

UN METODO DE CALCULO DE REDES MALLADAS DE DISTRIBUCION DE AGUAS

Por Antonio RUIZ REQUENA
Ingeniero de Caminos

En el presente artículo se describe un procedimiento de cálculo de redes malladas de distribución de agua, totalmente desvinculado del método de Cross, ya que es un método de dimensionamiento directo, no iterativo, inspirado en criterios racionales de economía y funcionalidad, y cuya aplicación manual no ofrece dificultad alguna.

INTRODUCCION

En la actualidad casi todas las redes malladas que se proyectan para abastecimiento de agua, se calculan por método de Hardy-Cross o alguna de sus variantes. Esto es debido a que con la utilización de los ordenadores electrónicos, se ha aliviado el penoso proceso de cálculo que requería una red de tamaño mediano.

El procedimiento general del método de Cross consta esencialmente de las siguientes fases:

a) Asignación de caudales a los distintos conductos de la red. Con ello se está diseñando a grandes rasgos el sistema de funcionamiento de la misma, que más tarde, podrá corregirse en cuestiones de detalle pero no podrá cambiarse básicamente.

b) Obtención de diámetros a partir de los caudales fijados y de unas velocidades que se consideran óptimas.

c) Aplicación del método de cálculo propiamente dicho, redistribuyendo los caudales circulantes y equilibrando las presiones. Es un método iterativo basado en las leyes de Kirchhoff.

En los nudos: $\sum q = 0$

En las mallas: $\sum h = \sum j.l. = 0$

d) Comprobación de las pre-

siones resultantes en el conjunto de la red.

e) Si el resultado no es satisfactorio, se cambian los diámetros necesarios y se realiza una nueva comprobación.

En nuestra opinión este procedimiento, que es muy adecuado para resolver problemas de explotación de una red ya construida o al menos ya diseñada, no es el idóneo para el cálculo de una nueva red.

Nuestra crítica a la utilización del método de Cross, en proyectos se refiere a un aspecto general y a varios aspectos concretos.

En primer lugar, hay que señalar que es un procedimiento de cálculo indirecto, ya que se comprueba una solución previamente diseñada, lo que en el fondo supone una cierta impotencia de cálculo. El diseño previo, por otra parte, se hace a sentimiento, basado en la experiencia del proyectista, lo que puede tener sus ventajas y sus inconvenientes.

La obtención de los diámetros, a partir de los caudales a transportar y de una velocidad considerada óptima, puede ser un criterio aceptable desde un punto de vista funcional, pero no es un criterio económico. A grandes rasgos podemos decir que el diámetro óptimo de un conducto es función de su caudal y de su posición en la red (1). El método de Cross, por

otra parte, no entra en estos aspectos económicos.

En esta línea crítica hay que mencionar la aportación del ingeniero chileno Munizaga, incluida en un interesante trabajo recientemente publicado en nuestro país (2). En esencia consiste en introducir una nueva relación entre caudales y diámetros basada en aspectos económicos o, lo que es lo mismo, una expresión analítica del diámetro óptimo, del tipo,

$$d = K q^m$$

Con esta modificación, las leyes de Kirchhoff se pueden expresar, después de dar valores a los exponentes, de la siguiente forma:

En los nudos: $\sum q = 0$

En las mallas: $\sum q^{0.5} l = 0$

No describiremos el método en forma permenorizada. Sólo indicaremos que se aplica un procedimiento iterativo formalmente igual al de Cross, pero sólo con datos del problema; existe una asignación previa de caudales, pero sin dimensionamiento previo de diámetros. Es, en definitiva, un método de dimensionamiento, no de verificación.

Por último, el motivo de ese trabajo es intentar exponer un método de cálculo totalmente desvinculado del procedimiento de Cross. Es un método de dimensionamiento directo, no iterativo, inspirado en criterios racionales de economía y que, si bien puede aplicarse mediante ordenadores, su aplicación

UN METODO DE CALCULOS DE REDES MALLADAS DE DISTRIBUCION DE AGUAS

manual no ofrece dificultad alguna.

METODO DE CALCULO

A Bases de Cálculo.

El método se basa en dos premisas fundamentales:

1) El abastecimiento de cualquier punto de la red, desde el depósito suministrador, se realiza por el camino más corto.

