que ha podido llamarnos la atención y que puede ser de interés más o menos general.

Este es el objeto del presente artículo, que dividido en dos partes: la primera, dedicada al método de Cross, y la segunda, a la utilización de las máquinas electrónicas con una ligera descripción de sus posibilidades, ya que, como veremos, el sistema puede ser perfectamente utilizado para el cálculo de estructuras reticulares y para cualquier otro tipo de cálculo que se base en el sistema reiterativo.

Sería injusto no citar aquí el nombre de M. Duvin, Ingeniero Jefe de la "Compagnie Générale des Eaux", y a M. Divenot, Ingeniero de la misma Compañía, a quienes debo la mayor parte de esta información.

PRIMERA PARTE

Método de Hardy-Cross.

Aunque es de todos conocido, voy a hacer un pequeño resumen del método, para que unificando las notaciones, puedan quedar más claras las aportaciones que intento hacer resaltar.

Se basa este método en la aplicación de las leyes de Kirchhoff a una red de distribución de agua: estas leyes son:

1.ª En todo nudo la suma de los caudales entrantes es igual a la suma de los salientes.

2.ª A lo largo de un circuito cerrado, la suma algebraica de las pérdidas de carga es nula.

Sea el circuito de la figura 1.ª.

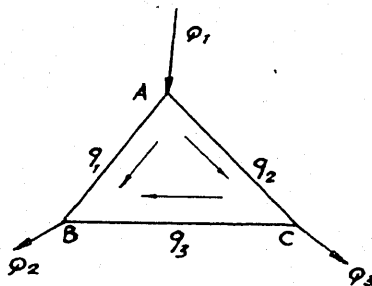


Figura 1.ª

1.ª ley:

$$\text{Nudo A} \quad Q_1 = q_1 + q_2.$$

$$\text{Nudo B} \quad Q_2 = q_1 + q_3.$$

$$\text{Nudo C} \quad Q_3 = q_2 - q_3.$$

2.ª ley:

Para la aplicación de la segunda ley partimos de la ecuación de las pérdidas de carga en una tubería.

$$h = R Q^2 (1).$$

Donde h es la pérdida de carga, R el coeficiente de resistencia del tramo y Q el caudal que pasa por el mismo.

Si suponemos conocidos los caudales que recorren los ramales de la figura 1.ª, supuesto que tenemos fijados los diámetros de todas sus tuberías, tendremos la siguiente igualdad, de acuerdo con la segunda de las leyes mencionadas:

$$R_2 q_2^2 + R_3 q_3^2 - R_1 q_1^2 = 0.$$

Y en general para una malla de n lados:

$$\sum_1^n R_n Q_n^2 = 0.$$

(1) La fórmula más general sería $h = R Q^n$, que puede usarse perfectamente en el método Cross, pero para el cálculo con las máquinas electrónicas es más rápida esta fórmula, y por eso la adoptamos.

Los valores de R son función del diámetro de la tubería, de su longitud y del coeficiente de rugosidad del tubo.

Como curiosidad diré que en la "Compagnie Générale des Eaux" emplean la misma rugosidad para cualquier clase de tubería, la que corresponde a un valor de $K = 1$ mm. para la fórmula de Nikuradse, y la razón es bastante lógica; una vez en uso la tubería, se inicia la incrustación, y a partir de este momento la rugosidad es independiente del material del tubo, ya que la verdadera es la de la incrustación.

de donde se deduce el primer valor de la corrección:

$$\Delta q = - \frac{\sum R q^2}{2 \sum R q'}$$

Para tener en cuenta el signo, asignamos a cada malla un sentido de giro y se les da el signo positivo a los caudales que tengan el mismo sentido y negativos los que lo tengan contrario. La suma del numerador se tomará de acuerdo con el signo de cada tramo, y la del denominador en valor absoluto, como puede com-

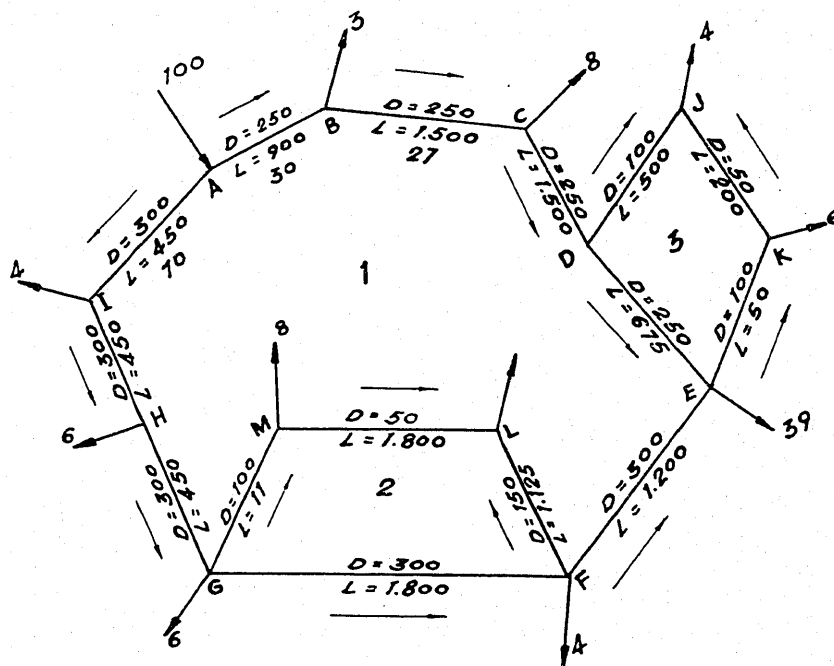


Figura 2.ª

Naturalmente, que esta simplificación no servirá si transportamos agua agresiva o cuya composición se encuentre dentro de la curva de equilibrio, ya que en este caso no habrá incrustación y tendremos que pensar en diferentes valores de K .

Pero sigamos con el método, los valores de q_1 , q_2 y q_3 no los conocemos, por lo que partimos de unos valores aproximados q'_1 , q'_2 y q'_3 , a los cuales habrá que añadir un caudal complementario Δq para que se puedan cumplir las condiciones de Kirchoff.

En este caso la igualdad que escribiremos sería para la malla de la figura 1.ª:

$$R_2(q'_2 + \Delta q)^2 + R_3(q'_3 + \Delta q)^2 - R_1(-q'_1 + \Delta q)^2 = 0, [2]$$

o lo que es lo mismo, para el caso general de n lados:

$$\sum_1^n R(q' + \Delta q)^2 = 0,$$

que puede escribirse despreciando el término Δq^2 :

$$\sum R q'^2 + \Delta q \cdot 2 \sum R q' = 0,$$

probarse fácilmente con el ejemplo de la igualdad [2].

Este valor así obtenido lo sumaremos con su signo a los valores q'_1 , q'_2 y q'_3 , con lo que obtenemos unos nuevos valores de q a los que aplicamos la fórmula anterior hasta que el error obtenido sea menor que la cantidad que hayamos fijado de antemano.

Supongamos ahora el circuito de la figura 2.ª, cuyos diámetros y longitudes se expresan en milímetros y en metros, respectivamente.

Ante todo, lo dividimos en mallas para poder aplicar el método a cada una de ellas.

En el método seguido por Hardy-Cross se eligen las mallas elementales que constituyen la figura; en este caso serían las tres siguientes:

ABCDEFMLGHIA;
DJKED;
FGMLF.

