

**DISEÑO OPTIMIZADO DE REDES A PARTIR DE LA SUPERFICIE
PIEZOMÉTRICA.**

**MARIA ANGÉLICA AHUMADA SIDEROL
JAVIER EDUARDO ROJAS PÉREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

**DISEÑO OPTIMIZADO DE REDES A PARTIR DE LA SUPERFICIE
PIEZOMÉTRICA.**

MARIA ANGÉLICA AHUMADA SIDEROL

JAVIER EDUARDO ROJAS PÉREZ

**Trabajo de grado modalidad investigación para optar por el título de
Ingeniero Civil**

Director

MARIO GARCÍA SOLANO

Ingeniero Civil, M. Sc.

Co-Director

OSCAR JAVIER BEGAMBRE

Ingeniero Civil, M. Sc, PhD

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. TOPOLOGÍA DE LA RED Y AJUSTE DE LA SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA. .15	
1.1. PROCEDIMIENTO PARA EL AJUSTE DE LA SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA	15
1.2. DISTRIBUCIÓN DE LOS CAUDALES EN LA RED	16
2. PROGRAMACIÓN DEL DISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN EXCEL Y OPTIMIZACIÓN POR MEDIO DEL ALGORITMO GRADIENTE REDUCIDO GENERALIZADO.....	20
2.1. PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS Y DIÁMETROS DE LAS TUBERÍAS	20
2.2. PROCEDIMIENTO PARA ENCONTRAR LOS DIÁMETROS DE LAS TUBERÍAS Y SUS RESPETIVAS LONGITUDES.....	22
2.3. VELOCIDADES DE DISEÑO.....	23
2.4. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN.....	24
2.5. OPTIMIZACIÓN POR MEDIO DE LA HERRAMIENTA SOLVER EN EXCEL, SEGÚN EL MÉTODO GRADIENTE REDUCIDO GENERALIZADO (GRG).....	25
3. PROGRAMACIÓN EN MATLAB Y OPTIMIZACIÓN POR MEDIO DEL ALGORITMO SIMPLEX NO LINEAL.	27
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	28
5. CONCLUSIONES	37
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS	39

BIBLIOGRAFIA.....40

ANEXOS.....41

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Red ejemplo mostrando los circuitos.	15
Figura 2. Superficie piezométrica de la red.....	16
Figura 3. Distribución de caudales en la red.....	17
Figura 4. Ejemplo de tuberías.....	22
Figura 5. Precio de las tuberías.	24
Figura 6. Método Simplex No lineal	27
Figura 7. Diagrama de Flujo: Metodología desarrollada para el diseño de redes. .	29

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Información del diseño de la red de distribución de agua.	19
Tabla 2. Resultados del diseño optimizado de la Red en Excel con Gradiente Reducido Generalizado por circuitos.	30
Tabla 3. Resultados del diseño optimizado de la Red en Matlab con Simplex no lineal por circuitos.	31
Tabla 4. Resultados de los costos del diseño de la red sin optimizar.	32
Tabla 5. Resultados de los costos de diseño de la red optimizada en Excel con Gradiente Reducido Generalizado.	33
Tabla 6. Resultados de los costos optimizados en Matlab, Simplex no lineal.....	34
Tabla 7. Clasificación de los diámetros optimizando con Gradiente Reducido Generalizado.....	35
Tabla 8. Clasificación de los diámetros optimizando con Simplex no lineal.....	36

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Gradiente Reducido Generalizado en Excel.....	41
Anexo B. Simplex no lineal en Matlab.....	42

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO OPTIMIZADO DE REDES A PARTIR DE LA SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA.*

AUTORES: MARIA ANGÉLICA AHUMADA SIDEROL MARIANGEL_92_8@HOTMAIL.COM
JAVIER EDUARDO ROJAS PÉREZ JAVIER3192@HOTMAIL.COM**

PALABRAS CLAVES: RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA, SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA, OPTIMIZACIÓN, SIMPLEX, GRADIENTE REDUCIDO GENERALIZADO.

CONTENIDO:

En esta investigación se desarrolló una metodología que permite diseñar redes de distribución de agua en los sistemas de acueducto, teniendo presente la variable económica y buscando soluciones de costo mínimo, mediante el ajuste de las superficies de presión conformadas por las líneas piezométricas en las redes. Para ello, se establecieron algunas topologías de la red y se ajustó la superficie piezométrica para el caso. La hipótesis de distribución de aguas (caudales) del sistema, se estableció suponiendo un caudal de entrada a la red, siendo éste el que se va a distribuir para todo el acueducto, teniendo en cuenta el Método de Hardy Cross para tuberías.

El diseño de la red de distribución de agua se llevó a cabo por medio de una programación realizada en Excel y Matlab, considerando las restricciones hidráulicas que se deben cumplir (presiones mayores o iguales a 15 m.c.a y velocidades máximas de conducción de 2 m/seg). A partir de esto, se hicieron consultas relacionadas con 2 algoritmos de optimización: Gradiente Reducido Generalizado (GRG) y Simplex no lineal, que se emplearon en herramientas computacionales como son Excel y Matlab, respectivamente. Gracias a la implementación de estos algoritmos se obtuvieron resultados de costos mínimos de tuberías para el diseño, que permitieron realizar comparaciones entre estos dos métodos y establecer cuál de estos realiza una mejor optimización de costos en tuberías. Es importante aclarar que en esta investigación el costo total encontrado en el diseño, corresponde a las longitudes de tuberías utilizadas, sin incluir su instalación.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director Mario García, Co Director Oscar Begambre.

ABSTRACT

TITLE: OPTIMIZED DESIGN OF A WATER DISTRIBUTION NETWORK USING THE PIEZOMETRIC SURFACE.*

AUTHORS: MARIA ANGÉLICA AHUMADA SIDEROL MARIANGEL_92_8@HOTMAIL.COM
JAVIER EDUARDO ROJAS PÉREZ JAVIER3192@HOTMAIL.COM**

KEYWORDS: WATER DISTRIBUTION NETWORK, PIEZOMETRIC SURFACE, OPTIMIZATION, SIMPLEX, GRG.

CONTENTS:

In this investigation a methodology to design water distribution networks in water supply systems was developed, considering the economic variable and finding least-cost solutions, through the adjustment of the pressure surfaces formed by the piezometric lines in the networks. For this, some network topologies were established and the piezometric surface was adjusted in the case. The water distribution hypothesis (flow) of system was established assuming inflow to the network, which will be distributed to all the aqueduct, considering Hardy Cross Method for pipes.