2) La cota piezométrica en cualquier punto de la red, en las condiciones de cálculo, es función exclusivamente, de su distancia mínima al depósito de abastecimiento.

La primera premisa, que se basa en un criterio racional de economía, nos determina en gran medida la asignación de caudales. La segunda nos fija las pérdidas de carga y, en consecuencia, los diámetros.

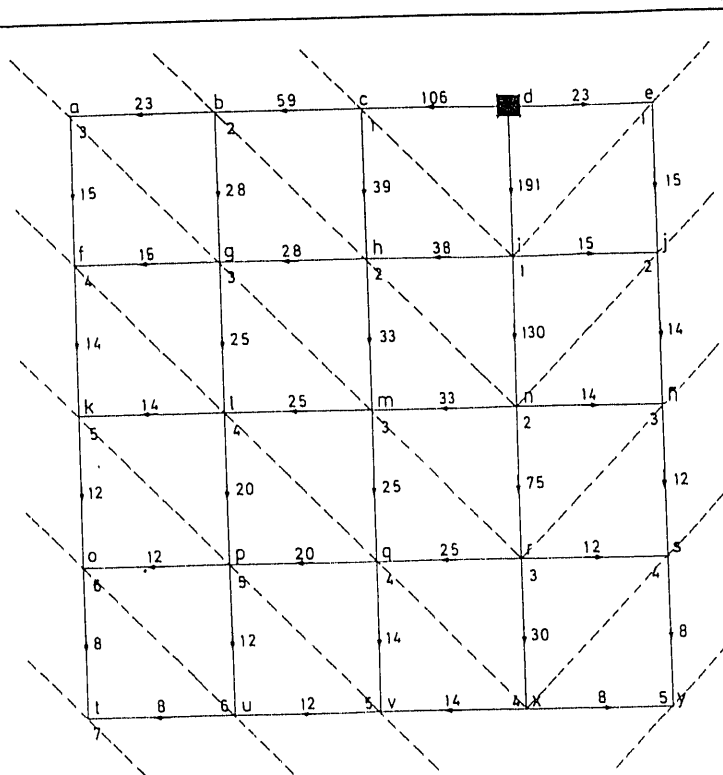
De todas las posibles rutas a seguir para abastecer un punto desde el depósito habrá una o varias que supongan un recorrido mínimo; el abastecimiento se realizará por ellas y al punto en cuestión puede asociarse unívocamente esta distancia (L_i). De los distintos conductos que se unen en un nudo de la red sólo son suministradores de caudal los que están integrados en una ruta mínima, los demás serán evacuadores, y de acuerdo con la segunda premisa a lo largo de la ruta habrán sufrido idénticas pérdidas de carga, por lo que el nudo estará equilibrado y no será necesario ninguna comprobación posterior. A continuación exponemos más detalladamente el procedimiento de cálculo a seguir.

B Procedimiento de cálculo

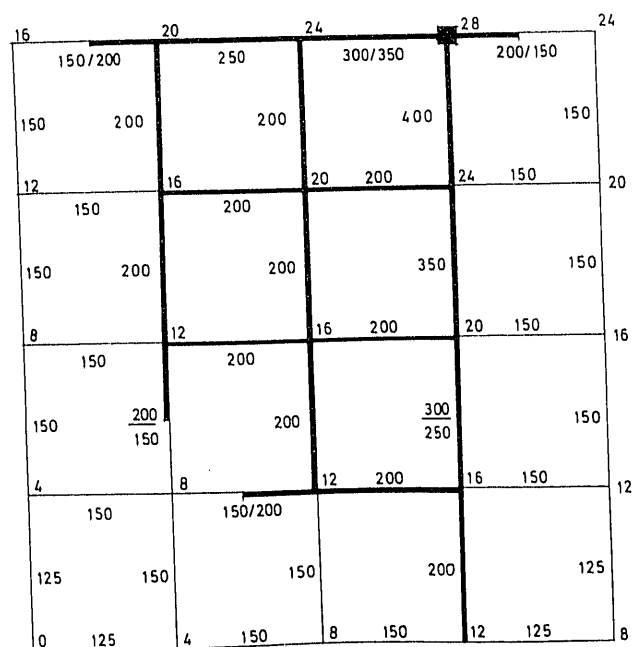
El proceso de cálculo está integrado por las siguientes fases:

a) Determinación de la distancia mínima de cada nudo de la red al depósito y ruta o rutas, que es necesario seguir.

