

Diseño Óptimo De Redes Matrices Para El Abastecimiento De Agua

Juan Jairo Macías Henao

Ingeniero Sanitario, Especialista En Ingeniería De Sistemas Hídricos Urbanos, Universidad De Los Andes.

E-mail: juanmacias@une.net.co

Juan Guillermo Saldarriaga Valderrama

Ingeniero Civil, M. Sc.

Profesor Titular Universidad de los Andes, Director del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: jsaldarr@uniandes.edu.co.

XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología

Sociedad Colombiana de Ingenieros

Bogotá, D.C. 22, 23 y 24 de mayo de 2008

Resumen: En el trabajo se analizaron los métodos de cálculos y las restricciones de diseño que han gobernado históricamente el cálculo de redes matrices de agua, hasta encontrar el diseño óptimo de una red matriz, mediante la sustentación y aplicación de la metodología de cálculo de I-Pai Wu, la cual asegura el costo mínimo del sistema y una rápida convergencia en el proceso de cálculo de tuberías. Se describe la metodología de cálculo del modelo, y se concluye que el método para calcular redes matrices presentado en este estudio, no depende de la subjetividad del proyectista al proponer los diámetros de las tuberías en un sistema de red matriz; es por ello que calculando los diámetros con el criterio de I-Pai Wu, para luego alimentar el software de modelación (ya que estos solo realizan una comprobación y no un diseño en si), se podrá llegar a sistemas óptimamente dimensionados y costeables para una población determinada.

Palabras clave. Red matriz, diseño óptimo, abastecimiento de agua.

1. Introducción

El estudio y la investigación de redes de distribución de agua potable siempre ha apuntado al diseño óptimo, teniendo en cuenta a menudo el aspecto económico, pero finalmente dominando la redundancia hidráulica del sistema a la hora de seleccionar un sistema de redes matrices para la distribución de agua potable.

En los últimos años el análisis económico y financiero ha estado haciendo carrera en el acompañamiento al diseño hidráulico, ya que los costos de la red matriz en un proyecto de infraestructura para la distribución de agua ocupan un peso importante en el presupuesto final.

Los métodos utilizados para calcular redes matrices en la actualidad dependen del análisis subjetivo del diseñador al momento de proponer los diámetros en los tramos de tubería. Independiente del software modelador que se utilice, siempre se tienen que proponer los diámetros por parte del proyectista, llegándose siempre a sistemas sobredimensionados e incosteables para una población determinada.

Son varios los motivos por los que una red matriz puede quedar sobrediseñada, como son, las restricciones hidráulicas¹ empíricas impuestas y aceptadas históricamente y la velocidad máxima en un sistema hidráulico; sumado a esto, los software modeladores de sistemas de abastecimiento, se encuentran contruidos para un proceso de comprobación de diámetros y no para un diseño de tuberías.

Finalmente será el componente económico el criterio fundamental en el dimensionamiento de redes, dado que para un diferente número de condiciones de funcionamiento compatibles entre sí (económica e hidráulicamente) existirá un gran número de soluciones técnicamente válidas, y en este caso, será el costo el que hará identificar la solución óptima. Para lograr esto se aplicará para el cálculo de redes matrices el criterio de I-Pai Wu para el diseño de tuberías en serie.

2. Metodología

En 1975 el profesor I-Pai Wu, investigador de la Universidad de Hawai, Honolulu, en su trabajo "Diseño de líneas de irrigación" experimentó que en una serie de tuberías de riego a presión, el diseño óptimo se podría lograr uniendo los puntos de la línea piezométrica inicial y final, y que entre varias opciones piezométricas la más económica es la que simulaba una parábola invertida, con una depresión del 15% del total de la cabeza total en la mitad de la línea; sin embargo la diferencia de costos entre los resultados utilizando toda la energía disponible y las líneas óptimas de gradiente de energía no superan el 2,5% de sobre costo.

La línea de pendiente de energía recta es sólo una solución entre numerosas curvas de pendiente de energía que satisfacen hidráulicamente un sistema. Cualquier curva que conecta dos puntos en un plano de presiones con una baja pendiente dará unos tamaños de tuberías de la línea principal muy altos y unos costos importantes, lo contrario ocurrirá si se tiene una buena pendiente.

¹ Por ejemplo, las restricciones dadas por la ecuación de Hazen - Williams, (1905) y que se referencia en Macias (2007)

Los modelos de pendiente y de curvatura se trazaron como se muestra en la Figura 1 y, una vez valorados los quince modelos piezométricos, como lo muestra la Figura 2, se encontró que todas las curvas sobre la línea recta No.8, tienen los costos más altos y que el costo de la curva No.11 que se encuentra debajo de la línea recta, se considera como la forma óptima de la línea de pendiente de energía. Esta curva tiene una combadura debajo de la línea recta alrededor de 15% de la cabeza total en la mitad de longitud, y comparando el costo de la línea de pendiente de energía recta No.8 con la línea de pendiente de energía óptima No.11 se observa que la diferencia del costo se aproximada solo al 2.5% de sobre costo comparada con la solución óptima.