The water distribution network design was carried out by a program made in Excel and Matlab, considering hydraulic constraints (pressures greater than or equal to 15 m.c.a and maximum driving speeds of 2 m/sec). From this, consultations related to two optimization algorithms: Generalized Reduced Gradient (GRG) and nonlinear Simplex, were made and they were used in computational tools such as Excel and Matlab, respectively; the implementation of these algorithms, allow a pipeline design with minimal cost on of the two methods and establish which of these makes a better cost optimization in pipelines. It is important to note that in this study found the total cost in the design corresponds to the lengths of pipes used, not including installation.

* Research work.

** Faculty of Mechanical Physical Engineering. Civil Engineering Department. Director Mario García, Co Director Oscar Begambre

INTRODUCCIÓN

La importancia de construir redes de acueductos que brinden el abastecimiento necesario para cierta población es evidente, pues gracias a este tipo de obra ingenieril se logra la satisfacción de gran parte de las necesidades que presentan los habitantes; el agua ha sido y seguirá siendo nuestro recurso más preciado.

Las redes de distribución de agua son las encargadas de proporcionar agua a los usuarios para consumo doméstico, comercial, industrial, público, con calidad y en cantidad aceptable. Estas pueden estar conformadas por tuberías denominadas redes primarias, secundarias, terciarias, y la conexión domiciliaria, según su diámetro y funcionamiento.

Es difícil llevar a cabo un diseño óptimo que cuente con un análisis completo de planeación, diseño, y ejecución de sistemas de redes de distribución de aguas, que contenga factores de tipo hidráulico, disponibilidad de tuberías, calidad de agua, entre otros. Los ingenieros creían haber encontrado la solución a este problema gracias al desarrollo de la nueva tecnología de los años 50, pero no bastó; aún en los años 80 con la tecnología moderna y los artículos dedicados a esto, no se había resuelto el problema. [1]

El uso de herramientas que puedan servir para dar una buena solución al problema de la optimización apenas está en marcha, una de ellas es la implementación de los algoritmos Simplex no lineal y el Gradiente Reducido Generalizado en Matlab y Excel respectivamente, para minimización de costos en tuberías de la red de distribución de agua (para el caso de esta investigación). [1]

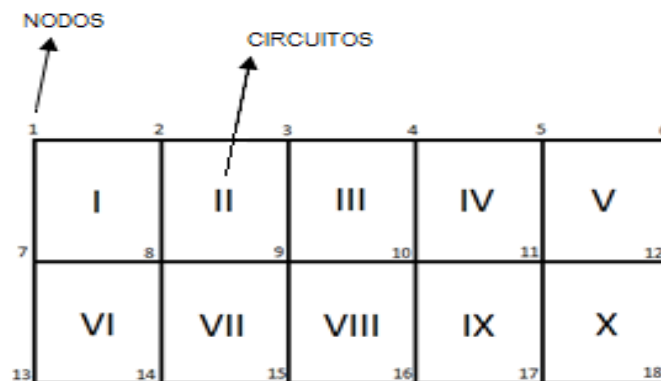
Es primordial, entonces, llegar al diseño de la red óptima, encontrando el conjunto de diámetros comerciales que minimice los costos de construcción en cuanto a

tuberías, satisfaciendo las restricciones hidráulicas en los nodos y las presiones mínimas establecidas. Todas las soluciones encontradas serán hidráulicamente válidas, pero cada una de ellas tendrá un costo distinto.

1. TOPOLOGÍA DE LA RED Y AJUSTE DE LA SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA.

En este trabajo se busca diseñar la red mostrada en las figuras 1, 2 y 3. Se diseña una hoja de cálculo en Excel y una función en Matlab tal que, fijando las presiones en los nodos, se generan los diámetros en cada tramo que signifiquen una solución a los caudales que deben fluir por cada uno de estos conductos, generándose así unos costos asociados con los mismos. La topología de la red abarca 10 circuitos, representada en la Figura 1.

Figura 1. Red ejemplo mostrando los circuitos.



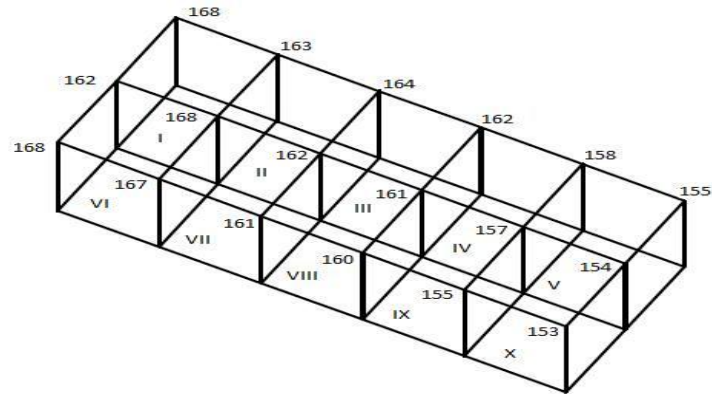
1.1. PROCEDIMIENTO PARA EL AJUSTE DE LA SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA

Se establecen las cotas piezométricas para cada uno de los nodos que presenta la malla de 10 circuitos, al igual que las correspondientes cotas de terreno, teniendo en cuenta que el caudal entra por el circuito I, y por gravedad se va distribuyendo hasta el circuito X. A partir de estos datos se determina la presión de agua en los nodos de cada tubería.

$$\text{Presión} = \text{Cota piezometrica} - \text{Cota terreno} \quad (1)$$

La Figura 2 muestra la superficie piezométrica empleada para el diseño de la red.

Figura 2. Superficie piezométrica de la red.



1.2. DISTRIBUCIÓN DE LOS CAUDALES EN LA RED

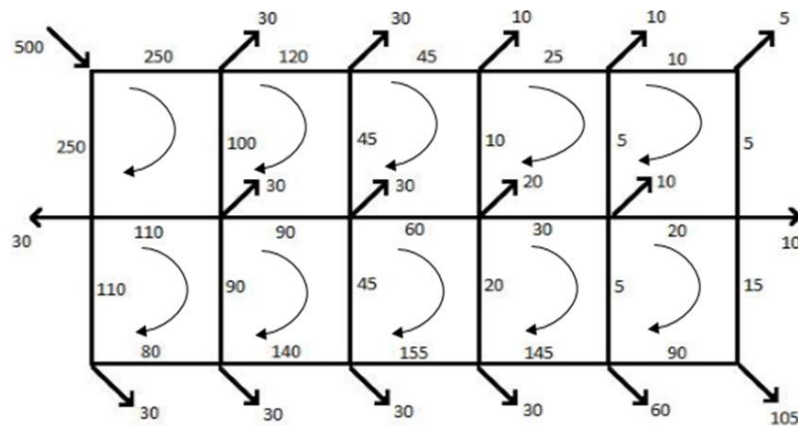
Para el caso de esta investigación, se establece una hipótesis de distribución de agua en la red, suponiendo un caudal de entrada, siendo este el que se va a distribuir para todo el acueducto, teniendo en cuenta el Método de Cross que se resume en dos leyes o principios:

- Ley de continuidad de masa en los nodos: La suma algebraica de los caudales en un nudo debe ser igual a cero.
- Ley de conservación de la energía en los circuitos: La suma algebraica de las pérdidas de energía en los tramos que conforman un anillo cerrado debe ser igual a cero.

