

CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO ÓPTIMO DE REDES HIDRÁULICAS EXTERIORES.

Idel Montalvo Arango¹

Resumen – Se presentan consideraciones teóricas, y resultados relacionados con el diseño económicamente óptimo de las redes hidráulicas. Por separado son abordadas las redes de distribución de agua y las redes de evacuación. En el caso de las redes de distribución de agua, se plantean algunos fundamentos teóricos para el diseño económicamente óptimo de estas redes, tomando en cuenta las costos de las inversiones iniciales y los costos de energía entregada, sin perder de vista que se intente garantizar un grado de confiabilidad deseado en el funcionamiento de la red. En el caso de las redes de evacuación, para su diseño económicamente óptimo, se propone el método de programación dinámica acoplado a un algoritmo que genere diferentes variantes de trazado a partir de una configuración general inicial de la red. Son presentados algunos resultados de la aplicación de los fundamentos teóricos que han sido expuestos.

Abstract – Theoretical considerations, applications and examples related to hydraulics networks optimized design are presented. Both water distribution networks and collection networks have been exposed separately. For water distribution networks, theoretical basis of a methodology for optimal design are presented, this methodology takes into account both initial investment costs and energy costs, and allows to develop a water rates distribution to obtain a better network reliability. For collection networks optimal design, it is proposed to use a dynamic programming method.

Palabras clave: Diseño de redes hidráulicas exteriores, optimización de redes malladas de distribución de agua, optimización de redes de evacuación.

Keywords: Hydraulic Networks Design, looped network optimization, collection networks optimization.

¹ Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE) - Facultad de Ingeniería Civil - Centro de Investigaciones Hidráulicas - Avenida 114 # 11901 entre 119 y 127, Marianao, Ciudad de la Habana, Cuba - Teléfono: 537-2601416 – Email: idel@cih.cujae.edu.cu

INTRODUCCIÓN

El diseño y construcción de las redes hidráulicas para la distribución de agua y la evacuación de residuales líquidos, ha captado el ingenio y la dedicación de varios hombres de ciencias. El problema del diseño se ha resuelto cada vez de forma más abarcadora en la medida en que se han ido considerando un mayor número de aspectos en su concepción, producto a las necesidades impuestas por la vida práctica de estos sistemas. Este problema adquiere una connotación mayor a partir de que se pretendió obtener diseños con el menor costo económico posible y que pudieran satisfacer los requerimientos necesarios para que el sistema brinde un funcionamiento adecuado.

La aparición de las computadoras permitió que pudieran obtenerse redes de distribución de agua mejor concebidas; en la década del 70, dos décadas después de la aparición de las primeras computadoras digitales, se hicieron los primeros intentos de optimizar los sistemas de distribución de agua. En la década del 80, aparecieron en Cuba los primeros resultados relacionados con la optimización de las redes de distribución de agua, desarrollados por la Dr Cristina Chiong Rojas y el Dr José Bienvenido Martínez Rodríguez en el Centro de Investigaciones Hidráulicas de la CUJAE.

En el caso de las redes de evacuación de residuales líquidos, el empleo de diferentes métodos de optimización inevitablemente también ha sido acompañado por programas de computadoras que permiten realizar el análisis de muchísimas variantes de diseño en un tiempo razonable. En este sentido el desarrollo acelerado de la computación tanto en software como en hardware, y de manera general el desarrollo de las nuevas tecnologías de la informática y las comunicaciones, ha jugado un papel fundamental. Estas redes, no surgieron del deseo de lograr una mayor comodidad o confort para el hombre, sino como una necesidad práctica para garantizar la salud humana. Está demostrado que el surgimiento de los sistemas de alcantarillado tiene una relación histórica directa con la aparición de las grandes epidemias y aunque están demostrados de manera general los beneficios de los sistemas de evacuación desde el punto de vista de la salud pública, el elevado costo de estos sistemas ha frenado en buena medida su construcción en muchísimos lugares, sobre todo en países del tercer mundo. Por esta razón se han dedicado esfuerzos para buscar metodologías que permitan diseñar sistemas que funcionen apropiadamente y cuyos costos sean los menores posibles. El empleo de métodos de optimización para el diseño de redes de alcantarillado y los estudios relacionados con respecto a los parámetros, condiciones y restricciones de diseño han constituido las mejores vías para concebir sistemas económicamente más aceptables.

En este trabajo se abordará el tema del diseño económicamente óptimo de redes hidráulicas exteriores y se presentarán aplicaciones prácticas y ejemplos concebidos a partir de un software implementado sobre la base de los fundamentos teóricos que aquí se expondrán. Las cuestiones relacionadas con las redes de distribución de agua y las redes de evacuación serán presentadas por separado. En lo referente a las redes de distribución de agua, el trabajo estará centrado fundamentalmente en el diseño de redes malladas.

REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Fundamentos teóricos y formulaciones.

Según su topología, las redes de distribución de agua pueden clasificarse en dos tipos: redes ramificadas y redes malladas. Desde un punto de vista intuitivo, el adjetivo “ramificada” describe una red con aspecto arborescente, que se ramifica desde el punto de alimentación hacia

los puntos de consumo, mientras que el término “mallada” sugiere un aspecto reticular con circuitos cerrados de tuberías (Colectivo de autores, 1996).

En el diseño económicamente óptimo de estos tipos de redes es conveniente una formulación que tome en cuenta tanto los costos de la inversión inicial como los costos incurridos durante la etapa de explotación. Dentro de las inversiones iniciales deben considerarse los costos de tuberías, excavación, rehincho, etcétera; en los costos durante la vida útil deben incluirse los costos de consumo de energía y los costos de operación y mantenimiento. La mejor solución económica será aquella que produzca un adecuado balance de estos costos.

En las redes ramificadas, la determinación de los caudales que circulan por las tuberías, se puede realizar solamente a partir de los consumos de la red, sin necesidad de conocer las características de las tuberías por donde pasa el agua; esto hace que el diseño de estas redes se torne más sencillo que el de las redes malladas y que con mayor facilidad puedan obtenerse métodos que optimicen económicamente estos diseños.