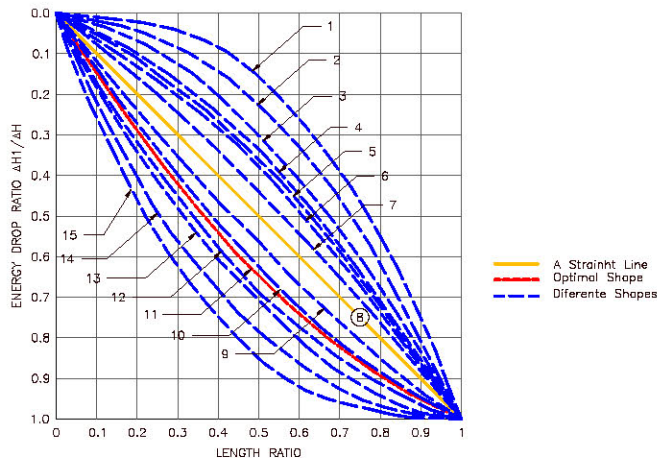


Figura 1. Líneas de gradiente de energía²

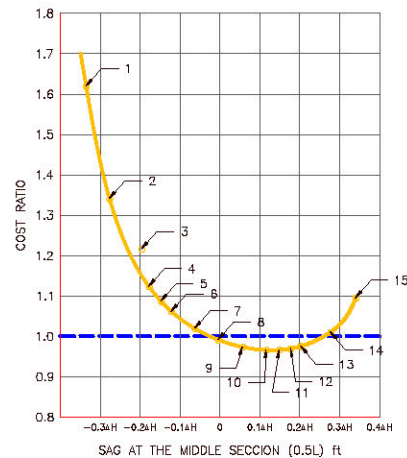


Figura 2. Evaluación de costos para diferentes gradientes de energía³

El diseño óptimo se obtiene igualando los gradientes hidráulicos entre nudos adyacentes a través de suposiciones hipotéticas. Para el cálculo final de los diámetros se hace necesario un proceso iterativo que encuentre las cabezas que se acercan más al gradiente óptimo. Featherstone (1983) propone realizar un plano imaginario en el cual se une el reservorio con el punto topológicamente mas alejado.

El criterio de I-Pai Wu asegura no solo un costo mínimo del sistema, sino una rápida convergencia en el proceso de cálculo de tuberías en serie. Para esquemas de abastecimiento de agua potable en ciudades grandes y medianas, se puede aplicar como criterio de diseño, o función objetivo de diseño, el tratar de obtener una línea piezométrica en las uniones semejante a la línea recta que conecte las superficies de los tanques extremos, es decir, el tanque abastecedor principal y el tanque más alejado, topológicamente hablando, (Saldarriaga, 2007).

La metodología de cálculo que se propone en este trabajo consiste en el gasto de la energía disponible en el sistema atendiendo el criterio de diseño de I-Pai Wu para tuberías en serie, y la interpretación del mismo realizadas por Featherstone, 1983 y Saldarriaga, 2007.

² Tomado de la figura 3 del informe de I-Pai Wu

³ Tomado de la figura 4 del informe de I-Pai Wu

Para llegar al diseño óptimo se construye la configuración topológica de la red, con las longitudes acumuladas de cada uno de los elementos de consumo, a partir del tanque principal de alimentación y sus cotas respectivas; en el caso de los puntos de intersección de varias alimentaciones (uniones), se grafican líneas verticales en función de las distancias acumuladas de igual manera como se hace con los tanques de almacenamiento o nudos de consumo. Luego de tenerse la gráfica de distancia acumulada versus cotas, se determinan cuales son los puntos de demanda críticos del sistema y los de mayor cabeza piezométrica respectivamente; como el objetivo es consumirse totalmente la energía disponible, se traza preliminarmente una línea piezométrica óptima (I-Pai Wu) y dependiendo de la configuración topológica de la red se determinará si se utilizan una o varias líneas equivalentes de I-Pai Wu, de tal manera que la red a diseñar se consuma totalmente la energía disponible en el sistema.

Pueden existir situaciones en las cuales no se logre atender piezométricamente todos los puntos de consumo con el primer trazado de líneas I-Pai Wu. Para estos casos se seguirá buscando el tanque de mayor cabeza (tanque con la cota menor del sistema) que ligado al tanque principal arroje cotas en las uniones que permitan que el agua llegue a los tanques finales (tomando como finales los tanques asociados a la unión). Adicionalmente, se tendrán redes en las cuales se necesite trazar más de una línea I-Pai Wu, por lo que es necesario establecer topológicamente la conectividad de las uniones con respecto a los tanques y determinar las uniones que se convertirán en elementos de control dinámico⁴ para el trazado de las nuevas líneas I-Pai Wu.

Una vez conocidos los gradientes de energía disponible Z_{uj} mediante la metodología I-Pai Wu para cada una de las uniones de la red, se procede a realizar el cálculo hidráulico y finalmente se encuentran los diámetros de cada tramo, utilizando el método de diseño de tuberías en serie y abiertas propuestos en Saldarriaga (2007) (ver Diagrama de Flujo 1 y Diagrama de Flujo 2).