Entonces, se tiene presente que hay que definir un sentido de recorrido, el mismo para todos los circuitos (en este caso horario) y se toman signos de caudales positivos si su sentido coincide con el del recorrido o negativo en caso contrario.

En la distribución de los caudales se pueden identificar dos tipos: caudal de consumo en ruta (Q_{CR}) que es el caudal que el tramo entrega a lo largo de su recorrido a las tuberías de relleno (y si es el caso a las domiciliarias conectadas al mismo) para cierta población y el caudal de transporte (Q_t) es aquel que circula por cada una de las tuberías de las mallas. A partir de esto se distribuyen los caudales de la red teniendo en cuenta el sentido de recorrido del flujo como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Distribución de caudales en la red.



Luego de tener establecidos los caudales de transporte y los caudales de consumo en ruta, al igual que las cotas piezométricas en cada nodo, son calculados los diámetros correspondientes a las tuberías de cada tramo, para luego obtener los diámetros comerciales que se emplearán para la construcción de la red.

El diseño de la red de distribución de agua fue realizado como se muestra en la Tabla 1:

- **CPI:** Cota piezométrica inicial (m)
- **CPT:** Cota piezométrica final. (m)
- **CTI:** Cota de terreno inicial (m)

- **CTI:** Cota de terreno final (m)
- **P:** Presión (m.c.a)
- **Q:** Caudal (L/seg)
- **D:** Diámetros calculados (pulgadas)
- **D1, D2:** Diámetros comerciales (pulgadas)
- **L1, L2:** Longitudes (m)
- **V1, V2:** Velocidades (m/seg)

Tabla 1. Información del diseño de la red de distribución de agua.

CIRCUITO I														
TRAMO	C.P.I [m]	C.P.F [m]	C.T.I [m]	C.T.F [m]	P[m.c.a]	Q [lps]	LONG.[m]	D[pulg]	D1[pulg]	D2[pulg]	L1 [m]	L2 [m]	V1 [m/seg]	V2 [m/seg]
1.2	168	163	141	141	27	250	720	17,019	16	18	291,54	428,46	1,93	1,52
2.8	163	168	141	142	22	100	650	11,767	10	12	45,61	604,39	1,97	1,37
8.7	168	162	142	140	26	110	720	12,002	12	14	719,11	0,89	1,51	1,11
7.1	162	168	140	141	22	250	650	16,053	16	18	626,10	23,90	1,93	1,52
CIRCUITO II														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
2.3	163	164	141	141	22	120	500	16,629	16	18	303,94	196,06	0,93	0,73
3.9	164	162	141	139	23	45	650	10,486	10	12	421,89	228,11	0,89	0,62
9.8	162	168	139	142	23	90	500	10,318	10	12	379,70	120,30	1,78	1,23
8.2	168	163	142	141	26	100	650	11,767	10	12	45,61	604,39	1,97	1,37
CIRCUITO III														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
3.4	164	162	141	140	23	45	450	9,7238	8	10	33,47	416,53	1,39	0,89
4.10	162	161	140	138	22	10	650	6,8281	6	8	247,03	402,97	0,55	0,31
10.9	161	162	138	139	23	60	450	12,506	12	14	294,76	155,24	0,82	0,60
9.3	162	164	139	141	23	45	650	10,486	10	12	421,89	228,11	0,89	0,62
CIRCUITO IV														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
4.5	162	158	140	137	22	25	450	6,7461	6	8	190,32	259,68	1,37	0,77
5.11	158	157	137	136	21	5	650	5,2474	4	6	96,46	553,54	0,62	0,27
11.10	157	161	136	138	21	30	450	7,2299	6	8	93,72	356,28	1,64	0,93
10.4	161	162	138	140	23	10	650	6,8281	6	8	247,03	402,97	0,55	0,31
CIRCUITO V														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
5.6	158	155	137	137	21	10	450	5,0529	4	6	94,93	355,07	1,23	0,55
6.12	155	154	137	135	18	5	650	5,2474	4	6	96,46	553,54	0,62	0,27
12.11	154	157	135	136	19	20	450	6,5749	6	8	235,29	214,71	1,10	0,62
11.5	157	158	136	137	21	5	650	5,2474	4	6	96,46	553,54	0,62	0,27
CIRCUITO VI														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
7.8	162	168	140	142	22	110	720	12,002	12	14	719,11	0,89	1,51	1,11
8.14	168	167	142	142	26	90	720	16,066	16	18	687,08	32,92	0,69	0,55
14.13	167	168	142	140	25	80	720	15,363	14	16	171,84	548,16	0,81	0,62
13.7	168	162	140	140	28	110	720	12,002	12	14	719,11	0,89	1,51	1,11
CIRCUITO VII														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
8.9	168	162	142	139	26	90	500	10,318	10	12	379,70	120,30	1,78	1,23
9.15	162	161	139	137	23	45	720	12,347	12	14	543,21	176,79	0,62	0,45
15.14	161	167	137	142	24	140	500	12,204	12	14	425,30	74,70	1,92	1,41
14.8	167	168	142	142	25	90	720	16,066	16	18	687,08	32,92	0,69	0,55
CIRCUITO VIII														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
9.10	162	161	139	138	23	60	450	12,506	12	14	294,76	155,24	0,82	0,60
10.16	161	160	138	137	23	20	720	9,0736	8	10	221,94	498,06	0,62	0,39
16.15	160	161	137	137	23	155	450	17,934	16	18	10,41	439,59	1,19	0,94
15.9	161	162	137	139	24	45	720	12,347	12	14	543,21	176,79	0,62	0,45
CIRCUITO IX														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
10.11	161	157	138	136	23	30	450	7,2299	6	8	93,72	356,28	1,64	0,93
11.17	157	155	136	136	21	5	720	4,6479	4	6	286,41	433,59	0,62	0,27
17.16	155	160	136	137	19	145	450	12,565	12	14	278,92	171,08	1,99	1,46
16.10	160	161	137	138	23	20	720	9,0736	8	10	221,94	498,06	0,62	0,39
CIRCUITO X														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
11.12	157	154	136	135	21	20	450	6,5749	6	8	235,29	214,71	1,10	0,62
12.18	154	153	135	135	19	15	720	8,1342	8	10	635,43	84,57	0,46	0,30
18.17	153	155	135	136	18	90	450	12,653	12	14	256,16	193,84	1,23	0,91
17.11	155	157	136	136	19	5	720	4,6479	4	6	286,41	433,59	0,62	0,27

2. PROGRAMACIÓN DEL DISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN EXCEL Y OPTIMIZACIÓN POR MEDIO DEL ALGORITMO GRADIENTE REDUCIDO GENERALIZADO.