En el caso de sistemas mallados, la formulación del problema de diseño resulta mucho más compleja que en el caso de sistemas ramificados porque es necesario conocer el caudal que circula por la tubería para determinar su diámetro pero este caudal es a su vez función del diámetro de la propia tubería y del resto de los diámetros (Colectivo de autores, 1996).

Hasta el momento, la consideración sólo de aspectos económicos en la optimización del diseño de redes malladas, ha resultado en la eliminación de algunos de los tramos de la red en cuestión, convirtiendo esta en una red ramificada. A primera vista, puede parecer que las redes ramificadas son ciertamente más económicas que las malladas, pero la verdad es que no se ha cuantificado en términos monetarios el perjuicio por falta de suministro, el cual tiene una mayor expresión en el caso de redes ramificadas debido a que la interrupción del servicio en cualquiera de sus tramos provoca también la interrupción del suministro en el resto de los tramos que se encuentren aguas abajo. Por otra parte, en los sistemas mallados la pérdida del servicio en algunos de los tramos de tuberías no implica necesariamente que el suministro aguas abajo quede interrumpido, debido a que existen caminos alternativos por donde el agua puede ser conducida hacia los nodos de consumo aguas abajo. El establecimiento de estos caminos alternativos para la conducción del agua, conocido también como condición de redundancia, hace que se ofrezca una mayor garantía en el funcionamiento de la red, precisamente por esta razón es que en muchos casos se prefiere el empleo de redes malladas en lugar de ramificadas.

Para evitar que cuando se optimice económicamente el diseño de redes malladas se obtengan como resultados redes ramificadas, varios autores han incluido consideraciones adicionales dentro de los aspectos de diseño. Estas consideraciones inicialmente estuvieron encaminadas al establecimiento de valores mínimos para alguna de las variables, como en el caso de (Alperovits y Shamir, 1977) donde se tomó como restricción la utilización de un valor mínimo de diámetro. Por otro lado se trabajó en la obtención de una distribución de gastos inicial, antes de acometer el diseño, tal es el caso de (Chiong, 1985). Trabajos más recientes, entre los que se encuentran (Ostfeld y Shamir, 1996), (Awumah y Goulter, 1991), (Goulter y Coals, 1986), (Xu y Goulter, 1998), y otros, se han dedicado a cuantificar la garantía del funcionamiento de la red para poder establecer dentro de los diseños, ciertos valores deseados de esta garantía, evitándose así la obtención de redes ramificadas.

Tomando como referencia una red similar a la que aparece en la figura 1 a), según quedó planteado en (Chiong, 1985), para resolver el problema de diseño, los gastos que circulan por las tuberías que conforman el circuito, pueden ser expresados en función del gasto que circula por una de esas tuberías; las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) fundamentan esta afirmación, nótese que si

el valor de Q_a fuera conocido, entonces serían conocidos también los gastos de circulación del resto de los tramos de la red.

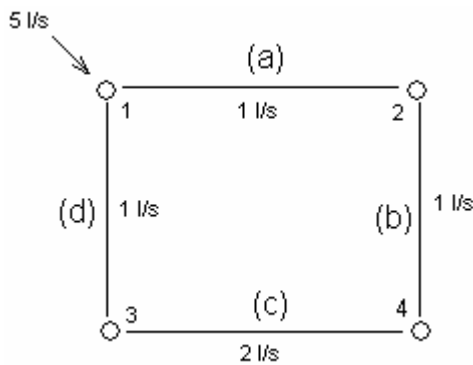


Figura 1 a)

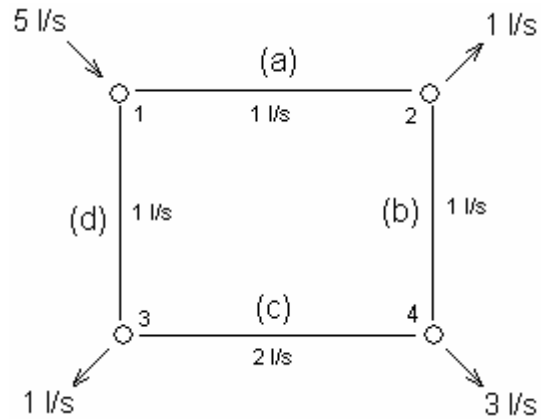


Figura 1 b)

$$Q_{\text{fuente}} = q_a + q_b + q_c + q_d \quad (1)$$

$$Q_d = Q_{\text{fuente}} - Q_a \quad (2)$$

$$Q_c = Q_d - q_d \quad (3)$$

$$Q_b = Q_a - q_a \quad (4)$$

Según los resultados obtenidos por (Chiong, 1985) en la optimización de costos de inversión y energía de una red de distribución de agua, si se toma el ejemplo de la figura 1 a) y se grafica el costo de la red en función del gasto que circula por una de las tuberías de la misma, se obtendría un gráfico similar al de la figura (2), en el cual, los puntos en los que la derivada de la función de costo se hace igual a cero constituyen valores máximos de la función, y los valores mínimos de la función coinciden con los puntos en los que el gasto que circula por alguna de las tuberías se hace igual a cero, lo cual consecuentemente produciría un valor de diámetro igual a cero para esa tubería, significando esto que la variante más económica sería aquella que elimine uno de los tramos de la malla, obteniéndose como resultado una red abierta.

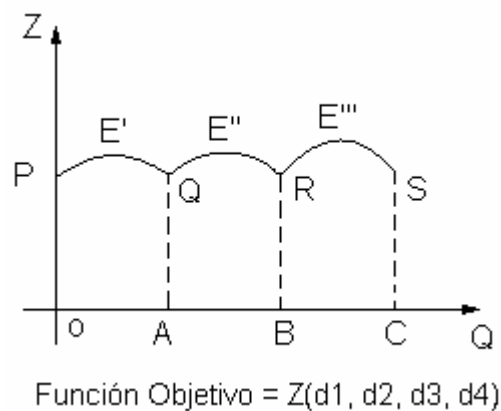


Figura 2 - Gráfico de costo vs caudal obtenido en (Chiong, 1985).