A estas mallas se les aplica el método descrito, es decir, se fijan unos caudales que cumplan la primera

condición de Kirchoff de que todos los nudos estén equilibrados y se hallan los caudales de corrección que se suman algebraicamente a los que hemos supuesto a cada ramal.

Naturalmente, que a algunos ramales habrá que sumarles dos o más caudales de acuerdo con el número de mallas a que pertenezcan, como sucede, por ejemplo, con el ramal GF de la figura 2.^a, que es común a dos mallas y que, por tanto, tendrá dos correcciones.

Con los caudales corregidos volvemos a hacer la misma operación hasta que la mayor corrección obtenida sea menor que el valor que tengamos fijado como error admisible.

Con este sistema puede ser necesario un gran número de correcciones y hasta se puede dar el caso de que en vez de ir hallando caudales de corrección decreciente los hallemos crecientes y, por tanto, no consigamos ningún resultado con el método.

Para ello se ha estudiado la composición y el número de mallas que hay que elegir para tener resultados muy convergentes que obliguen al menor número posible de operaciones.

No voy a exponer aquí toda la teoría, ya que ha sido publicada por M. Duvin en la Revista *La Huille Blanche* en su número de mayo-junio de 1947; sólo expongo las consecuencias.

1.º El número de mallas que hay que elegir es el de regiones delimitadas. — Si tenemos la figura 3.^a constituida por tres regiones delimitadas, debemos elegir tres mallas.

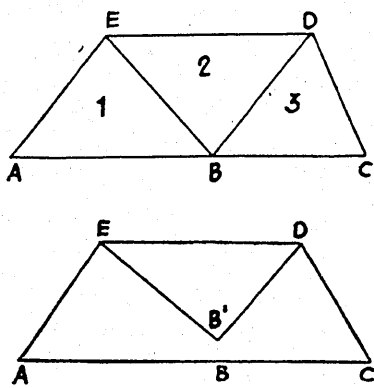


Figura 3.^a

En principio parece que, escogiendo las mallas $ACDE$ y las DBE , tenemos resuelto el problema, ya que estas dos mallas están compuestas por todos los tramos de la distribución, pero en realidad lo que equilibramos con estas dos mallas es la red $ACDE$ y EDB' sin comunicación entre B y B' , como se ve en la figura 3.^a.

2.º Formemos el siguiente determinante:

Se numeran todas las regiones delimitadas y se ponen en una horizontal; en una vertical se van es-

cribiendo las distintas mallas escogidas y en la línea horizontal correspondiente y frente a cada malla, se colocan un 1 ó un 0, según que esta región quede incluida o no dentro de la determinada.

En la figura 2.^a tendremos:

Regiones	1	2	3	
$ABCDEFGHI \dots$	1	1	0	$= 1$
$FGML \dots \dots \dots$	0	1	0	
$DEKJ \dots \dots \dots$	0	0	1	

El determinante así formado tiene que ser diferente de 0.

Puede adoptarse una variante, que es más útil en el caso de tomar como malla la conducción existente entre dos puntos de cota conocido, por ejemplo, entre dos depósitos; en este caso, al tratarse de una malla abierta, no podemos aplicar el método descrito. En este caso obtenemos los mismos resultados colocando en cada horizontal del determinante un 1 ó un 0, según que la malla correspondiente tenga, uno o más tramos comunes con la región a que corresponde la vertical del determinante.

Es lo que gráficamente M. Duvin dice que se coloca un 1 cuando la malla que estudiamos tenga una frontera común con la región correspondiente. El determinante quedaría escrito así:

Regiones	1	2	3	
$ABCDEFGHI \dots$	1	1	1	$= - 1$
$FGML \dots \dots \dots$	1	1	0	
$DEKJ \dots \dots \dots$	1	0	1	

3.º Para que la convergencia sea grande, las mallas escogidas deben ser tales que sus ramales comunes tengan la mínima pérdida de carga. — En la figura 2.^a escogeremos las mallas $ABCDEFGHI$ y $DEKJ$ que tienen el ramal DE común con un diámetro de 250 mm., y no las $ABCDJKEFGHI$ y $DEKJ$ que tienen los ramales comunes DJ , JK y KE con tuberías de 100 y 50 mm., con mayor pérdida de carga que la de 250 mm.

Y por último, un consejo, que es general para todos los cálculos y que en éste es imprescindible: hay que seguir un método ordenado, pues de lo contrario, cuando hay muchas mallas pronto nos perdemos entre un mar de cuartillas emborronadas y no sabemos por dónde seguir.

Vamos a calcular el ejemplo de la figura 2.^a para aclarar ideas y dar uno de los métodos que pueden seguirse.

Tenemos una red por la que tienen que circular unos caudales de modo que el caudal total que entra por el nudo *A* sea de 100 l./seg., y que en los distintos puntos se deriven los caudales indicados, cuya suma, naturalmente, será la del caudal que entra por la malla.

Veamos de qué modo puede quedar incluido en este ejemplo el caso de un ramal con un gasto constante a lo largo de su recorrido.

Sea, por ejemplo, el ramal *ab* de la figura 4.^a, que consume a todo lo largo de su recorrido un caudal q_1 l./seg./m., cuyo caudal total es de Q_1 .

Teóricamente, la pérdida de carga en este recorrido es de:

$$H_a - H_b = R \left(Q^2 - Q_1 Q + \frac{1}{3} Q_1^2 \right) \quad (1).$$

Esta fórmula es complicada de tener en cuenta en el método que aplicamos; por eso debemos recurrir a una simplificación. Tanto en la Instrucción española como en la francesa, se aconseja usar para este ramal el caudal:

$$Q_1 + 0,55 Q_1.$$

Que equivale a la distribución de caudales de la figura.

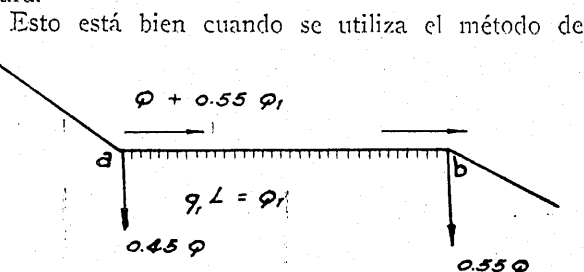


Figura 4.^a

Cross tal como lo explicamos, en que se fija precisamente el sentido del agua; pero para el cálculo con máquinas electrónicas, en que no se sabe en principio el sentido del agua, no se debe aplicar, y en este caso, es preferible la simplificación de la figura 5.^a, en la que el caudal Q_1 se distribuye entre los extremos y un nuevo nudo que formamos en el centro del tramo.

No obstante, cuando el ramal es corto, no interesa añadir un nuevo nudo, y en ese caso, podemos suponer que en cada extremo se toma un caudal de $0,5 Q$, con lo que el caudal de cálculo es $Q + 0,5 Q$ y es indiferente del sentido del agua.

En nuestra malla de la figura 2.^a, el ramal *G I*

(1) La fórmula general es $h = \frac{k}{(h+1)(q_1 - q_2)} q_1^{h+1} - q_2^{h+1}$

Ver en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS en su número de julio de 1951, el artículo de D. V. Escario.

podía ser un ramal que en sus extremos hubiera un consumo de 2 y de 4 l./seg., y a todo lo largo del recorrido un consumo q_1 , cuyo total es:

$$Q_1 = 10 \text{ l./seg.}$$

Podemos entonces situar un nudo, *H*, en el centro del tramo y asignarle una consumición de 6 l./seg. y sumarle en cada extremo 2 l./seg., con los que quedarían los consumos de la figura.