La programación del diseño de la red realizada en Excel se desarrolló teniendo presente varios conceptos hidráulicos e ideas sobre el funcionamiento de una red de acueducto.

Se debe tener en cuenta que los circuitos están representados en forma rectangular y cada tubería de estas tienen dos nodos, por consiguiente cuando se refiere a cota piezométrica inicial se representa al nodo que empieza a transportar caudal y la cota piezométrica final indica el nodo que va a descargar el caudal, ya sea para las redes secundarias como para la red de distribución principal; así para cada tubería dependiendo del recorrido establecido en la red.

2.1. PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS Y DIÁMETROS DE LAS TUBERÍAS

La fricción que se presenta entre las paredes de una tubería y el flujo que esté circulando por ella, permite que se presenten unas pérdidas de energía, trayendo como consecuencia una disminución de presión en el sistema de flujo; en tuberías de longitudes grandes, estas pérdidas son importantes y deben ser tenidas en cuenta cuando se estén diseñando las tuberías. Hazen-Williams, propone una de las fórmulas empíricas más utilizadas para hallar estas pérdidas de carga.

El método de Hazen-Williams sólo se aplica para flujos de agua que están a temperaturas que oscilan entre 5°C – 25°C; es una fórmula de uso amigable debido a que el coeficiente de rugosidad no está en función de alguna otra

variable, sólo depende del tipo de material de la tubería (PVC), en el caso de este proyecto es de 120 (adimensional). [2]

$$HF = \left(\frac{10,67}{D^{4,87}} \right) * \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,85} * L \quad (2)$$

En donde:

- HF: pérdida de carga o de energía (m)
- Q: caudal (m³/s)
- C: coeficiente de rugosidad (adimensional, C=120)
- D: diámetro interno de la tubería
- L: longitud de la tubería

La variable que se tiene que despejar de la Ecuación 2, es el diámetro para cada tubería, pero como aún no se tienen las pérdidas de energía, se aplica la Ecuación 3 para obtenerlas. A partir de las cotas piezométricas establecidas para diseñar la red se pueden hallar éstas pérdidas en cada tramo:

$$HF = Cota\ piezometrica\ inicial - Cota\ piezometrica\ final \quad (3)$$

Después de obtener las pérdidas de energía HF , se hallan las pérdidas de energía unitaria Hf :

$$Hf = \frac{HF}{L} \quad (4)$$

2.2. PROCEDIMIENTO PARA ENCONTRAR LOS DIÁMETROS DE LAS TUBERÍAS Y SUS RESPETIVAS LONGITUDES

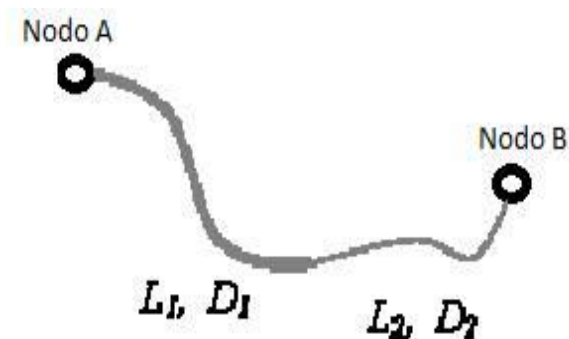
Con ayuda de la Ecuación 2, se despejan los diámetros que se utilizaran en cada tramo de las mallas:

$$D = \left[\left(\frac{10,67}{HF} \right) * \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,85} * L \right]^{\frac{1}{4,87}} \quad (5)$$

Los diámetros que se obtienen con la Ecuación 5 no son comerciales, por lo tanto se establecen dos diámetros comerciales para cada tramo: el inferior (D1) y superior (D2) inmediatos a este hallado, para efectos de estipular el costo final. Los diámetros comerciales de tuberías empleados para este diseño se siguen en este orden: 3", 4", 6", 8", 10", 12", 14", 16", 18" y 20".

Debido a que cada tramo va a tener dos diámetros comerciales distintos (D1, D2), estos mismos tendrán unas longitudes propias L1 y L2, respectivamente.

Figura 4. Ejemplo de tuberías.



Fuente: GARCÍA SOLANO, Mario. Acueducto integrado. Acueductos y Alcantarillados. Bucaramanga, Colombia. [3]

También, son calculadas las pérdidas unitarias para cada diámetro comercial correspondiente a cada tramo:

$$Hf_1 = \frac{10,67}{D_1^{4,87}} * \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,85} \quad (6)$$

$$Hf_2 = \frac{10,67}{D_2^{4,87}} * \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,85} \quad (7)$$

- Hf_1 = Pérdidas unitarias para cada diámetro comercial D1.
- Hf_2 = Pérdidas unitarias para cada diámetro comercial D2.

Ahora se tienen los datos suficientes para hallar las longitudes L1 y L2 para cada tramo, igualando las siguientes ecuaciones:

- $L_1 + L_2 = L_T$ (8)
- $(L_1 * Hf_1) + (L_2 * Hf_2) = Hf$ (9)

En la programación del diseño en Excel se aplica proceso de matriz inversa para determinar L1 y L2.

Los anteriores cálculos deben realizarse teniendo en cuenta que las velocidades máximas de conducción en las tuberías del sistema no deben exceder los 2 m/s, debido al tipo de material utilizado (PVC). Además, las presiones no deben ser inferiores a los 15 m.c.a según la norma RAS, es por esto que se deben ajustar las cotas piezométricas, al igual que los caudales que transportan las tuberías de tal forma que se cumplan las restricciones hidráulicas. [3]

2.3. VELOCIDADES DE DISEÑO

Las velocidades están dadas por las fuerzas de arrastre que se producen por los esfuerzos cortantes internos de la tubería y de los anclajes que estos requieran, es decir, depende directamente del tipo de tubería que se esté empleando; para el

caso de esta investigación, las velocidades de conducción del flujo en las tuberías de PVC no deberán sobrepasar los 2 m/seg. [4]


2.4. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN

Para el costo de tuberías que acarrea el diseño de la red, se consultaron los precios de tuberías según sus diámetros (Precios del año 2015). Se usaron tuberías para presiones de 125 psi, incluyendo el valor del IVA. Se debe tener en cuenta que estos precios son para longitudes de 6 metros, pero para un mejor análisis de esta investigación, se calcularon los precios por metro lineal.