La solución mostrada en (Chiong, 1985), brinda un mínimo global sólo para una distribución de gastos dada, quedando establecido que si se pudiera determinar una distribución óptima de gastos, a partir de ella se podría brindar una solución de mínimo global; por esta razón fue necesario analizar el problema de la distribución óptima de gastos como un problema semi-independiente y que necesitaba de un análisis previo.

La distribución óptima de gastos considerada entonces de forma apriorística y casi aislada de la solución de diámetros, depende a grandes rasgos de la demanda en los nodos, de la geometría de la red, de la topografía y de los requerimientos de operación real (limpieza, existencia de grandes consumidores puntuales, reparaciones, situaciones de emergencia, etcétera); de estos cuatro aspectos, los tres primeros pueden formularse matemáticamente en el contexto de la minimización de los costos de inversión y de energía. Esa minimización en rigor daría como solución una red abierta, ya que la función objetivo para una red cerrada tiene (en función de los gastos) como punto estacionario un máximo. Pero la red de acueducto convenientemente se selecciona mallada, aunque sea más cara, precisamente para cubrir los requerimientos de la operación cuya complejidad no ha permitido llevar a cabo una formulación matemática para ser incluida en la función objetivo (Chiong 1985).

La búsqueda de las causas que provocan que la optimización del diseño de redes malladas resulte en la obtención de redes ramificadas ha llevado a este autor a la revisión de los planteamientos iniciales que tradicionalmente han servido para resolver el problema; como resultado, se ha encontrado que el hecho de que los gastos demandados en los tramos estén representados en los nodos, permite la posibilidad de que pueda satisfacerse la llegada del caudal deseado a cada uno de los nodos y que al mismo tiempo el gasto que circule por algunas de las tuberías sea igual a cero. Evidentemente, si existe la manera de satisfacer los planteamientos realizados para el diseño, excluyendo alguno o algunos de los tramos de la red, es muy probable que la solución más económica sea la que haga precisamente esta exclusión ya que puede lograrse teóricamente el objetivo deseado con un menor número de tramos en la red, lo cual pudiera considerarse en un inicio, económicamente más favorable, pero se estaría perdiendo la posibilidad del establecimiento de caminos alternativos para el abastecimiento de los diferentes tramos de la red.

Los resultados obtenidos en (Chiong, 1985) no serían los mismos si en lugar de utilizar las ecuaciones (1), (2), (3) y (4), se partiera inicialmente de la idea de que cada tramo de tubería pudiera ser abastecido a partir de cualquiera de sus dos nodos extremos o incluso a partir de los dos nodos extremos al mismo tiempo, estableciéndose que para cada tramo se tendrán dos incógnitas que corresponden al gasto que pudiera entrar por uno y otro nodo del mismo, la suma de estos dos gastos para cada tramo debe ser igual al gasto consumido en él, lo cual puede brindar 4 nuevas ecuaciones para resolver el problema de diseño de la red representada en la figura 1; estas ecuaciones corresponden a la (6), (7), (8), y (9), y pueden ser expresadas de forma general según la ecuación (5). Nótese que de esta forma no es posible satisfacer estas 4 ecuaciones y al mismo tiempo asumir que el gasto que circulará por alguna de las tuberías sea igual a cero.

$$Q_{ki} + Q_{kj} = q_k \quad (5)$$

$$Q_{a1} + Q_{a2} = q_a \quad (6)$$

$$Q_{b2} + Q_{b4} = q_b \quad (7)$$

$$Q_{c4} + Q_{c3} = q_c \quad (8)$$

$$Q_{d1} + Q_{d3} = q_d \quad (9)$$

Para facilitar la nomenclatura se tomará que el gasto que entra o sale por el nodo (i) pasando por el tramo (k) será referenciado como (Q_{ki}); por otro lado, el gasto demandado en un tramo (k) será referenciado como (q_k). Los valores de (Q_{ki}) serán negativos cuando el gasto esté entrando al nodo (i) y positivo cuando el gasto esté saliendo del nodo (i).

Aplicaciones y ejemplos.

Se tomará como ejemplo el caso del diseño de la red de la figura 1 a). A los efectos de este ejemplo puede asumirse que el precio de la energía será 0.05 \$/kW-hora y que para todos los tramos de la red se cumple que $f = 0.018$ y la longitud será igual a 100 metros. Los diámetros comerciales y sus precios correspondientes aparecen en la tabla 1) ; los valores discretos de esta tabla pueden ser representados a través de una función de aproximación.

Tabla 1. Diámetros comerciales.

Diámetro (mm)	Costo (\$/m)
150	1.2
200	2.86
250	4
300	5.26
350	6.63
400	8.10

Como función de costo se considerará la siguiente :

$$fc = A_{factor} * \sum_{k=1}^n (l_k * P_{DK}) + \frac{H_{año} * P_e * H * \rho * g * Q}{1000} \quad total \quad (10)$$

Donde:

$$Q_{total} = Q_{a1} + Q_{d1} \quad (11)$$

Siendo:

- $l_k \rightarrow$ Longitud del tramo (k), [m].
- $P_{DK} \rightarrow$ Costo de la tubería de diámetro (D) a colocar en el tramo (k), [\$/m].
- $\rho \rightarrow$ Densidad del agua, [kg/m³]
- $g \rightarrow$ Aceleración de la fuerza de gravedad, [m/s²].
- $P_e \rightarrow$ Precio de la energía, [\$/ kW/hora].
- $A_{factor} \rightarrow$ Factor para anualizar el valor de la inversión en las tuberías (adim.)
- $H_{año} \rightarrow$ Número de horas que se trabajará en un año.
- $H \rightarrow$ Carga necesaria a la entrada de la red.