Una vez fijados los caudales derivados en los dis-

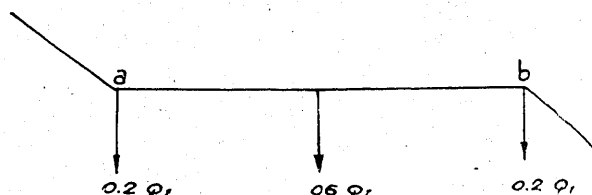


Figura 5.^a

tintos nudos, partimos de una hipótesis de distribución de caudales en los diferentes tramos.

Si se trata de una red nueva, vamos dando a cada ramal un diámetro de tubo que podemos escogerlos de modo que, por ejemplo, con los caudales asignados, la velocidad del agua esté alrededor de 1 l./seg. En esta labor se invierten pocos minutos disponiendo de una tabla de caudales, velocidades o simplemente con la regla de cálculo.

Si, por el contrario, se trata de una red antigua cuyo funcionamiento tratamos de calcular, aplicamos directamente el método, ya que los diámetros son datos del problema.

Empezamos fijando las resistencias de cada ramal,

TABLA A

Ramal	Diámetro	Longitud (L)	Coficiente (C)	$R = C \times L$
AB	250	900	2,4	2 160,00
BC	250	1 500	2,4	3 600,00
CD	250	1 500	2,4	3 600,00
DE	250	675	2,4	1 620,00
EF	300	1 200	0,91	1 092,00
FG	300	1 800	0,91	1 638,00
GH	300	650	0,91	591,50
HI	300	650	0,91	591,50
IA	300	450	0,91	409,50
DJ	100	500	312,80	156 400,00
JK	50	400	12 841,00	5 136 400,00
KE	100	50	312,80	15 640,00
FL	150	1 125	36,08	40 590,00
LM	50	1 800	12 841,00	23 113 800,00
MG	100	1 125	312,80	351 900,00

POBLACION.....								FUNCIONAMIENTO								
MALLA A B C D E F G H I A TANTEO 1								MALLA A B C D E F G H I A TANTEO 2								
Caudal l./seg.		R	RQ	RQ²		Corrección		Ramal	Caudal l./seg.		R	RQ	RQ²		Corrección	
+	-			+	-	Δ	Q _i		+	-			+	-	Δ	Q _i
-	-	-	-	-	-	+ 5,54	-	-	-	-	-	-	-	-	- 0,07	-
30	-	2,16	64,80	1 944,00	-	-	+ 35,54	A B	35,54	-	2,16	76,77	2 728,27	-	-	+ 35,47
27	-	3,60	97,20	2 624,40	-	-	+ 32,54	B C	32,54	-	3,60	117,14	3 811,86	-	-	+ 32,47
19	-	3,60	68,40	1 299,60	-	-	+ 24,54	C D	24,54	-	3,60	88,34	2 167,96	-	-	+ 24,47
13	-	1,62	21,06	273,78	-	-	+ 18,54	D E	19,06	-	1,62	30,88	588,51	-	-	+ 18,99
-	32	1,09	34,88	-	1 116,16	-	- 26,46	E F	-	26,46	1,09	28,84	-	763,14	-	- 26,53
-	46	1,64	75,44	-	3 470,24	-	- 40,46	F G	-	41,73	1,64	68,44	-	2 855,88	-	- 41,80
-	60	0,59	35,40	-	2 124,00	-	- 54,46	G H	-	54,46	0,59	32,13	-	1 749,88	-	- 54,53
-	66	0,59	38,94	-	2 570,04	-	- 60,46	H I	-	60,46	0,59	35,67	-	2 156,69	-	- 60,53
-	70	0,41	28,70	-	2 009,00	-	- 64,46	I A	-	64,46	0,41	26,43	-	1 703,59	-	- 64,53

464,82 6 141,78 11 289,44
6 141,78
- 5147,66

504,64 9 296,60 9 229,18
9 229,18
+ 67,42

$$= + \frac{5147,66}{2 \times 464,82} = + 5,54$$

$$\Delta_2 = - \frac{67,42}{2 \times 504,64} = - 0,066$$

POBLACION								FUNCIONAMIENTO								
MALLA D E K J TANTEO 1								MALLA D E K J TANTEO 1'								
Caudal l./seg.		R	RQ	RQ²		Corrección		Ramal	Caudal l./seg.		R	RQ	RQ²		Corrección	
+	-			+	-	Δ	Q _i		+	-			+	-	Δ	Q _i
-	-	-	-	-	-	+ 0,92	-	-	-	-	-	-	-	-	- 0,40	-
18,54	-	1,62	30,03	556,84	-	-	+ 19,46	D E	19,46	-	1,62	31,53	613,48	-	-	+ 19,06
6,00	-	15,64	93,84	563,04	-	-	+ 6,92	E K	6,92	-	15,64	108,23	748,94	-	-	+ 6,52
-	-	5 136,40	-	-	-	-	+ 0,92	K J	0,92	-	5 136,40	4 725,49	4 345,39	-	-	+ 0,52
-	4,00	156,40	625,60	-	2 502,40	-	- 3,08	J D	-	3,08	156,40	481,71	-	1 483,61	-	- 3,48

749,47 1 119,88 2 502,40
1 119,88
- 1 382,52

5 346,96 5 707,81 1 483,61
1 483,61
4 224,20

$$= + \frac{1382,52}{2 \times 749,47} = + 0,92$$

$$\Delta'_1 = - \frac{4224,20}{2 \times 5346,96} = - 0,40$$

POBLACION								FUNCIONAMIENTO.....								
MALLA <i>GFLM</i> TANTEO 1								MALLA <i>GFLM</i> TANTEO 1'								
Caudal l./seg.		R	RQ	RQ ²		Corrección		Ramal	Caudal l./seg.		R	RQ	RQ ²		Corrección	
+	-			+	-	Δ	Q ₁		+	-			+	-	Δ	Q ₁
-	-	-	-	-	-	- 2,40	-	-	-	-	-	-	-	-	+ 1,13	-
-	40,46	1,64	66,35	-	2 684,70	-	- 42,86	<i>GF</i>	-	42,86	1,64	70,29	-	3 012,65	-	- 41,73
-	10,00	40,59	405,90	-	4 059,00	-	- 12,40	<i>FL</i>	-	12,40	40,59	503,32	-	6 241,12	-	- 11,27
0	-	23113,80	0,-	0	-	-	- 2,40	<i>LM</i>	-	2,40	23113,80	55473,12	-	133 135,49	-	- 1,27
8,00	-	351,90	2 815,20	22521,60	-	-	+ 5,60	<i>MG</i>	5,60	-	351,90	1970,64	11035,58	-	-	+ 6,73

3 287,45 22521,60 6 743,70
6 743,70
+ 15777,90

58 017,37 11035,58 142389,26
11035,58
- 131353,68

$$= - \frac{15777,90}{2 \times 3287,45} = - 2,40$$

$$\Delta'_1 = + \frac{131353,68}{2 \times 58017,37} = + 1,13$$

para lo cual hacemos uso de una tabla; nosotros aplicamos la tabla de Nikuradse para el coeficiente $K = 1 \text{ mm.}$, que corresponde a la rugosidad media de los tubos usados, con una incrustación media.