3. Aplicación Del Método Para El Diseño De Una Red Matriz En El Valle De Aburra

Para la aplicación se seleccionó una red matriz que transporte caudales importantes y se partió de información topológica actualizada a 1999, en el estudio de diagnóstico del problema de calidad del agua en la red de conducción de las Empresas Publicas de Medellín, elaborado por CIFI de la Universidad de los Andes. Se hace claridad que el ejemplo propuesto es netamente de carácter académico, ya que el objetivo no fue realizar una evaluación hidráulica del diseño actual, sino la aplicación y análisis del criterio de I-Pai Wu planteado; es por ello que los caudales se adoptaron para el horizonte máximo de diseño.

⁴ Se llaman elementos de control dinámico, porque a partir de Z_{uj} calculados en las uniones, se trazaran nuevas líneas I-Pai Wu.

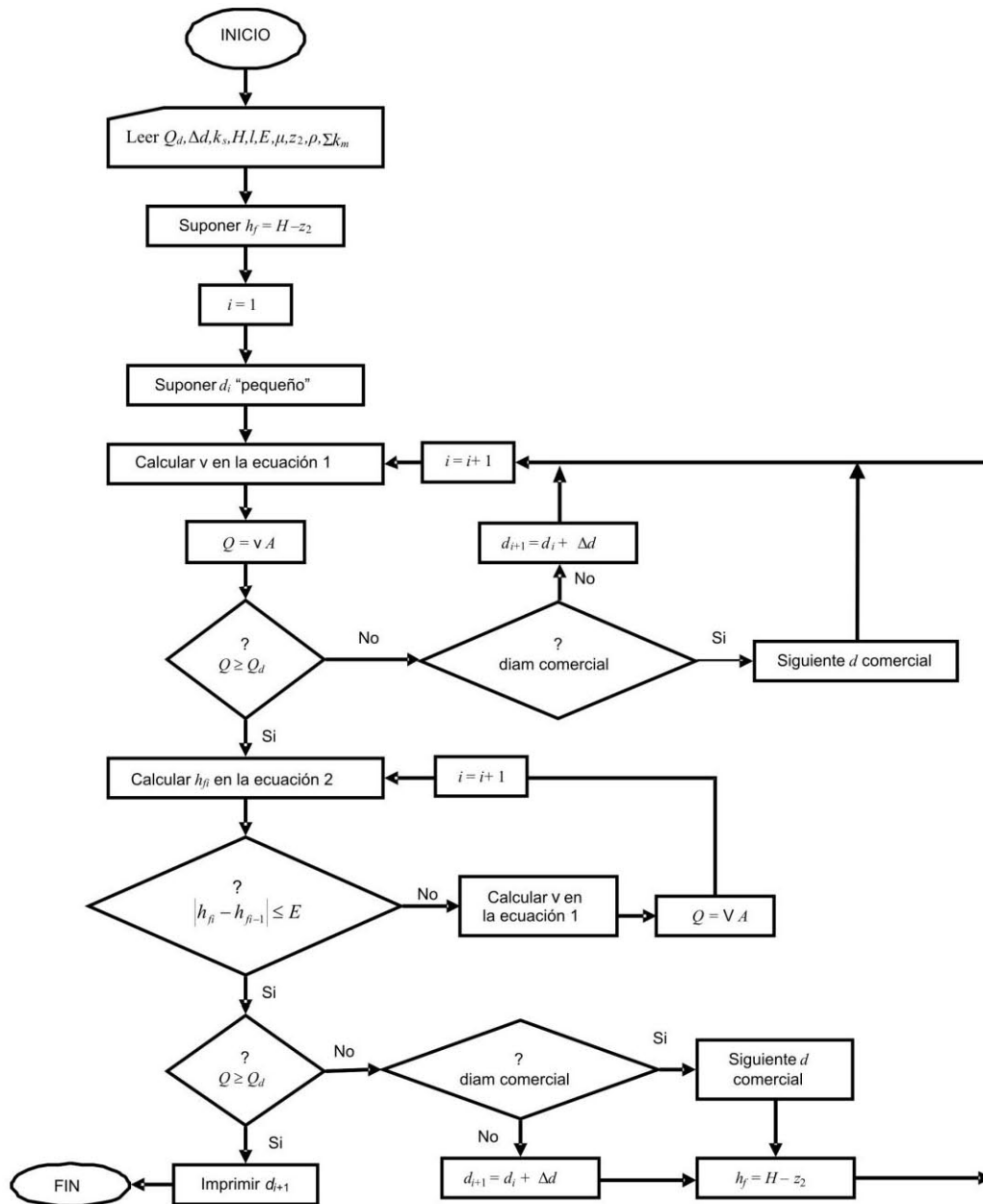


Diagrama de Flujo 1. Diseño de tuberías simples

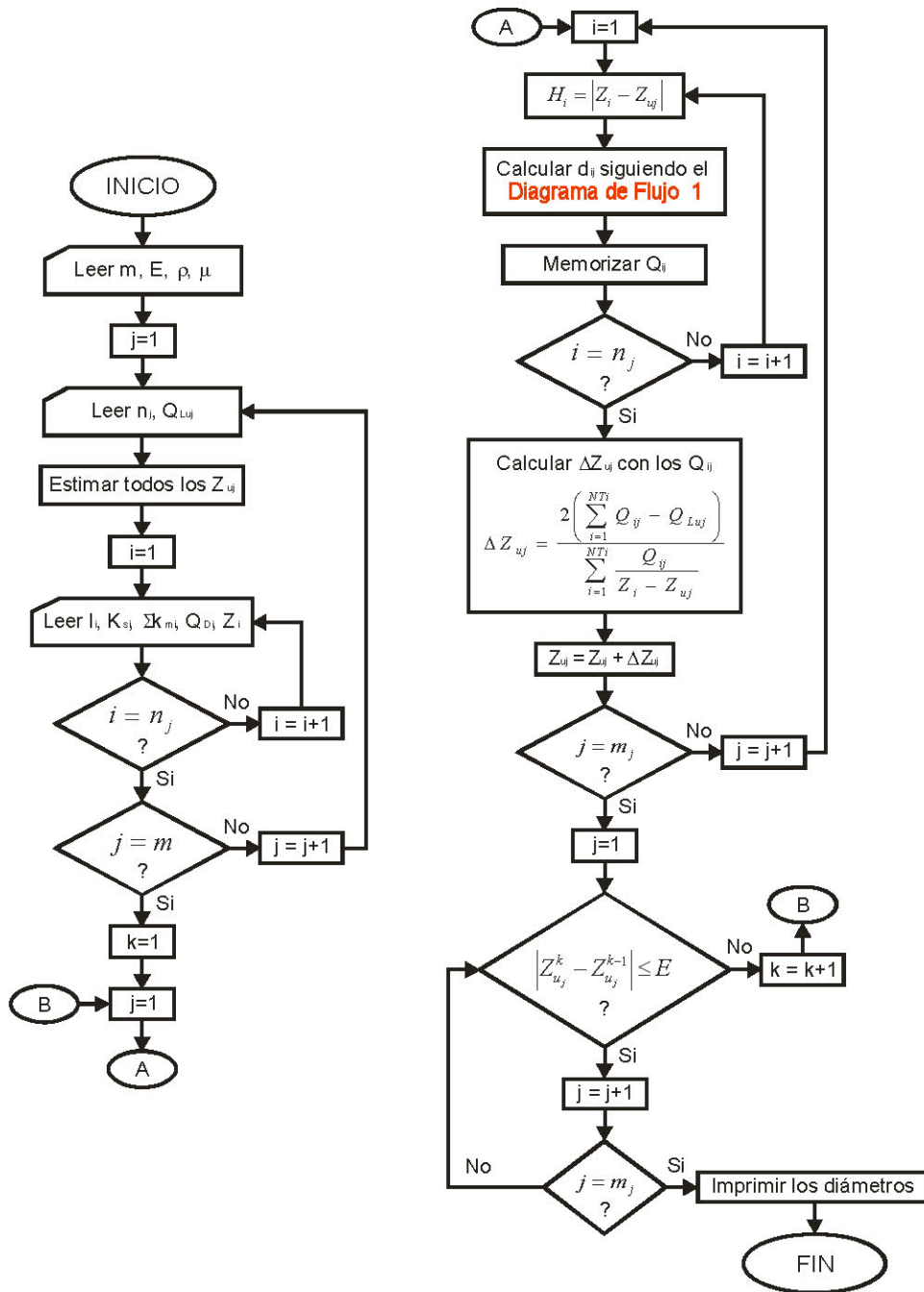


Diagrama de Flujo 2. Diseño de redes abiertas

3.1 Zona Occidental Red De Medellín

Se diseñará el tramo de la red abierta de Medellín comprendida entre el tanque de almacenamiento principal de Ayurá y el tanque de distribución del volador, zona occidental del Valle de Aburrá. En la Tabla 1 se muestran la alimentación de los tanques, en la Tabla 2 la configuración topológica de las redes a diseñar.

Tabla 1. Tanques alimentados por Ayurá Zona Occidental

Tanque	Cota (m)	Longitud (m)
AYURA	1756,80	0,00
RODEO-RINCON	1688,70	9.441,00
NUTIBARA 1-2	1553,00	10.240,50
ALTAVISTA	1645,90	10.399,00
AMERICA 1-2	1579,90	12.741,00
BELENCITO 1-2	1648,20	12.822,50
ROBLEDO	1645,20	17.220,00
PALENQUE	1640,33	17.308,50
VOLADOR	1579,00	18.036,00