Para obtener los valores mínimos de costo se igualan a cero las derivadas de (10) con respecto a los diámetros de cada tramo. Cuando se grafica el costo de la red en función del gasto que circula por el tramo (a) saliendo del nodo (1), se obtiene el gráfico 1) si se ha considerado que los gastos de circulación por los tramos queden gobernados por las ecuaciones (1), (2), (3), y (4) ; este gráfico es similar al obtenido en (Chiong, 1985). Si por otro lado se utilizaran las ecuaciones (6), (7), (8), y (9) para gobernar el gasto de circulación por los diferentes tramos de la

red, entonces se obtendría el gráfico 2). La comparación entre las curvas obtenidas puede hacerse a partir del gráfico 3), los valores correspondientes a estas curvas aparecen en la tabla 2).

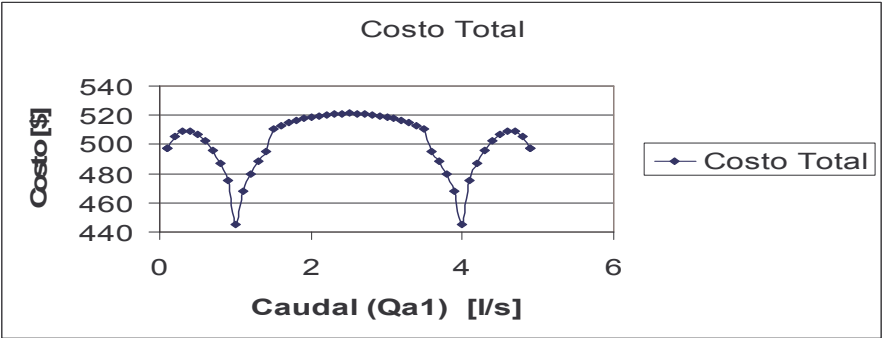


Gráfico 1 - Curva (1), [Costo (1) vs Qa1] usando distribución de gastos tradicional.

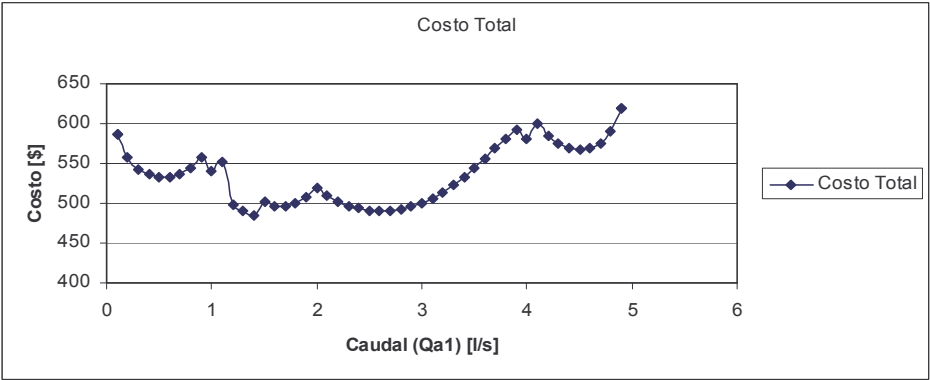


Gráfico 2 - Curva (2), [Costo (2) vs Qa1] usando nueva distribución de gastos.

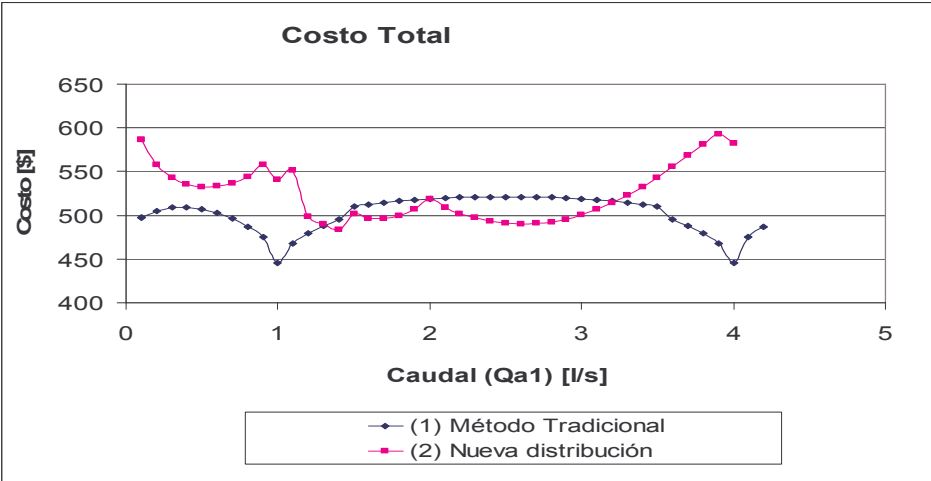


Gráfico 3 – Comparación de las curvas obtenidas.

Tabla 2 - Valores de caudal para cada tubería usando la distribución de gastos tradicional.