Conocidas las resistencias, pasamos a rellenar los cuadros adjuntos, que pueden tenerse impresos y que deben agruparse por tanteos.

Para finalizar la escritura, podemos poner en cada malla el coeficiente R , multiplicado por una potencia 10, ya que, como entra en el numerador y en el denominador, el resultado no varía.

Empezaremos por una de las mallas de mayores caudales; en el ejemplo, la $A B C D E F G H I$ a continuación de las demás, siguiendo un orden cualquiera. Según el método indicado, una vez terminado el primer tanteo, se vuelve a empezar, hasta que vayamos consiguiendo correcciones menores de una cantidad fijada.

Hay casos particulares que aconsejan ciertas variaciones; yo empleo dos que estimo de interés y que son de aplicación en el ejemplo propuesto.

La primera consiste en el caso de que algún ramal de la malla tenga una gran resistencia y que se le haya asignado un caudal 0, como sucede con las mallas $D E K J$ y $G F L M$.

En este caso, la primera corrección no tiene ninguna exactitud, ya que hemos despreciado el término R^2 , y como R es muy grande en comparación con las otras R , hemos cometido un error de importancia.

Antes de seguir adelante, deberemos obtener para estas mallas una segunda corrección, Δ' , con la que tendremos unos caudales, resultado de sumar a los primeros obtenidos, las correcciones Δ_1 y Δ'_1 .

A este tanteo lo designo con el mismo número afectado del signo Δ'_1 .

Ya tenemos un grupo de tanteo 1 para cada malla.

Si, como es lo más corriente en este primer tanteo, el error obtenido en cada malla es mayor que el que nos hemos fijado, iniciamos un segundo tanteo, y así continuamos haciendo tantos tanteos como sean necesarios para obtener los caudales con la aproximación fijada.

En los cuadros exponemos los cálculos efectuados para el ejemplo de la figura 2.^a. Hay veces que se puede obtener una simplificación de los cálculos, si bien su ventaja es más teórica que práctica, ya que en todos estos métodos lo importante es la sistematización, y para esta variante hay que tener distintos impresos; no obstante, como en algunos casos puede ser interesante, voy a exponer la teoría y aplicarla al ejemplo que estudiamos.

En cada malla hemos buscado un valor de Δ_1 , que haga que:

$$\Sigma R q^2 + \Delta_1 \cdot 2 \Sigma R q = 0. \quad [3]$$

Para la segunda corrección aplicamos esta misma fórmula, en la que los caudales, q , vienen sumados algebraicamente con las correcciones obtenidas en este

tanteo, tanto para esta malla como para todas las que tienen algún tramo común con ésta:

$$\Delta_2 = - \frac{\Sigma R (q + \Delta_1 + \Sigma \Delta_n)^2}{2 \Sigma R (q + \Delta_1 + \Sigma \Delta_n)}.$$

Así, en nuestro caso, el tramo $B C$ no tendrá más que una corrección, y el $D E$, por el contrario, tendrá tres, la que corresponde a la malla principal y las dos de la malla $D E K J$, que quedan representadas por $\Sigma \Delta_n$.

El numerador lo podemos escribir de la siguiente forma:

$$\Sigma R (q + \Delta_1 + \Sigma \Delta_n)^2 = \Sigma_1^n R (q + \Delta_1)^2 + \Sigma_a^b R (q + \Delta_1 + \Sigma \Delta_n)^2 - \Sigma_a^b R (q + \Delta_1)^2,$$

donde la Σ_1^n comprende todos los tramos de la malla, y la Σ_a^b , los tramos que pertenecen a dos o más mallas; pero

$$\Sigma_1^n R (q + \Delta_1)^2 = \Sigma_1^n (R q^2 + 2 \Delta_1 \cdot R q + R \cdot \Delta_1^2) = \Sigma_1^n R \Delta_1^2,$$

según se deduce de la igualdad [3]; luego el numerador de la corrección queda reducido a:

$$\Sigma_1^n R \Delta_1^2 + \Sigma_a^b R (q + \Delta_1 + \Sigma \Delta_n)^2 - \Sigma_a^b R (q + \Delta_1)^2,$$

y la segunda corrección es:

$$\Delta_2 = - \frac{\Delta_1^2 \Sigma_1^n R + \Sigma_a^b R (q + \Delta_1 + \Sigma \Delta_n)^2 - \Sigma_a^b R (q + \Delta_1)^2}{2 (\Sigma_1^n R q + \Delta_1 \Sigma_1^n R + \Sigma_a^b R \Sigma \Delta_n)}$$

Esta expresión, que a primera vista parece más complicada que la [3], es mucho más fácil de calcular, cuando la malla a la que aplicamos tiene muchos tramos no comunes a ninguna otra y muy pocos con dos o más correcciones.

Veamos los términos de la expresión:

$\Sigma_1^n R$: se deduce de la columna de las R del primer tanteo, teniendo en cuenta que R debe venir afectado del signo que tenga el caudal que circule por ese tramo.

$R (q + \Delta_1)^2$: tomamos el caudal corregido que hemos obtenido en el primer tanteo y que hemos calculado en el tanteo de la malla secundaria afectada por este tramo.

$(q + \Delta_1 + \Sigma \Delta_n)$: tomamos el caudal corregido que hemos obtenido en la malla secundaria a que corresponde el tramo común.

$\Sigma_1^n R q$: lo tenemos calculado en el primer tanteo.

$\Delta_1 \Sigma_1^n R$: lo calculamos a la vez que $\Delta_1^2 \Sigma R$; los otros términos hay que calcularlos.

En nuestro ejemplo, el segundo tanteo de la malla principal se habría reducido al que figura en el cuadro adjunto.

RAMAL	R_n	$\Sigma_1^n R$	Δ_1	$\Delta_1^2 \Sigma R$	$R(Q + \Delta_1 + \Sigma \Delta_n)^2$		$+ R(q + \Delta_1)^2$		$\Sigma_1^n R q$	$\Delta_1 \Sigma_1^n R$	$R \Sigma \Delta_n$	
					+	-	+	-			+	-
Malla 1	—	+ 6,66	+ 5,54	+ 204,40	—	—	—	—	464,82	+ 36,90	—	—
DE	1,62	—	—	—	588,52	—	556,85	—	—	—	0,84	—
FG	1,64	—	—	—	—	2 855,88	—	2 684,70	—	—	—	- 2,08
—	—	—	—	—	—	- 2 855,88	—	- 2 684,70	—	—	—	- 2,08
—	—	—	—	—	—	+ 588,52	—	+ 556,84	—	—	—	+ 0,84
—	—	—	—	—	—	- 2 267,36	—	- 2 127,86	—	—	—	- 1,24

$$\Delta_2 = - \frac{+ 204,40 - 2 267,36 + 2 127,86}{2 (464,82 + 36,90 - 1,24)} = - \frac{64,90}{2 \times 500,48} = - \frac{64,90}{1 000,96} = - 0,065 \quad \Delta_2 = - 0,065.$$

Para el tercer tanteo es conveniente volver al método corriente, pudiendo utilizarse la simplificación en el cuarto tanteo si fuera necesario, y así sucesivamente, es decir, que tendríamos distinto gráfico para los tanteos pares que para los impares.

Repetimos que no consideramos la simplificación de mucho interés práctico; pero al repasar el método clásico, se nos ha ocurrido y la transcribimos por si a alguien le puede ser útil.