Tabla 2. Características topológicas de la red abierta Zona Occidental

Tramo	Nodo i	Nodo j	Parámetros Diseño					Alimentación
			Longitud (m)	Q_D (m ³ /s)	Material	Ks (m)	$\sum K_m$ (Adim)	
1	0	1	5198,50	2,084	CCP	1,2E-04	0	
2	1	2	2253,00	0,781	CCP	1,2E-04	0	
3	2	3	1989,50	0,012	PVC	1,5E-06	0	RINCON-RODEO
4	2	4	1576,50	0,769	CCP	1,2E-04	0	
5	4	5	1371,00	0,226	PVC	1,5E-06	0	ALTAVISTA
6	4	6	1660,50	0,543	CCP	1,2E-04	0	
7	6	7	2134,00	0,106	PVC	1,5E-06	0	BELENCITO 1-2
8	6	8	132,50	0,438	CCP	1,2E-04	0	
9	8	9	1920,00	0,438	PVC	1,5E-06	0	AMERICA 1-2
10	1	10	3796,50	1,303	CCP	1,2E-04	0	
11	10	11	1245,50	0,587	PVC	1,5E-06	0	NUTIBARA 1-2
12	10	12	7092,50	0,716	CCP	1,2E-04	0	
13	12	13	1221,00	0,320	PVC	1,5E-06	0	PALENQUE
14	12	14	8,00	0,396	CCP	1,2E-04	0	
15	14	15	1124,50	0,083	PVC	1,5E-06	0	ROBLEDO
16	14	16	1940,50	0,313	PVC	1,5E-06	0	VOLADOR

En la Figura 3 se relaciona esquemáticamente la ubicación espacial de cada uno de los elementos que componen la red matriz de distribución. En la Figura 4 se ilustran las líneas I-Pai Wu propuestas para este caso y las cotas piezométricas de las uniones que componen la red, adicionalmente, en la Tabla 3 se presenta el resumen de los cálculos hidráulicos y los costos de la red por tramos.

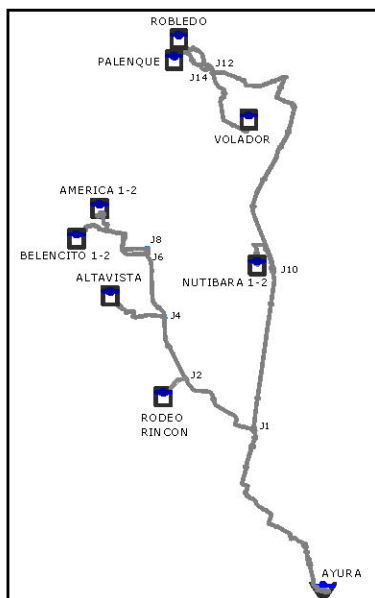


Figura 3. Configuración de la red de distribución abierta Zona Occidental

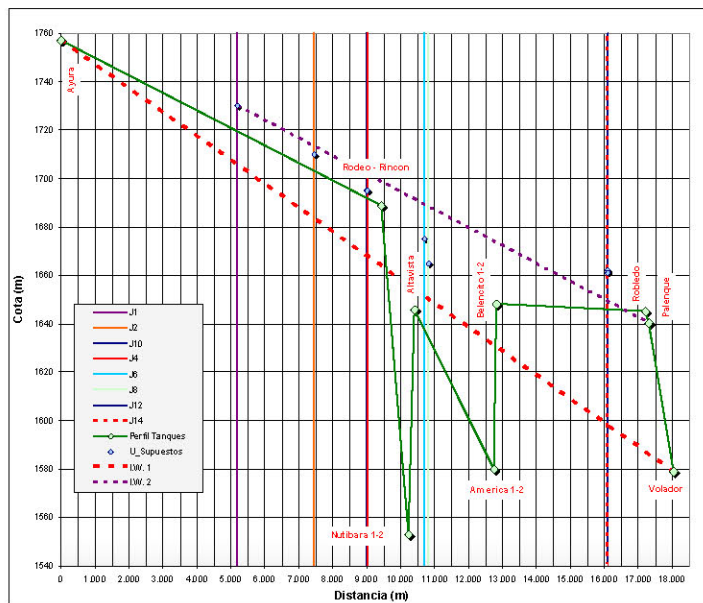


Figura 4. Líneas I-Pai Wu propuestas para la red abierta Zona Occidental de Medellín