Curva (1), [Costo (1) vs Qa1] usando distribución de gastos tradicional.								
Qa1	Qa2	Qb2	Qb4	Qc4	Qc3	Qd3	Qd1	Costo (1)
0,10	0,00	0,00	0,90	0,00	3,90	0,00	4,90	497,43
0,20	0,00	0,00	0,80	0,00	3,80	0,00	4,80	505,39
0,40	0,00	0,00	0,60	0,00	3,60	0,00	4,60	509,11
0,60	0,00	0,00	0,40	0,00	3,40	0,00	4,40	502,31
0,80	0,00	0,00	0,20	0,00	3,20	0,00	4,20	487,33
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,00	4,00	445,17
1,20	0,00	0,20	0,00	0,00	2,80	0,00	3,80	479,76
1,40	0,00	0,40	0,00	0,00	2,60	0,00	3,60	494,82
1,60	0,00	0,60	0,00	0,00	2,40	0,00	3,40	512,76
1,80	0,00	0,80	0,00	0,00	2,20	0,00	3,20	516,29
2,00	0,00	1,00	0,00	0,00	2,00	0,00	3,00	518,79
2,20	0,00	1,20	0,00	0,00	1,80	0,00	2,80	520,40
2,40	0,00	1,40	0,00	0,00	1,60	0,00	2,60	521,19
2,50	0,00	1,50	0,00	0,00	1,50	0,00	2,50	521,28
2,60	0,00	1,60	0,00	0,00	1,40	0,00	2,40	521,19
2,80	0,00	1,80	0,00	0,00	1,20	0,00	2,20	520,40
3,00	0,00	2,00	0,00	0,00	1,00	0,00	2,00	518,79
3,20	0,00	2,20	0,00	0,00	0,80	0,00	1,80	516,29
3,40	0,00	2,40	0,00	0,00	0,60	0,00	1,60	512,76
3,50	0,00	2,50	0,00	0,00	0,50	0,00	1,50	510,53
3,60	0,00	2,60	0,00	0,00	0,40	0,00	1,40	494,82
3,70	0,00	2,70	0,00	0,00	0,30	0,00	1,30	488,19
3,80	0,00	2,80	0,00	0,00	0,20	0,00	1,20	479,76
3,90	0,00	2,90	0,00	0,00	0,10	0,00	1,10	468,02
4,00	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	445,17
4,10	0,00	3,10	0,00	0,10	0,00	0,00	0,90	475,41
4,20	0,00	3,20	0,00	0,20	0,00	0,00	0,80	487,33
4,30	0,00	3,30	0,00	0,30	0,00	0,00	0,70	495,92
4,40	0,00	3,40	0,00	0,40	0,00	0,00	0,60	502,31
4,50	0,00	3,50	0,00	0,50	0,00	0,00	0,50	506,74
4,60	0,00	3,60	0,00	0,60	0,00	0,00	0,40	509,11
4,70	0,00	3,70	0,00	0,70	0,00	0,00	0,30	508,96
4,80	0,00	3,80	0,00	0,80	0,00	0,00	0,20	505,39
4,90	0,00	3,90	0,00	0,90	0,00	0,00	0,10	497,43

Tabla 3 - Valores de caudal para cada tubería, usando la nueva distribución de gastos.

Curva (2), [Costo (2) vs Qa1] usando nueva distribución de gastos.								
Qa1	Qa2	Qb2	Qb4	Qc4	Qc3	Qd3	Qd1	Costo (2)
0,10	0,90	0,00	1,90	0,00	3,90	0,00	4,90	586,29
0,20	0,80	0,00	1,80	0,00	3,80	0,00	4,80	558,07
0,40	0,60	0,00	1,60	0,00	3,60	0,00	4,60	535,80
0,60	0,40	0,00	1,40	0,00	3,40	0,00	4,40	533,44
0,80	0,20	0,00	1,20	0,00	3,20	0,00	4,20	544,47
1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	3,00	0,00	4,00	540,45
1,20	0,00	0,20	0,80	0,00	2,80	0,00	3,80	498,42
1,40	0,00	0,40	0,60	0,00	2,60	0,00	3,60	483,69
1,60	0,00	0,60	0,40	0,00	2,40	0,00	3,40	496,79
1,80	0,00	0,80	0,20	0,00	2,20	0,00	3,20	499,68
2,00	0,00	1,00	0,00	0,00	2,00	0,00	3,00	518,79
2,20	0,00	1,20	0,00	0,20	1,80	0,00	2,80	502,18
2,40	0,00	1,40	0,00	0,40	1,60	0,00	2,60	493,38
2,60	0,00	1,60	0,00	0,60	1,40	0,00	2,40	490,17
2,80	0,00	1,80	0,00	0,80	1,20	0,00	2,20	492,57
3,00	0,00	2,00	0,00	1,00	1,00	0,00	2,00	500,53
3,20	0,00	2,20	0,00	1,20	0,80	0,00	1,80	513,93
3,40	0,00	2,40	0,00	1,40	0,60	0,00	1,60	532,48
3,50	0,00	2,50	0,00	1,50	0,50	0,00	1,50	543,51
3,60	0,00	2,60	0,00	1,60	0,40	0,00	1,40	555,53
3,70	0,00	2,70	0,00	1,70	0,30	0,00	1,30	568,29
3,80	0,00	2,80	0,00	1,80	0,20	0,00	1,20	581,24
3,90	0,00	2,90	0,00	1,90	0,10	0,00	1,10	592,79
4,00	0,00	3,00	0,00	2,00	0,00	0,00	1,00	581,68
4,10	0,00	3,10	0,00	2,10	0,00	0,10	0,90	600,69
4,20	0,00	3,20	0,00	2,20	0,00	0,20	0,80	584,65
4,30	0,00	3,30	0,00	2,30	0,00	0,30	0,70	575,07
4,40	0,00	3,40	0,00	2,40	0,00	0,40	0,60	569,46
4,50	0,00	3,50	0,00	2,50	0,00	0,50	0,50	567,31
4,60	0,00	3,60	0,00	2,60	0,00	0,60	0,40	568,92
4,70	0,00	3,70	0,00	2,70	0,00	0,70	0,30	575,62
4,80	0,00	3,80	0,00	2,80	0,00	0,80	0,20	590,44
4,90	0,00	3,90	0,00	2,90	0,00	0,90	0,10	619,43

Nótese que la curva del gráfico 2) a diferencia de la curva del gráfico 1) si ofrece valores de mínimo en la función, donde la derivada con respecto al gasto es igual a cero, y estos valores no eliminan ningún tramo de tubería. En los puntos donde la curva del gráfico 1) queda por debajo de la curva del gráfico 2), no se garantiza, para el caso del uso de las ecuaciones (1), (2), (3) y (4), que el caudal que circule por cada tramo sea mayor o igual que la demanda existente en él ; esto puede comprobarse comparando los valores de caudal que circulan por cada tramo con los valores correspondientes de demanda en los tramos que aparecen en la figura 1 a).

Los valores de diámetro para las soluciones de menor costo en cada caso tratado, aparecen en la tabla 4). La nomenclatura (D_{ki}) se refiere al diámetro que tendrá el tramo (k)

cuando este ha sido determinado a partir del (Q_{ki}) ; se ha asumido que el diámetro de un tramo (D_k) sea el mayor valor entre (D_{ki}) y (D_{kj}), siendo (i) y (j) los nodos extremos del tramo (k).