Figura 5. Precio de las tuberías.

Tubo Unión Mecánica Rieber

D.N.	TUBOS PRESIÓN							
	RDE 21 - 200 psi		RDE 26 - 160 psi		RDE 32,5 - 125 psi		RDE 41 - 100 psi	
	SIN IVA	CON IVA	SIN IVA	CON IVA	SIN IVA	CON IVA	SIN IVA	CON IVA
2	38.159	44.265	31.663	36.730	26.303	30.511	22.311	25.880
2½	55.979	64.936	46.752	54.232				
3	83.524	96.888	69.661	80.807	55.957	64.910	46.189	53.579
4	137.816	159.867	115.055	133.464	92.260	107.021	76.450	88.682
6	300.923	349.070	246.464	285.898	201.095	233.270	162.084	188.017
8	509.726	591.282	419.292	486.379	342.169	396.916	273.777	317.581
10	802.409	930.794	652.636	757.058	534.862	620.440	428.116	496.614
12	1.122.727	1.302.364	919.998	1.067.197	753.475	874.031	606.324	703.336
14	1.392.324	1.615.095	1.144.712	1.327.866	932.860	1.082.118	765.709	888.223
16	1.827.451	2.119.843	1.518.790	1.761.797	1.240.592	1.439.087	1.030.780	1.195.705
18	2.345.497	2.720.776	1.946.785	2.258.270	1.572.944	1.824.615	1.341.010	1.555.571
20	2.921.576	3.389.028	2.508.260	2.909.581	2.066.644	2.397.307	1.701.715	1.973.990



Tramos de 6 m.

Fuente: TUBOS Y ACCESORIOS CELTA, Lista de precios Mayo 2015.

La función objetivo de esta investigación es:

$$COSTO\ TOTAL = \sum_{i=1}^n P_i * L_i \quad (10)$$

Dónde:

P_i = Precio por metro de tubería, correspondiente a un diámetro D_i

L_i = Longitud por metro de tubería, correspondiente a un diámetro D_i

Se debe tener en cuenta que para este proyecto los datos a variar al momento de la optimización del diseño de la red con los dos algoritmos que se van a presentar son las cotas piezométricas y los caudales de todos los circuitos.

2.5. OPTIMIZACIÓN POR MEDIO DE LA HERRAMIENTA SOLVER EN EXCEL, SEGÚN EL MÉTODO GRADIENTE REDUCIDO GENERALIZADO (GRG)

El algoritmo utilizado por la herramienta Solver en Excel para llevar a cabo la optimización del diseño es el Gradiente Reducido Generalizado (GRG). Solver forma parte de una serie de comandos a veces denominados herramientas de análisis de hipótesis; con esta herramienta se puede encontrar un valor óptimo (máximo o mínimo como en esta investigación) para un análisis de hipótesis fórmula en una celda, llamada celda objetivo, contando con unas restricciones en los valores de otras celdas de fórmula en una hoja de cálculo (Ver Anexo A). El algoritmo Gradiente Reducido Generalizado (GRG) parte de una solución válida denominada punto inicial; desde aquí el algoritmo intenta moverse en una dirección a través de la región válida, tratando que la función objetivo (costo total en tuberías) mejore, con este movimiento determinado la función objetivo será optimizada. Después de esto, el algoritmo busca otra dirección factible para seguir mejorando la optimización de la función objetivo; este procedimiento continúa hasta que el algoritmo no encuentra una dirección válida para mejorar la función objetivo. Cuando no se puede mejorar la optimización el algoritmo finaliza.

Teniendo en cuenta la complejidad de los programas no lineales, es importante conocer los mensajes que envía Solver al momento de finalizar el algoritmo:

- **Solver ha encontrado la solución. Todas las restricciones y condiciones de optimización están satisfechas.** En donde se debería intentar resolver el problema desde distintos puntos iniciales para incrementar la seguridad de la solución brindada.

- **Solver ha convergido hacia la solución actual. Todas las restricciones están satisfechas.** Esto manifiesta que en las últimas iteraciones el valor de la función objetivo se ha movido lentamente. Cuando se sospecha que la solución obtenida no es la óptima, se tendrá que reducir la convergencia del problema para evitar soluciones sub óptimas.
- **Solver no puede mejorar la solución actual. Todas las restricciones están satisfechas.** Indicando que el problema presenta degeneración y que el algoritmo ha entrado en un ciclo. Esto se podría evitar si se eliminan restricciones redundantes.

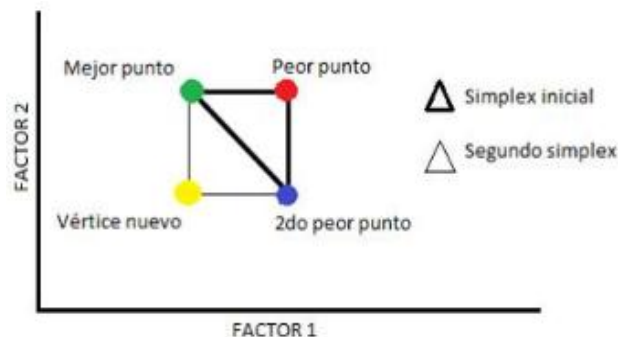
Este algoritmo llegará más rápido a la solución buscada si se parte de un punto que este relativamente cerca a éste. [6]

3. PROGRAMACIÓN EN MATLAB Y OPTIMIZACIÓN POR MEDIO DEL ALGORITMO SIMPLEX NO LINEAL.

Para la optimización llevada a cabo en Matlab se empleó el algoritmo de Simplex, el cual se encuentra en el programa como una función de optimización; esta función es Fminsearch la cual utiliza el principio del algoritmo simplex.