Tabla 3. Resumen de cálculos Método de I-Pai Wu Zona Occidental⁵

Tramo	D (in)	Costo (US)	Q ₀ (m ³ /s)	Q _T (m ³ /s)	L (m)	K _m	Material	K _s (m)	H _f (m)	H _m (m)	H _r (m)	Cabeza (m)	E.D. (m)	P.N. (m)	ΔH _{SE}
AYURA - 1	39	\$ 5.277.118	2,084	2,198	5198,5	0	CCP	1,2E-04	25,54	0,00	25,537	28,348	2,811	2,811	-
1 - 2	24	\$ 1.149.869	0,781	0,827	2253,0	0	CCP	1,2E-04	19,42	0,00	19,417	21,708	2,291	5,101	-
2 - RODEO-RINCON	6	\$ 40.202	0,012	0,024	1989,5	0	PVC	1,5E-06	5,47	0,00	5,472	18,044	12,572	17,674	68,10
2 - 4	24	\$ 804.602	0,769	0,843	1576,5	0	CCP	1,2E-04	13,18	0,00	13,176	15,777	2,601	7,703	-
4 - ALTAVISTA	12	\$ 102.202	0,226	0,301	1371,0	0	PVC	1,5E-06	26,68	0,00	26,678	45,067	18,389	26,091	110,90
4 - 6	20	\$ 654.608	0,543	0,588	1660,5	0	CCP	1,2E-04	17,86	0,00	17,865	20,888	3,023	10,726	-
6 - BELENCITO 1-2	12	\$ 159.080	0,106	0,159	2134,0	0	PVC	1,5E-06	10,35	0,00	10,349	21,879	11,529	22,255	108,60
6 - 8	14	\$ 31.519	0,438	0,462	132,5	0	CCP	1,2E-04	5,83	0,00	5,829	6,477	0,648	11,374	-
8 - AMERICA 1-2	14	\$ 194.019	0,438	0,526	1920,0	0	PVC	1,5E-06	59,57	0,00	59,565	83,702	24,137	35,511	176,90
1 - 10	30	\$ 2.657.812	1,303	1,376	3796,5	0	CCP	1,2E-04	28,43	0,00	28,428	31,641	3,212	6,023	-
10 - NUTIBARA 1-2	12	\$ 92.846	0,587	0,594	1245,5	0	PVC	1,5E-06	140,58	0,00	140,584	143,812	3,228	9,251	203,80
10 - 12	27	\$ 4.276.947	0,716	0,798	7092,5	0	CCP	1,2E-04	28,27	0,00	28,274	34,937	6,663	12,686	-
12 - PALENQUE	14	\$ 123.384	0,320	0,322	1221,0	0	PVC	1,5E-06	21,32	0,00	21,315	21,545	0,230	12,916	116,47
12 - 14	12	\$ 1.530	0,396	0,406	8,0	0	CCP	1,2E-04	0,64	0,00	0,641	0,674	0,033	12,719	-
14 - ROBLEDO	10	\$ 59.598	0,083	0,118	1124,5	0	PVC	1,5E-06	8,49	0,00	8,490	16,001	7,511	20,229	111,60
14 - VOLADOR	12	\$ 144.655	0,313	0,345	1940,5	0	PVC	1,5E-06	68,67	0,00	68,672	82,201	13,529	26,248	177,80

3.2 Comparación Y Análisis Del Método De Cálculo Para Redes Matrices

A continuación el modelo antes planteado se analizará mediante un programa de simulación hidráulica en este caso Watercad 6.5 versión académica, para comparar el estado de presiones generado en los nodos terminales de la red matriz; así se verifican de manera más sencilla las líneas de gradiente que producen los diámetros calculados por el método propuesto anteriormente. Además se comparan los costos de las redes actualmente instaladas frente al diseño obtenido con la metodología aquí expuesta.

A continuación se graficarán las líneas de gradiente. Para esto solo se tendrán en cuenta los puntos de la red matriz principal, o sea que no se tienen en cuenta los gradientes de energía de tanques intermedios, ya que la red principal es la más sensible hidráulica y económicamente. Para la zona de estudio se seleccionó como línea piezométrica óptima, la que une los tanques de Ayurá y el tanque de Palenque. Sobre la línea de gradiente óptimo se traza las líneas arrojadas en la aplicación del método I-Pai Wu y la red actual construida.

Para esta zona se observa que los diámetros calculados en el método de Wu son menores en sus tramos finales mientras que en las tuberías principales ocurre lo contrario; la explicación de esto se sustenta en los principios sobre los cuales se basa la metodología de consumir toda la energía disponible en el sistema, por lo que en los tramos iniciales se instalan diámetros grandes para reducirlos abruptamente en los tramos finales.

Se verifica entonces el estado de presiones de los tanques de almacenamiento en Watercad V6.5, a partir de una modelación en estado estable (Ver Figura 5), y adicionalmente en la Figura 6 se detallan los valores arrojados por el modelo hidráulico en cuanto a presiones remanentes y gradientes de energía en cada uno de los nodos y tanques.

⁵ Los costos por tramos son calculados con base en una curva de costos realizada para el PVC y el CCP.

E.D.: Energía disponible; P.N.: Presión en el nodo

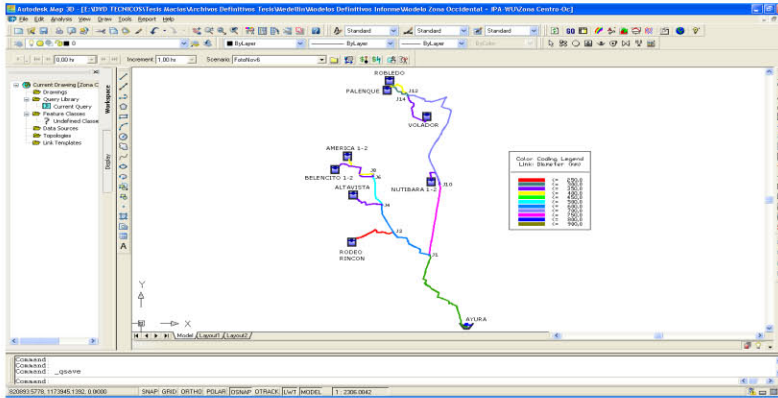


Figura 5. Configuración topológica de las redes en Watercad “Zona Occidental”