SEGUNDA PARTE

Cálculo con máquinas electrónicas.

Una vez que hemos recordado el método clásico de cálculo, con las variantes que lo hacen más convergente, vamos a pasar a enumerar las posibilidades de las máquinas electrónicas en los cálculos de las redes de distribución, dando una idea de las posibilidades de su utilización para otros muchos cálculos, como el del golpe de ariete, las estructuras reticulares o el proyecto de una presa más o menos complicada.

Sería extensísimo y fuera de lugar una descripción detallada de las máquinas electrónicas con que actualmente cuenta la técnica; en mi viaje he tomado contacto con las dos marcas que existen en Francia, la Bull y la I.B.M., la primera de fabricación francesa y la segunda americana: sí, nos detendremos en su empleo, con lo que nos daremos una idea de sus posibilidades.

ETAPAS DE CÁLCULO.

Son cuatro las etapas en que se divide el cálculo en una máquina electrónica, etapas que están completamente diferenciadas:

1.^a etapa: Preparación del programa.

2.^a etapa: Indicación de los datos.

3.^a etapa: Cálculo.

4.^a etapa: Inscripción de los resultados.

1.^a etapa: *Preparación del programa.*— Es la parte esencial del cálculo, debe servirnos para cuantos problemas del mismo tipo se presenten, y consiste en una recopilación de instrucciones que se le dan a la máquina para que sepa qué hacer con cada uno de los datos que se le dan para el cálculo.

Estas instrucciones se dan con cartas perforadas; en la 704 I.B.M. se recopilan en una banda magnética constituida por unas cintas de mylar recubierto de óxido magnetizable, que permiten conservar, en los 730 m. de longitud que tiene cada bobina, unas 900 000 palabras, o sea 32 400 000 cifras binarias que el ordenador lee a la velocidad de 90 000 cifras binarias, o sea 15 000 cifras decimales por segundo.

Esta banda magnética marcha hacia adelante y hacia atrás, de modo que al recibir la máquina un mensaje por medio de la carta perforada de los datos, busca en la banda del programa la orden de operaciones, realizando los cálculos, que quedan retenidos en la máquina, bien para su ulterior aplicación en operaciones posteriores, o si son resultados finales, para ser inscritos en la última etapa de este ciclo.

El lugar de la máquina donde se guardan los resultados obtenidos, se llama memoria.

En un principio se empezaron a calcular redes con máquinas que no disponían más que de 20 memorias, a pesar de lo cual se podrían calcular hasta 18 mallas.

Posteriormente se construyó la 650 I.B.M. con 6 000 memorias y con una velocidad de cálculo diez veces superior a la anterior; actualmente, la máquina con la que hemos trabajado en París, la 704 I.B.M., dispone de 8 000 memorias y aún más si contamos las del tambor y bandas magnéticas.

Con esta máquina se pueden calcular 650 ramales repartidos en 130 mallas, 15 estaciones de elevación y 30 depósitos reguladores.

Pero estas máquinas cada vez se perfeccionan

más; en Estados Unidos existe otra que dispone de 32 000 memorias, lo que nos permitiría calcular una red de 5 000 ramales repartidos en 1 000 mallas.

Veamos ahora cómo se puede preparar un programa para una operación elemental como supone la de calcular la pérdida de carga $R Q^2$ para una tubería y 10 caudales distintos.

Nos referimos aquí al lenguaje FORTRAN de I.B.M., pues con él podemos comprender con bastante claridad qué es lo que se ordena a la máquina.

Tomamos una tarjeta de las que usan estas máquinas y la perforamos por medio de las máquinas construidas para este fin, y cuyo manejo no es más complicado que el de una máquina de escribir; en ella, de acuerdo con el código convenido para las letras, perforamos el siguiente mensaje:

LIRE 1, (Q(N), N = 1,10) R.

Este mensaje lo interpretará la máquina del siguiente modo:

Primera operación: leer los caudales $Q(1)$, $Q(2)$, $Q(3) \dots Q(N)$, cuya N varía de 1 a 10; estos valores, una vez leídos se retendrán cada uno de ellos en una memoria, cuyo número de orden se le ha dado de antemano.

Pero cada tarjeta tiene 80 columnas y hay que indicarle cómo debe leer las distintas cantidades que fijan cada uno de los caudales inscritos en esta tarjeta 1; esto se le ordena con otro mensaje:

1 MODELE (10 F 6,2), F 8,3,

que quiere decir que las cantidades Q de la tarjeta 1 son números decimales (indicación F) y que cada número ocupa seis columnas (comprendida la coma, que se encuentra antes de las dos últimas cifras).

Por el contrario, la resistencia R de la tarjeta 1 tiene ocho columnas con tres decimales.

Hasta este momento, la máquina sólo ha leído y guardado los datos en sus memorias; a continuación le damos la orden de ejecutar la primera operación:

FAIRE 30 N = 1,10

30 Z(N) = R * (Q(N) ** 2),

que quiere decir que la tarjeta 30 ordena hacer las operaciones correspondientes a $Z = R Q^2$ para los diez valores de los caudales que tienen registrados por la tarjeta 1. El asterisco en el lenguaje FORTRAN indica una multiplicación y el doble asterisco una potencia.

Una vez realizadas las operaciones indicadas quedan almacenados los valores de Z en otras tantas memorias, hasta que la máquina recibe la tarjeta 31 que le ordena:

IMPRIMER 31 (Z(N), N = 1,10).

A continuación le daremos otra tarjeta *modelo*, en la que le indicaremos cómo debe imprimir los

resultados obtenidos, con lo que queda terminado el programa para realizar esta operación; en lo sucesivo sólo tendremos que dar los datos y la máquina nos dará los resultados.

Todos los problemas se descomponen en un conjunto de cálculos elementales como el del ejemplo. El conjunto de todas las tarjetas forman lo que se llama el Programa General.

Una vez que disponemos del programa general, los datos se le dan de un modo mecánico, y al recibirlos la máquina ya sabe, por el número de cada tarjeta, cuáles son las operaciones que debe de hacer con ellas y en qué memoria conservar los resultados, bien para emplearlos posteriormente o para imprimirlos al final, si se trata de resultados definitivos.

Pasemos ahora al cálculo de redes de distribución.

Actualmente este cálculo se basa en el método de recorridos, que difiere bastante del método clásico de Hardy-Cross; de él dió una idea M. Duvin en la revista *La Houille Blanche* en su memoria de mayo-junio de 1947.

Según este método, en una red de distribución se establece un sistema de ecuaciones lineales, en lugar de la ecuación lineal del método clásico. Con ello aumentamos la convergencia, si bien el sistema sólo es aplicable con las máquinas electrónicas, ya que al tratar de resolver a mano los sistemas de ecuaciones resultantes, podríamos tardar más tiempo, aunque la convergencia fuese mucho más rápida.

No me creo autorizado para divulgar el método de los recorridos, con el que hemos estado trabajando en la Compagnie Générale des Eaux, toda vez que su autor tiene anunciada su próxima publicación; por tanto, me limitaré a indicar el sistema a seguir partiendo del método clásico, que puede servir de punto de partida para quien se interese en estas cuestiones.

Para preparar un programa de cualquier tipo de cálculo que haya de ser ejecutado por las máquinas electrónicas, debemos partir de la máxima generalidad posible.

Así, en nuestro caso de redes de distribución, vamos a generalizar al máximo su definición. Decimos, por tanto, que una red de distribución de agua es un conjunto de depósitos y de ramales o canalizaciones.