Esto es un problema clásico de Investigación Operativa que puede resolverse de distintas maneras. Existe una solución matricial del problema que da las



a). Distancias mínimas y caudales.



b). Presiones y diámetros.

Figura 1: Cálculo de una red mallada.

UN METODO DE CALCULO DE REDES MALLADAS DE DISTRIBUCION DE AGUAS

distancias mínimas pero no las rutas seguidas, por lo que es inútil en nuestro caso. La solución gráfica es especialmente adecuada a nuestro problema ya que se realiza sobre el diagrama de la red y ofrece los dos resultados necesarios siendo por otra parte de muy fácil aplicación (3).

Explicaremos el proceso con un caso concreto, por ejemplo, el de la red de la figura 1-a. Partiendo del depósito, nudo d, con distancia al origen O, pasamos a todos los nudos que tienen conexión directa con él, en nuestro caso c, i y e, en los que ya podemos anotar su distancia al mismo y el sentido de circulación del agua en los tres tramos. A continuación, se pasa a un punto contiguo a los ya estudiados, el j por ejemplo, y a él se puede llegar por tres rutas distintas, desde los nudos e, i y ñ; pero sólo son rutas mínimas las dos primeras. Se anota la distancia mínima y el sentido de circulación de los tramos. De esta forma, se sigue el procedimiento hasta finalizar la red.

En el caso de la figura 1-a, suponiendo que todos los tramos son iguales, con una longitud de 1.000 metros cada uno de ellos, hemos señalado la distancia mínima, en kilómetros de cada uno de los nudos. El más alejado sería el nudo t que dista 7.000 metros. En la figura se han dibujado las isolíneas de distancias que coincidirán, en cuanto a forma, con las isopiezas de la red.

b) Asignación de caudales.

Conociendo el sentido de circulación en cada tramo de la red, nos es necesario ahora cuantificar el caudal de cada uno de ellos.

Debemos señalar, en primer lugar, que no es necesario concentrar los consumos en los nudos, aunque tampoco hay ningún obstáculo para hacerlo; sin embargo, preferimos utilizar un consumo por metro lineal de tubería, salvo que nos encontremos ante uno verdaderamente puntual.

Comenzaremos por uno de los nudos extremos de la red, en la figura el t o y. Si ponemos un consumo de cálculo de 0,008 l./m.l. el consumo propio del

tramo t u será de 8 l., que se suministrará desde el nudo u; sin embargo, a este nudo puede accederse desde los nudos p y v, ambos integrados en rutas mínimas, y aquí se nos plantea un primer problema de elección, que es decidir si debemos realizar suministros por uno sólo de los conductos, o debemos dividir el caudal entre ambos.

Las dos soluciones posibles son razonables. Por el primer sistema, aplicándolo como criterio general, llegamos a acumular caudales en unas arterias principales. Este sistema tiene la ventaja de la obtención de mayores economías, pero como contrapartida, en la concepción de la red resultante, el sistema de funcionamiento se acerca al de una red ramificada. Con el segundo criterio, que hemos aplicado en nuestro ejemplo, se obtiene una red algo más cara, pero más armónica y equilibrada en caudales y, por tanto, en diámetros.

De esta forma, en los conductos $\underline{u}$, $\underline{v}$ y $\underline{u}$, $\underline{p}$ obtenemos unos caudales de 12 l./seg. como suma de su caudal propio más la mitad del suministrado por el nudo u al conducto t u. De la misma forma operaremos en toda la red hasta llegar al depósito. (Fig. 1-a.)

c) Fijación de las líneas piezométricas.

Para fijar las líneas de pérdida de carga de los conductos ponemos dos condiciones; que la cota piezométrica de cada punto sea, exclusivamente función de su distancia mínima al origen y, lógicamente, que sea decreciente en el sentido de los caudales.

Estas líneas, normalmente poligonales, pueden ser de pendiente uniforme, cóncava o convexas, o una combinación de varias leyes. Examinaremos a continuación sus ventajas e inconvenientes.

La línea de carga con la concavidad hacia abajo es la ley resultante de dimensionar una red partiendo de una velocidad óptima, 1 m./seg. por ejemplo, en todos los conductos.

Esta ley, funcionalmente adecuada, desde un punto de vista económico no es aconseja-

ble, llevándonos, además, en la práctica a la utilización de una amplia gama de diámetros.