Tabla 4 – Valores de diámetro para los puntos de menor costo.

Diámetro	Solución para el punto de menor costo de la curva 2		Solución para el punto de menor costo de la curva 1	
	Valor calculado	Valor comercial	Valor calculado	Valor comercial
Da1 (mm) =	146,50	150,00	132,38	150,00
Da2 (mm) =	0,00	150,00	0,00	150,00
Db2 (mm) =	78,12	100,00	0,00	0,00
Db4 (mm) =	97,72	100,00	0,00	0,00
Dc4 (mm) =	0,00	200,00	0,00	200,00
Dc3 (mm) =	174,27	200,00	182,21	200,00
Dd3 (mm) =	0,00	200,00	0,00	200,00
Dd1 (mm) =	191,66	200,00	198,14	200,00

Los resultados de diámetros encontrados han requerido ser aproximados a valores comerciales ; por otro lado, a pesar de haberse obtenido una forma de minimizar el costo de una red mallada sin que esta se convierta en ramificada, en esta solución deberían incluirse criterios que de alguna manera expresen una medida de la confiabilidad del funcionamiento de la red, aunque la selección del valor óptimo de la medida de confiabilidad deberá responder a la solución de un problema de asignación de recursos para lograr un mejor estado deseado posible; este problema se abordaría de una manera básicamente diferente a la optimización planteada hasta ahora basada en la búsqueda del valor mínimo de una función de costo de la red, aunque sin dudas, la solución óptima a partir del valor mínimo de la función de costo, bien pudiera ser la aproximación inicial del problema de asignación de recursos para lograr el diseño de la red más conveniente posible cuando se cuenta con un determinado presupuesto.

REDES DE EVACUACIÓN DE RESIDUALES LÍQUIDOS

Fundamentos teóricos y formulaciones.

En este trabajo se entienden como redes de evacuación tanto las redes de alcantarillado sanitario como las redes de drenaje pluvial, así como las redes combinadas por las cuales circulan aguas pluviales y residuales sanitarios. El método de optimización presentado en este trabajo puede ser aplicado a cualquiera de las redes de evacuación, diferenciándose básicamente, en dependencia de la red, en la forma en que se determinen los gastos máximos de circulación.

Para el cálculo de la variante óptima de las redes de evacuación, se plantea utilizar el método de programación dinámica, el cual se aplica a problemas que pueden descomponerse en etapas como es efectivamente el caso del diseño de redes de evacuación. Dentro de cada etapa existen los llamados estados y en cada uno de estos se evalúan distintas decisiones asignando a cada estado la decisión óptima. En el caso de una red de evacuación, el conjunto de los nodos aguas abajo de todos los tramos que tienen igual nivel, constituye una etapa. Cada uno de estos nodos por separado vendría a ser una subetapa en la cual las cotas de excavación posibles en ellos constituirían los estados y las decisiones serían las cotas de excavación en el nodo aguas arriba (con lo cual queda definida la pendiente del tramo) y el diámetro que se va a colocar para dicho tramo.

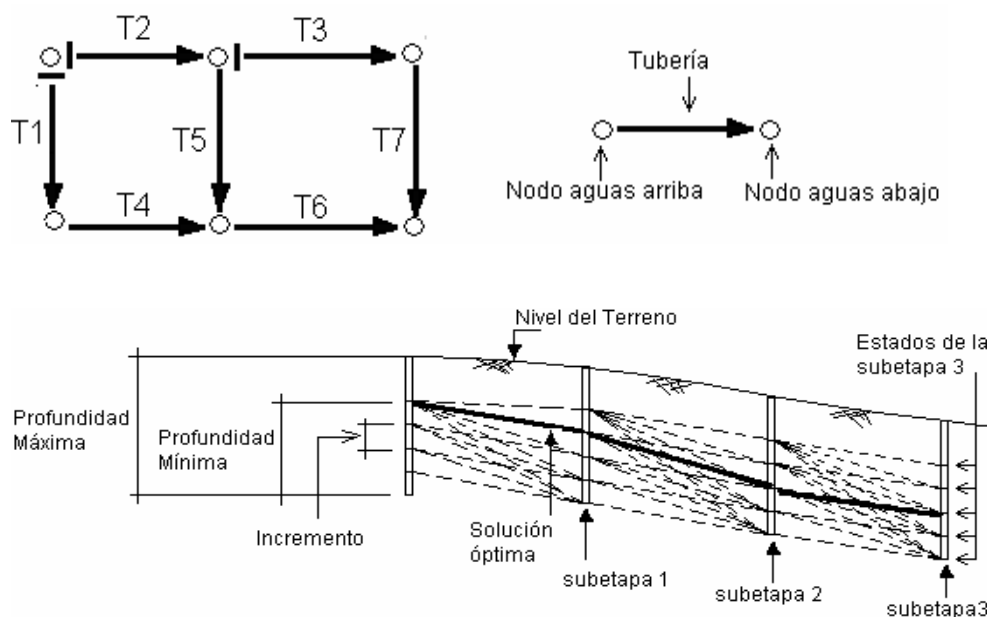


Figura 3 - Optimización de las redes de evacuación.

Para cada estado se selecciona la decisión de menor costo acumulado. Y se almacena de modo que al final se tenga la solución óptima de la red. La programación dinámica avanza en la dirección del flujo en la red, generando las decisiones para cada subetapa de una etapa antes de pasar a la siguiente, y así hasta llegar a la descarga final. Esta forma de concebir el cálculo es una generalización del concepto de etapa en la programación dinámica que permite que se pueda diseñar una red de configuración arbitraria. (Martínez Rodríguez, 1983). Una idea similar para la optimización que además incluye un algoritmo para generar diferentes variantes de trazado a partir de una configuración general, es la propuesta por (Botrous et al., 2000)

Aplicaciones y ejemplos.