Parece ser que de esta generalización excluimos el problema de las estaciones de bombeo; no es así si tenemos en cuenta que la ecuación que define cualquier ramal es del tipo:

$$Z_A - Z_B = F(Q).$$

Cuando el ramal es una canalización sencilla, la ecuación

$$F(Q) \text{ es } R Q^2;$$

si, por el contrario, en este ramal se encuentra una estación de bombeo, la ecuación

$$Z_A - Z_B = F(Q) \dots$$

tendrá una forma distinta a la anterior, toda vez que estará definida por las características de la bomba.

Veamos entonces qué es lo que sucede en un ramal que va desde el punto 4 hasta el punto 5, y que entre estos dos puntos existe una estación de bombeo; desde el punto 4 hasta la arqueta de aspiración de la bomba podemos considerarlo como un ramal cuya característica es RQ^2 ; la arqueta de aspiración de la bomba la consideramos como un depósito y, por tanto, este tramo parte del ramal 4 al depósito A; por ejemplo, a continuación, desde este depósito hasta la salida de la bomba tenemos un ramal, AB, que parte de un depósito y que va al punto B de una tubería; este ramal está definido por la ecuación $F(Q)$, que es la característica de la bomba. A partir del punto B hasta el nudo 5, tenemos un ramal ordinario cuya característica es RQ^2 ; vemos, por tanto, que el problema que se presenta con una estación de bombeo queda perfectamente definido dentro de la generalización que hemos dado a la red de distribución como un conjunto de depósitos y de ramales o canalizaciones.

De este modo podemos preparar el Programa General para aplicar el método de Hardy-Cross a una red de distribución de aguas cualquiera, ordenándole a la máquina que haga todas las operaciones necesarias para cerrar cada una de las mallas, encontrar el caudal de corrección, retener esta corrección en una memoria para usarlo en las otras mallas que tengan un ramal común con ésta, y así sucesivamente hasta que el máximo de los caudales de corrección que hayamos obtenido sea inferior a la precisión que hayamos exigido para el cálculo.

2.ª etapa: *Indicación de los datos.* — Disponiendo de este programa, vamos a ver de qué modo le damos los datos a la máquina para que actúe con ellos. Existen dos clases de datos: aquellos que son fijos o constantes para toda clase de cálculos que se puedan presentar y que los tendremos en unas tarjetas que se han perforado de una vez para siempre, y aquellos otros datos que son específicos del problema que tratamos.

Entre los primeros están los tres siguientes:

- A) Resistividad de las conducciones.
- B) Características de las bombas.
- C) Cotas de los depósitos.

Entre los segundos se encuentran:

- A) Los caudales.
- B) Resistencia de los diversos ramales.

Los primeros datos o constantes para cualquier problema, hemos dicho que se tienen ya en cartas perforadas de una vez para siempre.

El primero de ellos, la resistividad de los conductores o de las tuberías, viene definida por un número, desde el 1 hasta el 35, correspondiente a los diámetros que van desde 40 mm. hasta 2 m. de tal modo, que si a la máquina se le da una indicación del diámetro número 11 en la tarjeta correspondien-

te, sabe que este diámetro 11 corresponde a una tubería de 150 mm. y que su resistividad es de 36 080.

Así, en la tarjeta que ordene a la máquina calcular la resistencia de un ramal, vendrá escrito un número de nueve cifras, tal como el siguiente: 0 37 11 1750, que la máquina lo leerá así: el ramal número 37 es una tubería número 11, es decir, de 150 mm. de diámetro, y tiene una longitud de 1 750 metros.

La máquina, al darle estos datos, buscará en la memoria-catálogo cuál es la resistividad del conducto de diámetro número 11, y en 1/4000 de segundo multiplicará esta resistividad por la longitud que se le ha dado y dejará el resultado retenido en la memoria correspondiente al ramal número 37 para poderla utilizar en cálculos sucesivos.

Pasemos ahora a las características de una bomba.

La característica de una bomba es una curva experimental no susceptible de definición analítica precisa; conviene, para la utilización de la máquina electrónica, definir las curvas características por medio de una curva algebraica; para ello, definimos cinco puntos de dicha curva y escribimos una ecuación, que en principio fué:

$$Z = A + BQ + CQ^2 + DQ^3 + EQ^4;$$

con ayuda de la máquina se hallan los coeficientes

$$A, B, C, D \text{ y } E,$$

y con ellos conocidos, interpolamos cualquier otro punto de la curva. Esta ecuación no daba resultado muy satisfactorio y se ha sustituido por la siguiente:

$$Z = A + BQ \pm \sqrt{C + DQ + EQ^2},$$

que se aproxima más a la forma ordinaria de las curvas características de los tipos de bombas más empleados en las redes de distribución.

Pero en una estación de bombeo, por lo general, no existe sólo una bomba, sino que pueden haber varias del mismo o de distinto tipo; para ello es suficiente darle a la máquina una lista del tipo de bombas que contiene cada estación; por ejemplo:

3 bombas del tipo 1,

4 bombas del tipo 2,

y la máquina, automáticamente, hallará las coordenadas de los puntos que definen la curva característica resultante de las distintas bombas que estén funcionando en un momento dado. Es más, podemos darle en el programa la orden a la máquina para que encuentre cuál es la combinación de bombas más económica para cada tipo de caudal, es decir, que al final de los cálculos tendremos una lista de las bombas que debemos poner en marcha para cada hora del día,

de acuerdo con las necesidades del abastecimiento de agua.

Quedan, por último, las constantes de los depósitos; éstas son las cotas del depósito vacío, del depósito lleno o del depósito a cota media que puede utilizarse para hacer estos problemas.

En este momento queda terminado el catálogo de constantes generales; es necesario indicárselo a la máquina, y para ello es suficiente enviarle una tarjeta perforada con el número 4 en la primera columna, convencionalmente, de acuerdo con el programa general; interpreta de este modo la cifra 4. El catálogo de constantes general se ha terminado, las tarjetas que vienen a continuación son tarjetas de datos parciales. El número de tarjetas de datos parciales es 22; vamos a enumerarlas del modo más escueto posible, con objeto de no alargar demasiado este artículo.

Tarjeta núm. 1: Puesta a cero. — Ordena a la máquina que borre cualquier resultado anterior que haya podido hacer y que tenga almacenado en su memoria.

Tarjeta núm. 2: Bombas utilizadas. — Como disponemos ya del conjunto de tarjetas de todos los tipos de bombas que tenemos, solamente deberemos de darle a la máquina una tarjeta que indique el número de las bombas que utilizamos en este ensayo y el tipo de cada una de ellas; así, por ejemplo, si le damos una tarjeta núm. 2 que ponga 210, quiere decir que la estación funciona con:

- 2 bombas del tipo 1,
- 1 bomba del tipo 2,
- 0 bomba del tipo 3.

Se parte de que en una estación de bombeo no hay más de tres tipos diferentes de bombas.

Tarjeta núm. 3: Resistividades. — Ya hemos indicado anteriormente cómo se le da la resistividad de una tubería, su longitud y en el tiempo en que la máquina hace la operación, de la cual se deduce la resistencia de este trozo.

Tarjeta núm. 4: Depósitos existentes. — En esta tarjeta, una por cada depósito, se ponen las cotas del depósito vacío, y del depósito lleno, en metros, y su capacidad, en metros cúbicos.