Label	Elevation (m)	Zone	Type	Base Flow (l/s)	Demand (Calculated) (l/s)	Calculated Hydraulic Grade (m)	Pressure (m H2O)
PALENGUIC	1.640,33	Nutibara 1-2	Demanda	320,00	320,00	1.646,81	6,466
Nutibara 1-2	1.550,00	NodoModelo	Demand	500,00	500,00	1.500,10	7,140
HUBLELUU	1.045,20	NodoModelo	Demand	0,04	0,04	1.050,00	13,450
RINCON-RODEO	1.888,00	NodoModelo	Demand	12,17	12,17	1.702,37	14,544
BELENCITO 1-2	1.618,20	NodoModelo	Demand	105,58	105,58	1.664,30	16,065
VOLADOR	1.579,00	NodoModelo	Demand	313,03	313,03	1.599,77	20,726
ALTA VISTA	1.645,90	NodoModelo	Demand	226,00	226,00	1.667,69	21,790
América 1-2	1.079,90	Nutibara 1-2	Demanda	437,50	437,50	1.609,79	29,825
J14	1.544,00	NodoModelo	Demand	0,00	0,00	1.000,94	122,000
J12	1.544,00	NodoModelo	Demand	0,00	0,00	1.667,63	123,395
J8	1.520,00	NodoModelo	Demand	0,00	0,00	1.636,70	147,299
J6	1.518,00	NodoModelo	Demand	0,00	0,00	1.674,36	195,145
J4	1.521,00	NodoModelo	Demand	0,00	0,00	1.693,74	172,089
J2	1.507,00	Nutibara 1-2	Demanda	0,00	0,00	1.707,86	193,561
J10	1.473,00	NodoModelo	Demand	0,00	0,00	1.030,25	223,301
J1	1.400,00	NodoModelo	Demand	0,00	0,00	1.720,00	230,020

Figura 6. Informe de resultados Watercad - Método de I-Pai Wu

En el modelo planteado se garantizan presiones de servicio adecuadas para el correcto funcionamiento de las redes; la diferencia radica en los costos debido a que cada metodología propone diámetros diferentes según los tramos de la red, por esta razón a manera de resumen en la Tabla 4 se presentan el resumen de los costos de las redes.

Tabla 4. Comparación de costos entre la red diseñada con el criterio de I-Pai Wu y las redes existentes

Método	Costo (US)
IPA WU	\$ 15'769.990
Costos redes actualmente instaladas	\$ 24'352.790

En la Tabla 5 y la Tabla 6 se muestran los comparativos en cuanto a la tasa de energía consumida y a su vez se compara con los modelos estructurados en Watercad para el análisis hidráulico, de estas tablas se observa que el método de I-Pai Wu es económico puesto que consume mayor porcentaje de la energía disponible, con el sistema construido, lo que se refleja en la estimación de diámetros comerciales más pequeños en comparación a los actuales. En la Figura 7 y en la Figura 8 se puede observar esto de manera sencilla, ya que las líneas de gradiente más próximas a la línea de energía disponible en el sistema

representan diámetros más pequeños, a medida que estas líneas se alejan de la línea de energía el costo de las redes aumenta.

Tabla 5. Comparación de la energía consumida y el porcentaje de desfase entre el modelo Watercad de I-Pai Wu y el método de diseño I-Pai Wu “Zona Occidental”

TANQUE	Energía Disponible (m)	Watercad I-PAI WU	% Energía Consumida	I-PAI WU	% Energía Consumida	% Desfase Modelo - I-Pai Wu
		PRESIÓN (m.c.a.)		PRESIÓN (m.c.a.)		
RODEO - RINCÓN	68,10	14,544	78,643	17,674	74,047	5,844
ALTAVISTA	110,90	21,750	80,388	26,091	76,473	4,869
BELENCITO 1-2	108,60	16,065	85,207	22,255	79,507	6,689
AMÉRICA 1-2	176,90	29,825	83,140	35,511	79,926	3,866
NUTIBARA 1-2	203,80	7,143	96,495	9,251	95,461	1,072
PALENQUE	116,47	6,466	94,448	12,916	88,910	5,863
ROBLEDO	111,60	13,458	87,941	20,229	81,874	6,899
VOLADOR	177,80	20,726	88,343	26,248	85,237	3,516

Tabla 6. Comparación de la energía consumida y el porcentaje de desfase entre los modelos de Watercad para el I-Pai Wu y los diámetros actuales. “Zona Occidental”

TANQUE	Energía Disponible (m)	Watercad I-PAI WU	% Energía Consumida	Watercad EPM	% Energía Consumida	% Desfase Modelos EPM - I-Pai Wu
		PRESIÓN (m.c.a.)		PRESIÓN (m.c.a.)		
RODEO - RINCÓN	68,10	14,544	78,643	46,475	31,755	59,622
ALTAVISTA	110,90	21,750	80,388	85,431	22,966	71,431
BELENCITO 1-2	108,60	16,065	85,207	74,677	31,237	63,340
AMÉRICA 1-2	176,90	29,825	83,140	138,284	21,829	73,744
NUTIBARA 1-2	203,80	7,143	96,495	119,465	41,381	57,116
PALENQUE	116,47	6,466	94,448	82,332	29,311	68,967
ROBLEDO	111,60	13,458	87,941	82,134	26,403	69,976
VOLADOR	177,80	20,726	88,343	140,840	20,787	76,470