Los fundamentos teóricos expuestos y el estudio de otros trabajos, han servido a este autor como base para el desarrollo de un software con el que se ha intentado brindar un pequeño aporte a la implementación de sistemas informáticos que permitan la optimización económica del diseño de redes hidráulicas exteriores y que satisfagan al menos las necesidades medias de los ingenieros que trabajan en la realización de estos diseños. Este software, denominado HADAS, está concebido para realizar el diseño óptimo de cualquiera de los tipos de redes exteriores, tomando en cuenta la influencia que pudiera tener un tipo de red con respecto a otra en cuanto a su disposición espacial en caso que se tenga información de las redes existentes en la zona donde se pretende llevar a cabo el proyecto. El software puede ser aplicado al diseño de nuevas redes, la ampliación de redes existentes y a la revisión del diseño y estimación de costos de redes previamente diseñadas. En el caso de las redes de evacuación, tiene incorporado un algoritmo para generar diferentes variantes de trazado a partir de una configuración general de la red.

El software fue utilizado en el proyecto: Saneamiento ambiental en el asentamiento Ojo de Agua, realizado en el municipio Marianao, Ciudad de la Habana, Cuba (Romero, 2004). En dicho proyecto se diseñó por parte de la ingeniera una red de alcantarillado que luego fue rediseñada haciendo uso del software para encontrar una variante de diseño económicamente optimizada. El costo de la variante de la red diseñada por la ingeniera fue de \$687.59, mientras

que el costo de la variante de la red diseñada por el software haciendo uso de la optimización fue de \$313.89.

Los criterios deseados para el diseño realizado no respondían a criterios convencionales, por lo que el software ha debido adaptarse a nuevos criterios de diseño, incorporando consideraciones sobre la fuerza tractiva ocurrida al pasar los residuales por los conductos de forma que se garanticen valores que permitan el arrastre de posibles sedimentos en la red de evacuación. Estas y otras adaptaciones en el software se han hecho con el objetivo de poder adoptar diferentes criterios de diseño según se desee, para lograr redes de evacuación que funcionen apropiadamente según la localidad donde se construyan y que puedan tener un menor costo comparadas con las redes de evacuación diseñadas siguiendo criterios convencionales.

Este software también fue utilizado en el trabajo: Aplicación de la optimización del diseño de redes de alcantarillado en San José de las Lajas (Álvarez et al, 2004). El municipio de San José de las Lajas está ubicado en la provincia de La Habana, Cuba, ocupa un área de 261.3 hectáreas y tiene una población actualmente superior a los 55 000 habitantes. En este municipio se diseñó una red de evacuación de residuales que no abarcaba toda la zona urbana y que no ha podido ser ampliada por falta de presupuesto. En el trabajo que presentaron los dos ingenieros anteriormente mencionados, se utilizó el software para calcular una variante de ampliación de la red de alcantarillado de San José de las Lajas, tomando en cuenta la parte de la red existente en el lugar. Para demostrar la optimicidad de la variante planteada por el software se hizo una comparación económica entre el costo de la red que se había construido con anterioridad y el costo que hubiera tenido esa red si se hubiera diseñado haciendo uso de la optimización económica brindada por el software. En dicha comparación se tomaron en cuenta solamente los costos de excavación, compactación y costos de tuberías, puesto que el resto de los costos no tendrían una marcada diferencia entre una y otra variante; los costos de la variante construida fueron recalculados bajo las mismas condiciones que la variante de diseño optimizada para salvar el detalle de la variación de los costos unitarios según el momento en que fueron concebidas. De esta comparación se obtuvo que el costo de la variante de la red de alcantarillado que había sido construida era de \$531178.98, mientras que el costo de la variante que fue calculada usando las facilidades de optimización del software fue de \$283958.66

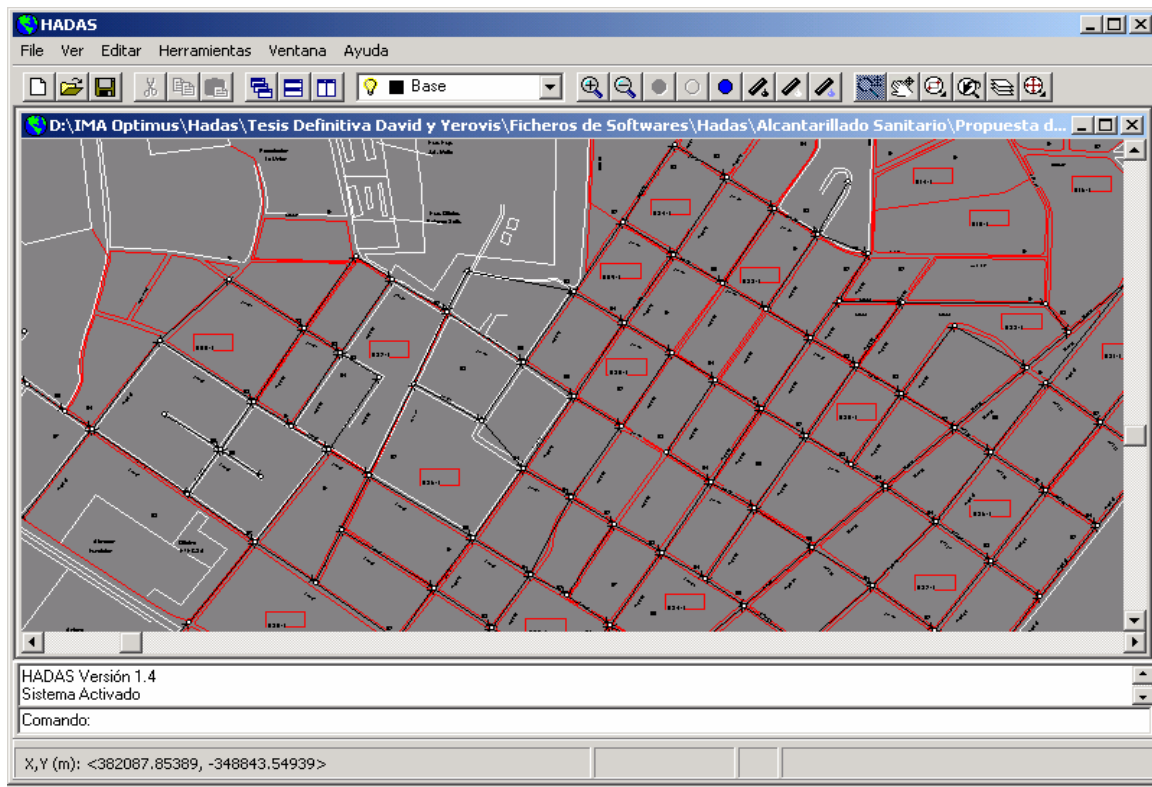


Figura 4 – Software HADAS aplicado a la optimización del alcantarillado de San José de las Lajas.