Tarjeta núm. 5: Precisión de los cálculos. — En esta tarjeta se le indica a la máquina que cuando la mayor corrección sea inferior a la cifra fijada, debe de detener todos sus cálculos.

Tarjeta núm. 6: Estado de los depósitos. — Sirve para indicar a la máquina si el depósito debe de estar lleno, vacío o con un porcentaje de su capacidad, así como también si queremos que el depósito trabaje a un caudal fijo impuesto, o si, por el contrario, que se encuentre fuera de servicio, es decir, cerrada la válvula de salida de él.

El primer número de la tarjeta indica el del orden

del depósito, y el siguiente, el estado en que se encuentra; de modo que si tenemos 351, quiere decir que el depósito 35 está vacío; 352, que el depósito 35 está a la cota media, y 353, que el depósito 35 está lleno. Existe también la posibilidad de hacer el estudio del llenado de los depósitos; para ello se le ordenará a la máquina, mediante una convención, que nos estudie en cada hora del día la situación de los depósitos, y con ello conoceremos las reservas que podemos tener de agua en cualquier instante que se desee.

Tarjeta núm. 7: Estado de las estaciones de bombeo. — El principio es análogo al anterior; por una convención de números, indicamos que en un momento dado la estación de bombeo esté funcionando a altura constante, a caudal constante, fuera de servicio o con una combinación de bombas que podamos escoger.

Tarjeta núm. 8: Resistencia de los ramales. — En estas tarjetas será para cada ramal el número que le corresponde, el número de la tubería y su longitud, con lo cual la máquina hará las operaciones correspondientes para deducir la resistencia de todos estos ramales.

Tarjeta núm. 9: Modificación de la resistencia. — Esta sirve para estudiar una red de distribución, variando la resistencia de algunos de sus ramales.

Es decir, en un estudio de la red de una ciudad, podemos desear saber qué sucede cuando en tal ramal o tal conjunto de ramales modificamos el diámetro que tienen en el primer estudio por otro distinto.

Con ello, al recibir la máquina la tarjeta núm. 9, rehará todos los cálculos necesarios para darnos las cotas y los caudales correspondientes a la red que estudiamos, en la que se han variado los ramales que se indican en esta tarjeta núm. 9.

Tarjeta núm. 10: Mallas agrupadas. — En esta tarjeta indicamos aquellas mallas que tienen un ramal común, de modo que los resultados de una de ellas deben influir en la siguiente al modificar el caudal de este ramal común a ambas.

Tarjeta núm. 11: Caudales en los nudos. — En esta tarjeta se indican los consumos que tienen cada uno de los nudos de la red de distribución que estudiamos.

Tarjeta núm. 12. — Es ésta una tarjeta *standard* que provoca la inscripción de los caudales exteriores, y el coeficiente K por los cuales se ha multiplicado; normalmente, este coeficiente K en el primer ensayo es 1.

Si para un ensayo posterior queremos efectuar algunas variaciones en los caudales exteriores de algunos nudos, colocamos la tarjeta núm. 12 inmediatamente después de la 11 y ello provocará que en este cálculo los caudales de la tarjeta núm. 11 queden reemplazados por los de la 12.

Tarjetas núms. 13 y 14. — La núm. 13 no debe ser introducida más que si en el estudio precedente existe una tarjeta núm. 12; ella provoca la lectura de

los caudales exteriores al tambor y permite, por otra parte, si es necesario, la corrección de siete caudales en siete nudos distintos. Si hay más de siete caudales a corregir, se llevan las correcciones siguientes a tantas tarjetas núm. 14 como sean necesarias, puesto que la tarjeta núm. 14 no tiene más objeto que la corrección de estos caudales.

Tarjetas núm. 15 y 16: Inscripción y lectura de los caudales exteriores al tambor. — Estas dos tarjetas han sido perforadas de una vez para siempre.

La tarjeta núm. 15 debe introducirse por lo menos a partir del segundo ensayo y provoca las inscripciones en el tambor como caudales de partida para un estudio posterior, los caudales interiores del estudio precedente y el coeficiente K que corresponde a este estudio.

La tarjeta núm. 16 no se debe introducir más que si en el curso de un estudio precedente existe una tarjeta núm. 15; ésta provoca la lectura inmediata de los caudales interiores inscritos en la última tarjeta número 15.

Tarjeta núm. 17: Coeficiente K . — También esta tarjeta ha sido establecida previamente con un número suficiente de ejemplares para que tengan en cuenta todos los posibles valores de K que normalmente se usan en el cálculo de una red de distribución.

Tarjeta núm. 18: Constitución de las mallas. — Esta tarjeta núm. 18, en el cálculo del método de Cross, define los ramales de que consta cada una de las mallas; en el método de los recorridos, indica la constitución de cada uno de éstos.

Se perforará una tarjeta para cada una de las mallas que estudiemos.

Tarjeta núm. 19: Relación de las mallas con un ramal común. — En esta tarjeta deben establecerse aquellas mallas que tienen un ramal común y que, por tanto, la corrección que se obtenga en una de ellas debe influir en la otra.

Tarjeta núm. 20: Nudo con un caudal constante. Existe el caso de que en algunos puntos determinados de la red tengamos que tomar un caudal constante para cualquier valor de K ; en este caso, lo anotaremos en esta tarjeta, que hará que en todos los cálculos que realicemos los caudales en estos puntos no serían influidos por los valores de K que tomemos en cada uno de los estudios que hagamos.

Tarjeta núm. 21: Fin de lectura de los datos. — Es una tarjeta *standard* en que se indica simplemente que el estudio ha terminado.

Por tanto, esta tarjeta se colocará al final de cada uno de los ensayos que hagamos para la red de distribución e indicará a la máquina que en ese momento deben dar comienzo los cálculos correspondientes a este estudio parcial.

Tarjeta núm. 22: Fin de los cálculos. — Esta tarjeta es la última que debe de ponerse en el paquete correspondiente a todos los estudios de una red de distribución.

Provoca, entre otras cosas, la parada definitiva de la máquina.

Con esto tenemos ya una idea general del número y clases de tarjetas que hay que perforar para el estudio de una red de distribución.

Resumiendo un poco, vemos que estos cálculos pueden dividirse en dos: los primeros de ellos, de tipo manual, que no difieren prácticamente de los que hay que ejecutar para resolver a mano un problema de red de distribución, y los segundos, aquellos que se encomiendan a la máquina y que constituyen el verdadero cálculo electrónico.

La primera parte o cálculo manual, no hay modo de evitarla hasta ahora; debemos preparar el esquema general de la red, hacer unos tanteos de distribución, rellenar una serie de tarjetas que han de ser perforadas mediante las máquinas correspondientes y preparar todas las variantes que queremos hacer intervenir en el cálculo, bien para escoger entre ellas cuál es la que mejor resulta, o bien para conocer el funcionamiento de la red a las distintas horas del día, en las que puede variar el coeficiente K de distribución o pueda haber unos caudales exteriores que sólo intervengan en unas determinadas horas.

Una vez que tenemos ordenado el cálculo y perforadas todas las tarjetas, nos vamos a la máquina electrónica; supongamos que hemos escogido el ordenador 704 de la I.B.M.

Pedimos ahora con cierta anticipación, ya que suele estar muy solicitado, el empleo de esta máquina, y una vez que nos lo concedan, nos iremos allí con nuestro paquete de tarjetas-datos.