El método simplex no lineal propuesto por Nelder-Mead, en 1965, se desarrolla a partir de un polígono, puede ser un triángulo, y uno de sus vértices corresponde a la solución inicial o el diseño de la red, para el caso de este proyecto. Entonces, el algoritmo calcula el centroide entre los puntos que forman el triángulo, no considerando el del peor punto. Este peor punto es reflejado con respecto al centroide calculado, originándose un nuevo punto o vértice que corresponde a una nueva y mejor solución, de esta manera se crea un nuevo triángulo. Así, el algoritmo va realizando estos movimientos teniendo en cuenta que los nuevos puntos cumplan con las restricciones establecidas. Si al llevarse a cabo la reflexión y el nuevo punto no cumple las restricciones, entonces se pueden realizar movimientos de expansión o contracción en el polígono de tal forma que se obtenga una nueva solución válida. El método termina sus iteraciones hasta que no se encuentre un mejor punto o un mejor resultado (Ver Anexo B). [7]

Figura 6. Método Simplex No lineal



4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de la programación desarrollada e implementada en Excel y en Matlab se obtuvieron resultados que permiten comparar entre los costos de construcción del diseño de la red sin optimizar y los costos de construcción del diseño de la red optimizada; se debe tener en cuenta que estos costos sólo incluyen la tubería de la red (sin instalación).

A continuación se presenta la figura 7 que corresponde al diagrama de flujo de la metodología desarrollada para el diseño de redes, objetivo de ésta investigación y posteriormente se muestran la Tabla 2 y la Tabla 3, mostrando los datos optimizados por el método Gradiente Reducido Generalizado y el Simplex no lineal, respectivamente.

Figura 7. Diagrama de Flujo: Metodología desarrollada para el diseño de redes.

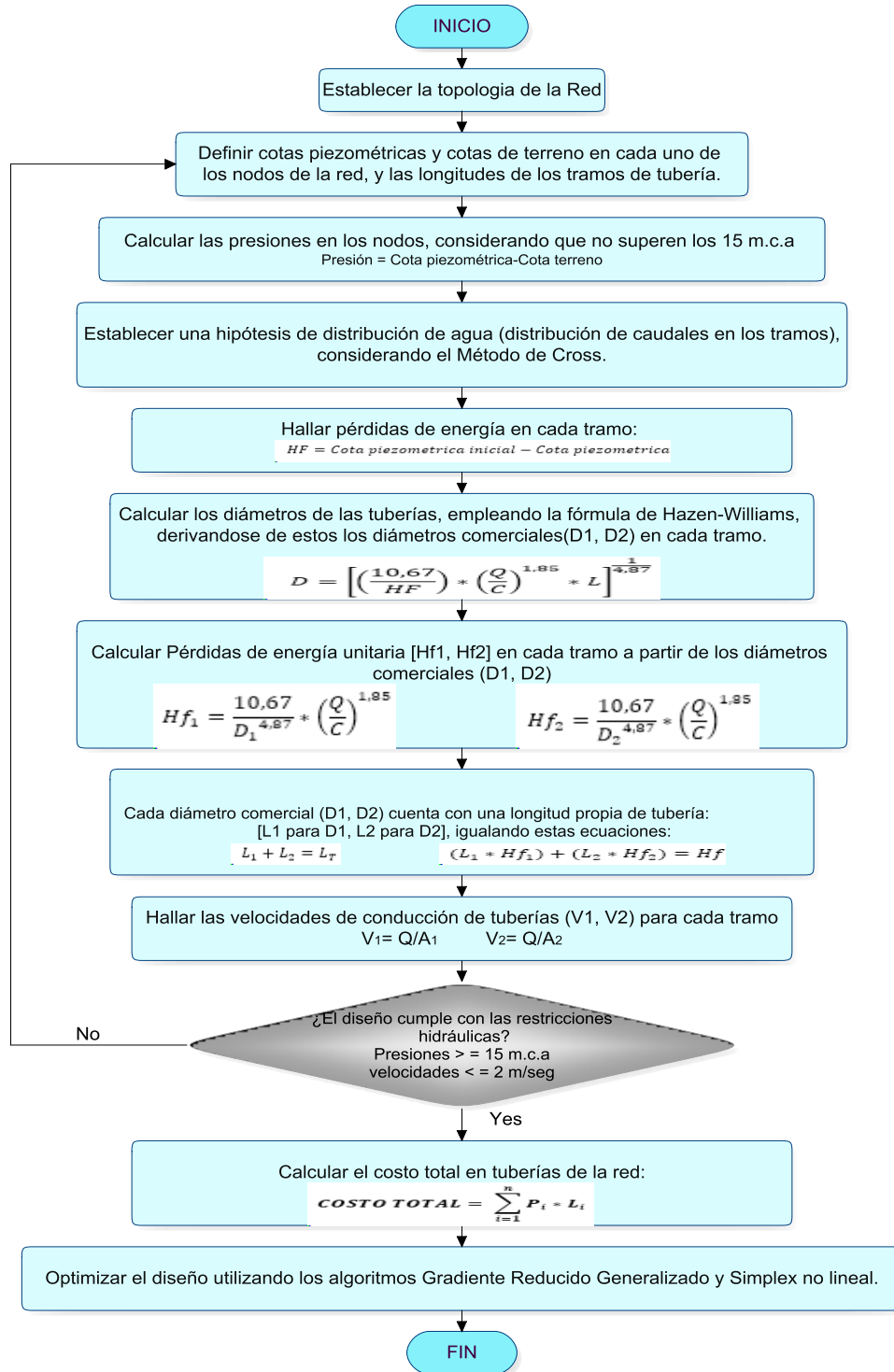


Tabla 2. Resultados del diseño optimizado de la Red en Excel con Gradiente Reducido Generalizado por circuitos.