Finalmente, como ejemplo sencillo, se tomará el caso del diseño de una red de alcantarillado sanitario como la que aparece en la figura 3, en esta red, se asumirá que todos los tramos tienen 100 metros de longitud. Para el cálculo del costo total de la red serán tomados en cuenta los costos de tubería, excavación y compactación del terreno. Los costos de excavación que se tomarán en cuenta a los efectos de este ejemplo aparecen en la tabla 7), los costos de tuberías aparecen en la tabla 6), el costo de la compactación del terreno con equipos será de $0.8 \text{ \$/m}^3$ y el costo de la compactación manual será $1.5 \text{ \$/m}^3$. Los requerimientos para el diseño aparecen reflejados en la tabla 5). Finalmente los resultados del diseño óptimo de esta red, para la variante de trazado que aparece en la figura 4) aparecen en la tabla 8). El cálculo de los gastos de circulación por cada tramo fue hecho previamente; las cotas del terreno en los puntos donde estarán ubicados los nodos pueden verse en la figura 5).

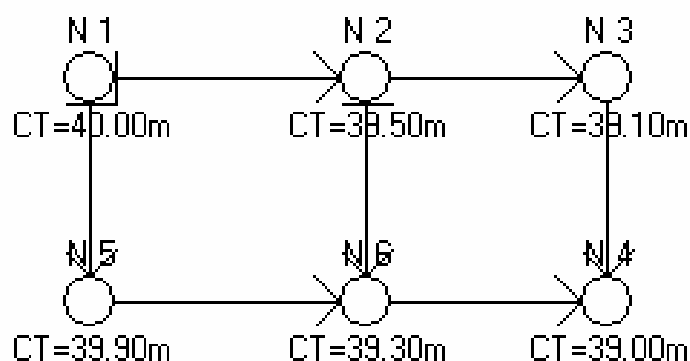


Figura 5 – Red de alcantarillado.

Tabla 5 - Requerimientos para el diseño.

Relación mínima de tirante/diámetro [adim.]	0.2
Relación máxima de tirante/diámetro [adim.]	0.8
Velocidad mínima de circulación [m/s]	0.60
Velocidad mínima para tramos iniciales [m/s]	0.45
Diámetro mínimo [mm]	200
Diámetro mínimo para tramos iniciales [mm]	150
Excavación mínima [m]	1.00
Excavación máxima [m]	7.00
Caída máxima en un nodo [m]	1.60
Precisión (incremento) [m]	0.20

Tabla 6 - Tuberías comerciales

Diámetro [mm]	Rugosidad [adim.]	Costo [\$/m]
150	0.013	2.12
200	0.013	4.17
250	0.013	5.19
300	0.013	6.83

Tabla 7 - Costos de excavación.

Profundidad de Excavación [m]		Costo [\$/m ³]
de	Hasta	
0.0	0.8	4
0.8	5	8
5	7	12

Tabla 8 - Solución de diseño óptimo.

Tubo	Nodo 1	Nodo 2	Q [l/s]	Diámetro [mm]	Velocidad [m/s]	Tirante/diámetro [adim.]	Cota invertida [m]	
							1	2
T3	N3	N4	5.83	200	0.64	0.33	37.70	37.20
T6	N6	N4	7.50	200	0.68	0.38	37.70	37.20
T2	N2	N3	4.07	200	0.61	0.26	38.30	37.70
T5	N5	N6	4.07	200	0.61	0.26	38.30	37.70
T1	N1	N2	2.19	150	0.50	0.30	38.85	38.35
T4	N1	N5	2.19	150	0.50	0.30	38.85	38.35
T7	N2	N6	2.19	150	0.46	0.32	38.35	37.95

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alperovits, E., Shamir, U. (1977), *Design of optimal water distribution system*. Water Resources Research. Vol. 13, num. 6.

Álvarez Noda, D., Díaz Brito, Y. 2004. *Aplicación de la optimización del diseño de redes de alcantarillado en San José de las Lajas*, Tesis de Grado, Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, La Habana.

Awumah, Kofi; Goulter, Ian; Bhatt, Suresh K. 1991. *Entropy-based redundancy measures in water-distribution networks*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 117, No. 5.

Botrous, Akram et al. 2000. *Design of Wastewater Collection Networks using Dynamic Programming Optimization Technique*

Chiong Rojas, Cristina 1985. *Optimización de redes cerradas*, Tesis Doctoral, Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, La Habana.

Colectivo de autores, 1996. *Ingeniería Hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua*. Vol 2, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Goulter, I. C. ; Coals, A. V., 1986. *Quantitative approaches to reliability assessment in pipe networks*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 112, num. 3.

Martínez Rodríguez, J. B. 1983. *Optimización del diseño de redes y sistemas de alcantarillado*. Revista Ingeniería Hidráulica, num. 4, Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, La Habana.

Ostfeld, Avi; Shamir, Uri, 1996. *Design of optimal reliable multiquality water supply systems*. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 122, num. 5.

Romero Gonzalez, Lilliam R. 2004. *Saneamiento ambiental en el asentamiento Ojo de Agua*, Tesis de Grado, Centro de Investigaciones Hidráulicas, CUJAE, La Habana.

Xu, Chengchao; Goulter, Ian C. (1998) *Probabilistic model for water distribution reliability*. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 124, num. 4.