El criterio de economía nos conduce, al igual que en conducciones de caudal variable y redes ramificadas (2) (4), a una ley de pérdida de carga con la concavidad hacia arriba. Con este criterio obtenemos, por otra parte, una menor gama de diámetros a utilizar, con las ventajas que de ello se derivan; pero, por el contrario, se produce una mayor dispersión en las velocidades que, en algún caso extremo, pueden superar los límites normalmente autorizados. Por último, la red así proyectada tiene una mayor elasticidad en su respuesta a una posible sobrecarga en el consumo y a otras alteraciones de explotación.

La pérdida de carga uniforme es un caso intermedio, muy cómodo de aplicar, entre los dos examinados más arriba. En otros muchos casos, la ley a adoptar nos vendrá fijada por los condicionamientos topográficos, pudiendo ser una combinación de las anteriores.

En los cálculos usamos normalmente una expresión recurrente del tipo siguiente:

$$J_i = K \frac{H_i}{L - L_i}$$

Donde K = constante que toma los siguientes valores:

$K > 1$ línea de carga cóncava hacia abajo.

$K = 1$ pérdida de carga uniforme.

$K < 1$ línea de carga cóncava hacia arriba.

H_i = Altura disponible en el punto i.

L_i = Distancia al depósito del punto i.

L = Distancia al depósito del punto de la red más alejado.

Supongamos, en el ejemplo que desarrollamos (fig. 1-b), que la red es plana y horizontal, y tenemos una altura disponible de 28 metros. Si usamos una pérdida de carga uniforme en toda la red, ésta será:

$$j = \frac{28}{7.000} = 0,004 = 4 \text{ m./km.}$$

UN METODO DE CALCULOS DE REDES MALLADAS DE DISTRIBUCION DE AGUAS

Con esta ley de pérdidas de carga podemos calcular la altura disponible y consecuentemente la cota piezométrica de cada nudo.

d) Cálculo de diámetros.

Conocidos en cada tramo el caudal circulante y la pérdida de carga se obtiene inmediatamente el diámetro, o combinación de diámetros, necesarios en el mismo. Hemos de hacer notar que en este procedimiento de cálculo no se incluye ninguna limitación ni condicionamiento sobre la estructura de la fórmula hidráulica a utilizar. En la figura 1-b se señalan los diámetros obtenidos en nuestro caso usando un ábaco de las ecuaciones de Prandtl-Colebrook para tuberías de amianto-cemento.

C. CRITICA DEL METODO

El procedimiento de cálculo, tal como se ha expuesto más arriba, tiene un aspecto, el automatismo en la asignación de caudales, que puede ser una ventaja a efectos de programación para ordenador; pero que al mismo tiempo es el origen de un grave defecto, como es la rigidez de la solución que se obtiene que puede resultar incompatible con los condicionantes de tipo constructivo que puedan presentarse.

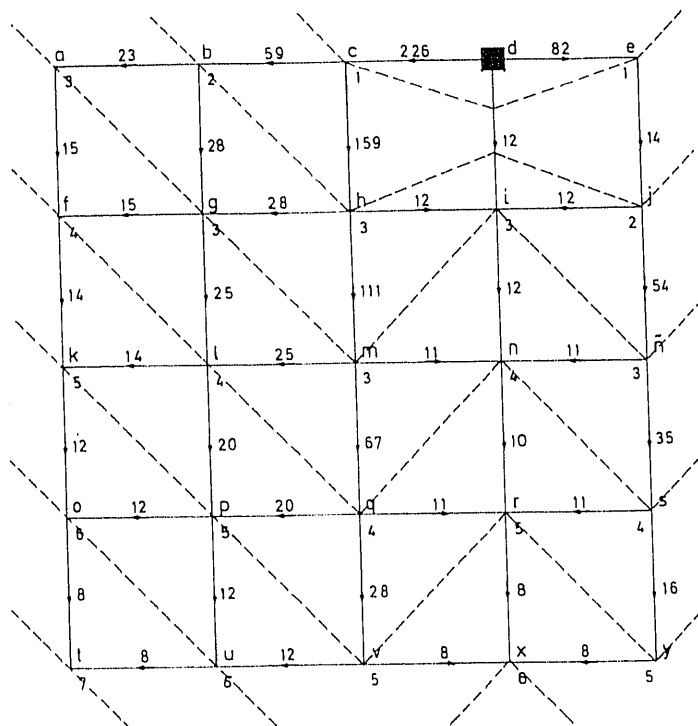
Por otra parte, parece que este procedimiento de cálculo lleva implícitamente una hipótesis, no expresada, de que el terreno no sea muy accidentado.