CIRCUITO I														
TRAMO	C.P.I [m]	C.P.F [m]	C.T.I [m]	C.T.F [m]	P [m.c.a]	Q [lps]	LONG [m]	D [pulg]	D1 [pulg]	D2 [pulg]	L1 [m]	L2 [m]	V1 [m/seg]	V2 [m/seg]
1.2	168,0011075	162,9993383	141	141	27,0011	249,9999546	720	17,018098	16	18	291,974681	428,02532	1,9272704	1,52278155
2.8	162,9993383	168,0004272	141	142	21,9993	99,99999511	650	11,76614	10	12	45,7209541	604,27905	1,9735251	1,37050357
8.7	168,0004272	161,9992266	142	140	26,0004	109,999988	720	12,001118	12	14	719,381624	0,6183758	1,5075538	1,10759058
7.1	161,9992266	168,0011075	140	141	21,9992	249,9999455	650	16,052203	16	18	626,564264	23,435736	1,9272703	1,52278149
CIRCUITO II														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
2.3	162,99979733	164,0026745	141	141	21,998	119,999983	500	16,612805	16	18	308,406549	191,59345	0,9250898	0,73093517
3.9	164,0026745	161,9992236	141	139	23,0027	44,99999614	650	10,482761	10	12	423,401122	226,59888	0,8880863	0,61672659
9.8	161,9992236	168,0001813	139	142	22,9992	89,99999358	500	10,31813	10	12	379,813941	120,18606	1,7761726	1,23345319
8.2	168,0001813	162,9979733	142	141	26,0002	100	650	11,7656	10	12	45,8328458	604,16715	1,9735252	1,37050364
CIRCUITO III														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
3.4	164,0001645	162,0002508	141	140	23,0002	44,99999898	450	9,7239007	8	10	33,4629775	416,53702	1,3876349	0,88808634
4.10	162,0002508	160,9988102	140	138	22,0003	9,99999971	650	6,8261202	6	8	247,696537	402,30346	0,5482014	0,30836331
10.9	160,9988102	162,0007934	138	139	22,9988	59,99999664	450	12,500703	12	14	296,144819	153,85518	0,8223021	0,60414035
9.3	162,0007934	164,0001645	139	141	23,0008	45	650	10,48715	10	12	421,613193	228,38681	0,8880864	0,61672664
CIRCUITO IV														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
4.5	162,0000755	158,0000604	140	137	22,0001	25	450	6,7460738	6	8	190,318733	259,68127	1,3705036	0,7709083
5.11	158,0000604	156,9998189	137	136	21,0001	5	650	5,2471862	4	6	96,5092442	553,49076	0,6167266	0,27410073
11.10	156,9998189	161,0000532	136	138	20,9998	30	450	7,229784	6	8	93,73061	356,26939	1,6446044	0,92508996
10.4	161,0000532	162,0000755	138	140	23,0001	10	650	6,8281071	6	8	247,044798	402,9552	0,5482015	0,30836332
CIRCUITO V														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
5.6	158,0000367	155,0000919	137	137	21	9,999999918	450	5,0528879	4	6	94,9239009	355,0761	1,2334533	0,54820145
6.12	155,0000919	153,9997713	137	135	18,0001	4,999999951	650	5,2471009	4	6	96,5251667	553,47483	0,6167266	0,27410073
12.11	153,9997713	157,0001072	135	136	18,9998	19,99999952	450	6,574797	6	8	235,336901	214,6631	1,0964029	0,61672662
11.5	157,0001072	158,0000367	136	137	21,0001	5	650	5,2475223	4	6	96,4464667	553,55353	0,6167266	0,27410073
CIRCUITO VI														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
7.8	161,9997415	168,0036658	140	142	21,9997	110	720	12	12	14	719,999992	8,208E-06	1,507554	1,1075907
8.14	168,0036658	166,9943906	142	142	26,0037	89,99997833	720	16,035943	16	18	702,073068	17,926932	0,6938173	0,54820132
14.13	166,9943906	168,002289	142	140	24,9944	79,99998944	720	15,33856	14	16	179,403202	540,5968	0,8055204	0,61672656
13.7	168,002289	161,9997415	140	140	28,0023	109,999988	720	12,000565	12	14	719,687557	0,3124426	1,5075538	1,10759058
CIRCUITO VII														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
8.9	168	162,0013508	142	139	26	90	500	10,318946	10	12	379,53323	120,46677	1,7761727	1,23345328
9.15	162,0013508	160,9985024	139	137	23,0014	44,99999571	720	12,33985	12	14	546,587212	173,41279	0,6167266	0,45310524
15.14	160,9985024	167,0001758	137	142	23,9985	139,9999902	500	12,203467	12	14	425,546135	74,453865	1,918705	1,40966079
14.8	167,0001758	168	142	142	25,0002	90	720	16,066954	16	18	686,794411	33,205589	0,6938175	0,54820146
CIRCUITO VIII														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
9.10	162	161,0007106	139	138	23	60	450	12,507616	12	14	294,266994	155,73301	0,8223022	0,60414038
10.16	161,0007106	159,998082	138	137	23,0007	19,99999899	720	9,0686676	8	10	223,48298	496,51702	0,6167266	0,39470503
16.15	159,998082	161,0012315	137	137	22,9981	154,9999864	450	17,922908	16	18	12,270115	437,72988	1,1949078	0,94412465
15.9	161,0012315	162	137	139	24,0012	45	720	12,350185	12	14	541,744382	178,25562	0,6167266	0,45310529
CIRCUITO IX														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
10.11	161	157,0001305	138	136	23	30	450	7,2299194	6	8	93,7086455	356,29135	1,6446044	0,92508996
11.17	157,0001305	154,9997308	136	136	21,0001	4,999999902	720	4,6476992	4	6	286,492133	433,50787	0,6167266	0,27410072
17.16	154,9997308	160,0001513	136	137	18,9997	144,9999921	450	12,564729	12	14	278,981957	171,01804	1,9872302	1,46000584
16.10	160,0001513	161	137	138	23,0002	20	720	9,0738394	8	10	221,847143	498,15286	0,6167266	0,39470505
CIRCUITO X														
TRAMO	C.P.I	C.P.F	C.T.I	C.T.F	P	Q	LONG.	D	D1	D2	L1	L2	V1	V2
11.12	157	154,001107	136	135	21	20	450	6,5754465	6	8	235,152985	214,84702	1,0964029	0,61672664
12.18	154,001107	152,9985731	135	135	19,0011	14,9999987	720	8,1300007	8	10	637,969304	82,030696	0,4625449	0,29602876
18.17	152,9985731	155,000343	135	136	17,9986	89,99999524	450	12,650628	12	14	256,746784	193,25322	1,2334532	0,90621052
17.11	155,000343	157	136	136	19,0003	5	720	4,6480537	4	6	286,342662	433,65734	0,6167266	0,27410073

Tabla 3. Resultados del diseño optimizado de la Red en Matlab con Simplex no lineal por circuitos.