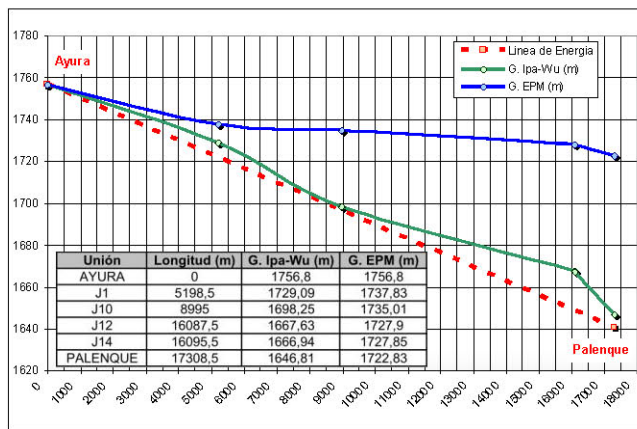


Figura 7. Líneas de gradiente calculadas entre Ayurá y Palenque “Zona Occidental”

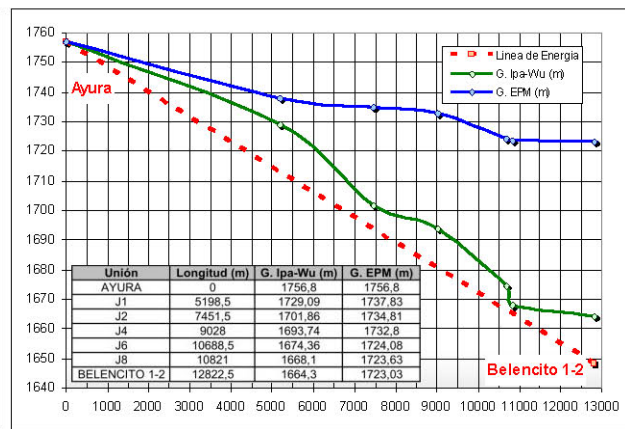


Figura 8. Líneas I-Pai Wu propuestas para la red abierta Zona Occidental de Medellín

4. Conclusiones

- Se puede concluir que los diseños de redes de abastecimiento se han venido diseñando y construyendo sin atender el análisis de una función objetivo, como es el diseño hidráulico acompañado de un buen análisis económico y financiero.

- La metodología de I-Pai Wu plantea el consumo total de la energía del sistema, es por eso que la líneas de consumo de energía siempre van desde el tanque principal de suministro hasta el tanque más desfavorable que en la mayoría de los casos es el mas alejado y cuyo nivel topográfico es el mas bajo de toda la red, pero garantizando en todo momento que los tanques tengan siempre suministro de agua; Sin embargo esto puede cambiar de acuerdo a la configuración del sistema, presentándose situaciones en las cuales sea necesario para el cálculo de la cota piezométrica de los nodos utilizar nodos dinámicos y la construcción de varias líneas I-Pai Wu para el mismo sistema.
- En el caso de la Metodología I-Pai Wu los diámetros son mayores en sus tramos iniciales y en los tramos finales ocurre todo lo contrario. Esto se debe a los criterios sobre los cuales se basa el método, en donde se quiere consumir la energía en su totalidad por lo que el método reserva su criterio en los tramos finales, es decir los diámetros calculados inicialmente sólo buscan el transporte del agua para ciertas condiciones especiales sin intentar gastarse la energía del sistema. Esto ocurre es en los tramos finales donde se intenta gastar abruptamente la energía remanente que queda en el sistema hasta llegar a los tramos finales.
- Con el método propuesto para calcular redes matrices en este estudio se concluye que los diseños no deben depender de la subjetividad del proyectista para proponer los diámetros de las tuberías en un sistema de redes matrices; es por ello que si se calculan los diámetros, para luego alimentar el software de modelación, se podrá llegar a sistemas óptimamente dimensionados.

5. Referencias Bibliograficas

- CIFI Universidad de los Andes, 1999, Diagnostico del problema de calidad del agua en la red de conducción de las Empresas Publicas de Medellín. Santafé de Bogota.
- EEPPM. ESP, Acueducto de EPM, volumen 10 No. 3 y 4 Julio – Diciembre, 1988.
- Featherstone, R. "Optimal diameter selection for pipe nertworks". .ASCE. volumen 109, numero 2. febrero de 1983.
- Saldarriaga V. Juan G. "Hidráulica de tuberías". Editorial Limusa, 2007.
- Wu, I-Pai. "Desing of drip irrigation main lines". Journal of the Irrigation and drainage Division, ASCE f the civil engineers, 1938.ASCE.volumen 101, numero IR4. Marzo de 1975.
- Williams, M. Garder S., Hazen M. Allen. "Hydraulic tables". Tercera edición. Editorial John Wiley & sons, 1933.