Queda finalmente por ver su posibilidad de aplicación a tipos de redes más complejas, con alimentación por varios depósitos, elevaciones, etc.

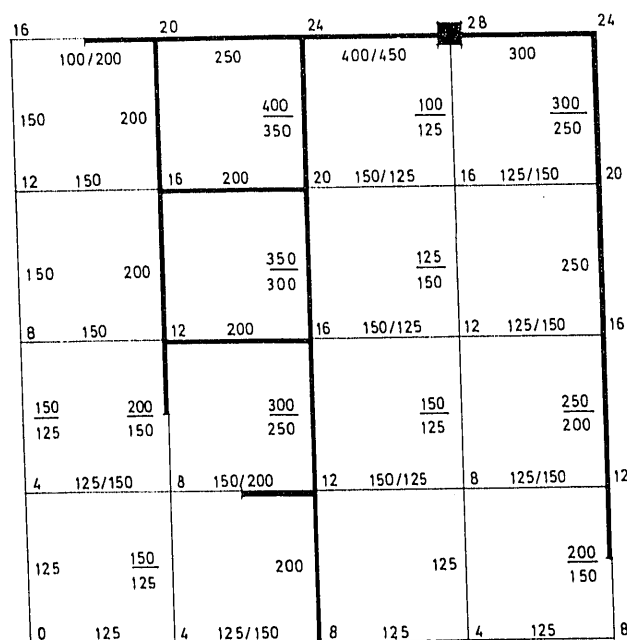
Todos estos problemas, que no vamos a estudiar en detalle, pueden resolverse por medio de los "coeficientes de preferencia".

D. Los coeficientes de preferencia

El coeficiente de preferencia es un sencillo artificio que hace posible la utilización de este procedimiento de cálculo en los casos más variados, dando versatilidad a un instrumento en principio rígido.



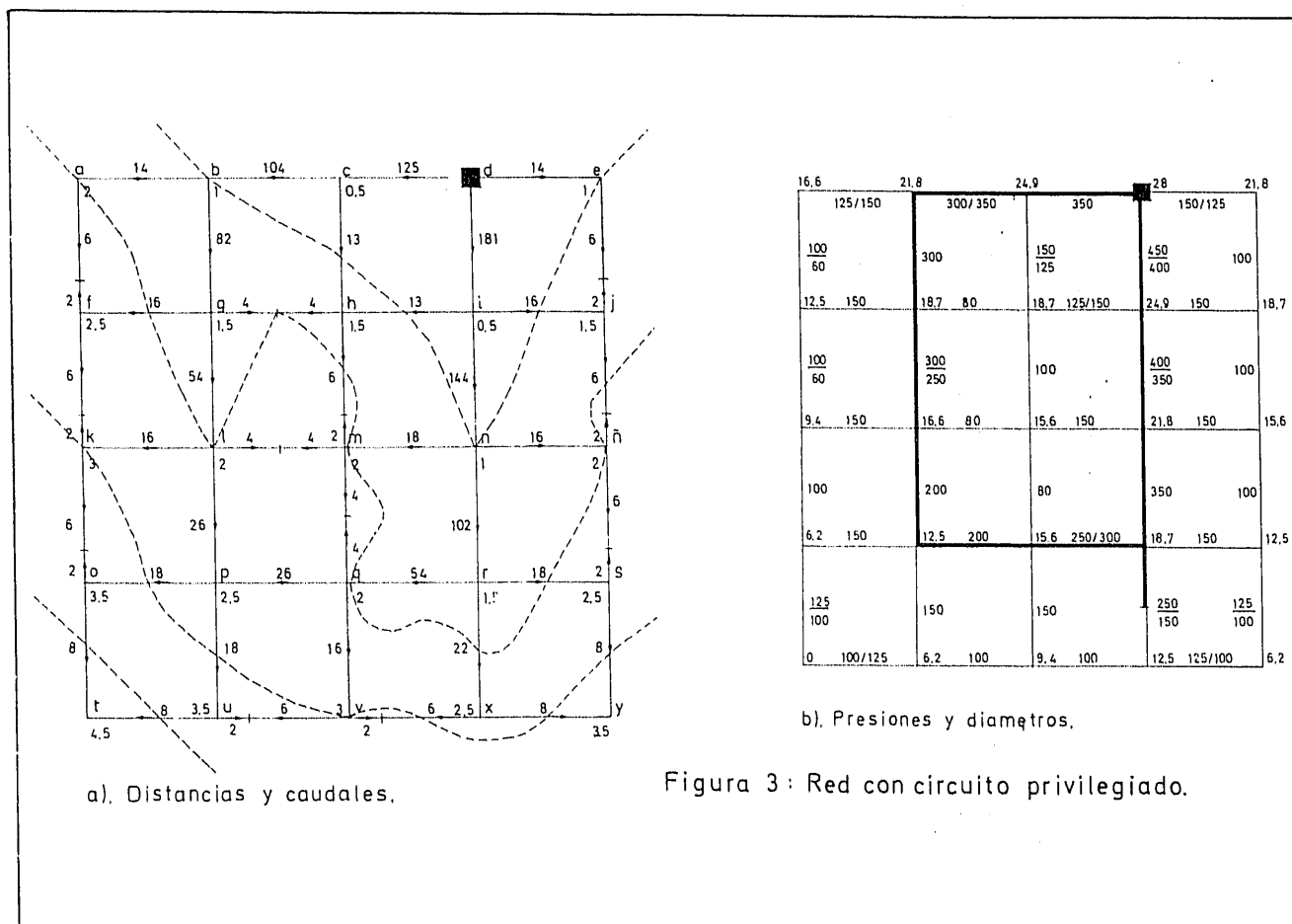
a). Distancias y caudales.