Normalmente tenemos ya preparado el programa general para este tipo de cálculo, que puede estar archivado en los archivos generales de la I.B.M.

Colocado el programa general en la máquina, no tenemos más que situar nuestro paquete de tarjetas y poner en marcha el reloj contador de los minutos; al cabo de un número reducido de éstos, puede ser del orden de diez a quince minutos, para el cálculo de una red de determinada importancia, tendremos registrados ya en una banda magnética todos los resultados.

Esta banda magnética se lleva a la unidad de impresión, y a la velocidad de 150 líneas por minuto, quedarán impresos los resultados de un modo perfectamente claro y legible, que pueden ser llevados como forma definitiva a los planos correspondientes.

Del mismo modo que hemos estudiado la red de distribución de aguas, podría prepararse un programa para estudiar cualquier género de estructura reticular, cualquier cálculo de golpe de ariete o la presa más complicada que se nos pueda ocurrir.

Ahora bien, la preparación de un programa para cualquier tipo de cálculo que se nos presente, es muy laboriosa; por ejemplo, el programa que tiene la Compañía de Aguas de París ha tardado aproximadamente un año en elaborarlo; bien es verdad que disponiendo de él, todos los cálculos en lo sucesivo

ya son francamente sencillos. Igual sucederá si queremos preparar un programa para alguno de los cálculos que he indicado; por ello no es factible el uso de estas máquinas electrónicas más que para Sociedades, Instituciones u Oficinas Centrales que tengan que resolver muchísimos problemas de un tipo determinado, en estos casos queda perfectamente justificada la preparación con todos los casos que se puedan presentar, ya que el tiempo que empleamos en su elaboración hemos de ahorrarlo más que con creces, cada vez que se nos presente el problema particular.

En nuestro país, específicamente para al cálculo de cuestiones hidráulicas, podría tener una aplicación esto que he intentado explicar, si por el Ministerio o por cualquier otra entidad se montase una oficina de cálculo que llevase la responsabilidad de todos los proyectos que se elaboren en España; en este caso, esta oficina sería la indicada para preparar los programas generales que fueran necesarios, de acuerdo con los distintos tipos de cálculo que tuvieran que resolver.

A esta oficina recurriríamos todos los proyectistas después de haber preparado la parte práctica del proyecto, que sólo aquel que lo estudia sobre el terreno puede llegar a conocer con suficiente perfección. Con los datos aportados por el Ingeniero proyectista, esta oficina prepararía todas las tarjetas necesarias para que las máquinas nos calculase los distintos comportamientos de la red con cada uno de los ensayos que a la vista del terreno se crea necesario proponer al cálculo.

Normalmente, después de un primer cálculo con la máquina electrónica y al estudiar sus resultados, puede suceder que se vea la necesidad de introducir alguna variante en el proyecto. Como mantenemos el paquete de tarjetas que nos va a servir de base para el cálculo general, nos bastará, como ya hemos visto, introducir una de las tarjetas de corrección, y sin variar las otras, la máquina nos dará los resultados que obtiene al aplicar los cálculos a la red con la variante últimamente propuesta.

Y es tan cómodo y tan rápido proponer a la máquina el estudio de distintas soluciones que se nos puedan ocurrir, que no cabe duda que de este modo encontraremos la solución ideal, muy difícil de conseguir con los cálculos manuales, pues bien por escasez de tiempo o tal vez por un poco de pereza, se aceptan soluciones en principio válidas, sin estudiar otras que podrían ser mucho mejores.

Y no quiero terminar sin contestar a un comentario que he oído no solamente a algunos Ingenieros extranjeros que hacían los cursos conmigo en París, sino incluso a compañeros que han leído estos apuntes míos antes de publicarlos; decían que a qué tanta complicación si para estudiar una red de distribución de agua es mucho más fácil fijar unos puntos neutros en la red y a continuación calcular todos los ramales,

obligando a que se cumpla la condición de estos puntos escogidos *a priori*.

En principio esto puede ser válido para el cálculo de una red de nueva instalación; con ese sistema no cabe duda que encontraremos una solución al problema; el agua circulará de acuerdo con esta exigencia que le hemos puesto de los puntos neutros; ahora bien, la solución así escogida ¿es la más económica? ¿Es la de mejor funcionamiento? Aquí aparece lo que decíamos anteriormente, que bien por falta de tiempo o por un poco de pereza, admitimos una solución que es válida, pero que de ninguna manera es la mejor de todas.

El problema se complica cuando queremos estudiar el funcionamiento de una red antigua a la que se propone variaciones que mejoren sus instalaciones; pongo por ejemplo el caso de una gran ciudad a la que se intenta mejorar su red de distribución de agua, bien porque la que tenga esté en malas condiciones, o bien porque el aumento de población haya dejado insuficientes las canalizaciones antiguas.

Lo primero que necesitamos conocer es el funcionamiento actual de la red; para ello podemos valer-nos de los métodos teóricos o bien de los métodos prácticos, consistentes en medir alturas manométricas en todos los puntos importantes de la ciudad y de este modo pintar las líneas piezométricas de toda la red. Esto es bastante más difícil de lo que parece, pues habría que disponer de muchos manómetros para que los datos no estén influidos por las distintas horas en que se hagan las lecturas en cada uno de los puntos.

Por ello, es más cómodo hacer el cálculo teórico y después, como comprobación, se puede leer la presión en algunos puntos de la ciudad a las horas de máxima o de mínima para confirmar los resultados obtenidos con el cálculo, bien entendido de que si el cálculo lo hemos seguido con suficiente cuidado, lo más probable al no haber coincidencia entre los resultados teóricos y los prácticos, es que sea la red la que esté mal en lugar de los resultados del cálculo; más de una vez después de mucho rehacer las operaciones se ha descubierto que era una llave o una tubería obstruida desde tiempos antiguos la que hacía cambiar por completo la marcha del agua por toda la red.

Hecha esta primera comprobación o estudio de la red pasamos a introducir todas las modificaciones que creamos conveniente en sus ramales, y así vamos obteniendo su funcionamiento para cada uno de estos casos; del mismo modo conoceremos los caudales y presiones en cada punto para los diferentes coeficientes K de consumo de agua.

Es más, en las grandes ciudades hay dos factores importantes que hacen variar por completo la marcha de una red de distribución. Son las bocas de incendio y las nuevas industrias que necesitan un gran consumo de agua. Para el primer caso tenemos que estudiar el funcionamiento de la red, supuesto que existe uno o más fuegos en distintos puntos de la red, com-

probando que la instalación que proponemos garantice al servicio de bomberos el caudal que necesiten aunque el fuego se haya producido a la hora punta de consumo. La instalación de nuevas grandes industrias consumidoras de agua también cambia por completo el régimen de funcionamiento de una red, y cuando en una ciudad hay que montar una de estas industrias hay que estudiar de nuevo la red para ver no sólo si podemos darle el caudal que precisan en un punto determinado, sino la influencia que en los demás usuarios tendrá esta nueva toma.

Disponiendo del paquete de tarjetas de la red, nos es muy fácil hacer esta comprobación y proponer las variaciones necesarias para garantizar el nuevo suministro.

Como vemos, el estudio de una red de distribución de aguas en una ciudad relativamente grande es tan complicado que es prácticamente imposible poderlo realizar a mano so pena de tener un equipo de técnicos especializados trabajando muchos meses, y aun así sería muy difícil llegar a los resultados que obtendríamos con una máquina electrónica.