b). Presiones y diámetros.

Figura 2: Red con un tramo penalizado.

UN METODO DE CALCULOS DE REDES MALLADAS DE DISTRIBUCION DE AGUAS



Consiste, en esencia, en no utilizar las longitudes de los tramos para hallar las distancias mínimas al origen, sino unas longitudes ficticias:

$$l'_{ij} = c_{ij} l_{ij}$$

Donde l'_{ij} = longitud ficticia del tramo n

l_{ij} = longitud real

c_{ij} = coeficiente de preferencia

Si $c_{ij} = 1$ el tramo ij es un tramo "penalizado" que hemos alargado de forma ficticia, con el fin de que no forme parte de las grandes arterias de la red, por cualquier motivo. Así hemos hecho en la red de nuestro ejemplo con el tramo $d-i$, resultando la configuración que aparece en la figura 2 ($c_{di} = 3$). Si $c_{ij} < 1$ tenemos un tramo "privilegiado" que hemos acortado de forma ficticia, por lo que atraerá caudales del resto de la red y, al mismo tiempo deberá

tener una menor pérdida de carga, con lo que obtendremos para él un diámetro relativamente grande. Así hemos hecho con todos los tramos del circuito definido por los nudos $d-b-p-r$, formando una arteria de cintura, con el coeficiente 0,5, dando el resultado que aparece en la figura.

De la misma forma podemos proyectar dos redes superpuestas, principal y secundaria, y otras muchas variantes de la red de distribución.

CONCLUSION

En resumen, se ha expuesto un método directo de cálculo de redes de distribución que ha pretendido inspirarse en criterios, racionales y razonables, de economía y funcionalidad, sin olvidar por ello la iniciativa e imaginación del proyectista. Creemos que aparte de la finalidad de cálculo que le es propia, puede ser un instrumento estimable para un estudio más profundo de los aspectos funcionales de las redes malladas y de su optimización económica.

BIBLIOGRAFIA

1. ABRAMOV, N.: Principles of complex calculation of water supply systems using computers. Seventh I.W.S.A. Barcelona, 1966.
2. MUNIZAGA, E.: Redes de agua potable: diseño y dimensionamiento. Monografía n.º 335 del I.E.T.C.C. Madrid, 1976.
3. ACKOFF y SASIENI: Fundamentos de Investigación de Operaciones. Editorial Limusa y Wiley S. A. México, 1971.
4. LABYE, Y et LECHAPT, G.: Methodes permettant de déterminer les caractéristiques optimales d'un réseau de distribution d'eau. Bulletin Technique de Genie Rural, n.º 50. 1961.