CIRCUITO	TRAMO	CPI (m)	CPF (m)	PI (m.c.a)	PF (m.c.a)	D1(pulg)	D2(pulg)	L1 (m)	L2(m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)
I	1.2	167,873735	161,19378	26,8737	20,1938	16	18	719,563	0,437	1,916	1,5139
	2.8	161,19378	167,816718	20,1938	25,8167	10	12	203,5231	446,477	1,9807	1,3755
	8.7	167,816718	161,777703	25,8167	21,7777	12	14	719,39	0,61	1,5127	1,1114
	7.1	161,777703	167,873735	21,7777	26,8737	16	18	600,6722	49,3278	1,9624	1,5505
II	2.3	161,19378	166,373004	20,1938	25,373	12	14	499,9936	0,0064	1,6951	1,2454
	3.9	166,373004	162,770307	25,373	23,7703	8	10	134,7292	515,271	1,3994	0,8956
	9.8	162,770307	167,816718	23,7703	25,8167	10	12	262,2418	237,758	1,7786	1,2351
	8.2	167,816718	161,19378	25,8167	20,1938	10	12	203,5231	446,477	1,9807	1,3755
III	3.4	166,373004	161,706695	25,373	21,7067	8	10	382,8014	67,1986	1,3885	0,8886
	4.10	161,706695	165,515949	21,7067	27,5159	4	6	104,5901	545,41	1,2438	0,5528
	10.9	165,515949	162,770307	27,5159	23,7703	10	12	444,5648	5,4352	1,139	0,791
	9.3	162,770307	166,373004	23,7703	25,373	8	10	134,7292	515,271	1,3994	0,8956
IV	4.5	161,706695	158,651378	21,7067	21,6514	6	8	114,4139	335,586	1,3598	0,7649
	5.11	158,651378	158,045531	21,6514	22,0455	4	6	13,1189	636,881	0,628	0,2791
	11.10	158,045531	165,515949	22,0455	27,5159	6	8	272,1196	177,88	1,7083	0,9609
	10.4	165,515949	161,706695	27,5159	21,7067	4	6	104,5901	545,41	1,2438	0,5528
V	5.6	158,651378	157,268537	21,6514	20,2685	4	6	0,8316	449,168	1,2678	0,5635
	6.12	157,268537	154,023431	20,2685	19,0234	4	6	552,4084	97,5916	0,6146	0,2732
	12.11	154,023431	158,045531	19,0234	22,0455	6	8	381,8093	68,1907	1,0781	0,6064
	11.5	158,045531	158,651378	22,0455	21,6514	4	6	13,1189	636,881	0,628	0,2791
VI	7.8	161,777703	167,816718	21,7777	25,8167	12	14	719,39	0,61	1,5127	1,1114
	8.14	167,816718	163,355333	25,8167	21,3553	10	12	31,9222	688,078	1,7885	1,242
	14.13	163,355333	167,887439	21,3553	27,8874	10	12	168,6398	551,36	1,5951	1,1077
	13.7	167,887439	161,777703	27,8874	21,7777	12	14	658,5739	61,4261	1,5602	1,1463
VII	8.9	167,816718	162,770307	25,8167	23,7703	10	12	262,2418	237,758	1,7786	1,2351
	9.15	162,770307	160,570973	23,7703	23,571	10	12	470,5434	249,457	0,883	0,6132
	15.14	160,570973	163,355333	23,571	21,3553	14	16	477,6756	22,3244	1,3517	1,0349
	14.8	163,355333	167,816718	21,3553	25,8167	10	12	31,9222	688,078	1,7885	1,242
VIII	9.10	162,770307	165,515949	23,7703	27,5159	10	12	444,5648	5,4352	1,139	0,791
	10.16	165,515949	157,718914	27,5159	20,7189	6	8	719,9485	0,0515	1,1201	0,6301
	16.15	157,718914	160,570973	20,7189	23,571	14	16	384,1065	65,8935	1,4902	1,1409
	15.9	160,570973	162,770307	23,571	23,7703	10	12	470,5434	249,457	0,883	0,6132
IX	10.11	165,515949	158,045531	27,5159	22,0455	6	8	272,1196	177,88	1,7083	0,9609
	11.17	158,045531	153,904864	22,0455	17,9049	4	6	719,2928	0,7072	0,6159	0,2737
	17.16	153,904864	157,718914	17,9049	20,7189	12	14	123,3717	326,628	1,9749	1,4509
	16.10	157,718914	165,515949	20,7189	27,5159	6	8	719,9485	0,0515	1,1201	0,6301
X	11.12	158,045531	154,023431	22,0455	19,0234	6	8	381,8093	68,1907	1,0781	0,6064
	12.18	154,023431	150,027019	19,0234	15,027	6	8	646,601	73,399	0,8149	0,4584
	18.17	150,027019	153,904864	15,027	17,9049	10	12	149,1931	300,807	1,7917	1,2442
	17.11	153,904864	158,045531	17,9049	22,0455	4	6	719,2928	0,7072	0,6159	0,2737

A continuación en la Tabla 4 se muestran los costos por tramos y el costo total del diseño de la red de acueducto sin optimizar y posteriormente en las Tabla 5 y 6, se exponen los resultados optimizados por cada algoritmo empleado en esta investigación. En el diseño total de la red hay tramos comunes, por lo tanto se recomienda conocerlos de antemano para no sumar costos que eleven el valor total de la red.

Tabla 4. Resultados de los costos del diseño de la red sin optimizar.

CIRCUITO	COSTOS POR TRAMO	
	Para L1	Para L2
I	\$ 69.925.767,48	\$ 130.295.083,74
	\$ 4.716.658,81	\$ 88.042.308,71
	\$ 104.753.871,55	\$ 160.759,46
	\$ 150.169.768,75	\$ 7.266.728,11
II	\$ 72.900.071,00	\$ 59.621.421,30
	\$ 43.626.813,69	\$ 33.229.379,56
	\$ 39.263.877,52	\$ 17.524.694,99
III	\$ 2.214.414,06	\$ 43.072.227,45
	\$ 9.604.291,16	\$ 26.657.239,74
	\$ 42.938.566,66	\$ 27.997.581,19
IV	\$ 7.399.224,87	\$ 17.178.693,61
	\$ 1.720.552,23	\$ 21.520.685,48
	\$ 3.643.541,11	\$ 23.569.104,64
V	\$ 1.693.196,45	\$ 13.804.645,94
	\$ 1.720.552,23	\$ 21.520.685,48
	\$ 9.147.840,92	\$ 14.203.369,82
VI	\$ 164.794.325,56	\$ 10.011.461,90
	\$ 30.991.508,40	\$ 131.475.453,45
	\$ 104.753.871,55	\$ 160.759,46
VII	\$ 79.129.823,05	\$ 31.885.314,70
	\$ 61.954.625,23	\$ 13.471.878,90
VIII	\$ 14.681.668,97	\$ 51.503.950,84
	\$ 2.496.253,86	\$ 133.681.130,60
IX	\$ 5.108.676,66	\$ 16.857.189,33
	\$ 40.631.457,85	\$ 30.853.960,46
X	\$ 42.035.417,87	\$ 8.745.200,62
	\$ 37.315.877,70	\$ 34.958.905,30
COSTO TOTAL	\$ 1.149.332.515,19	\$ 1.009.269.814,81
	\$ 2.158.602.330,00	

Tabla 5. Resultados de los costos de diseño de la red optimizada en Excel con Gradiente Reducido Generalizado.

CIRCUITO	COSTOS POR TRAMO	
	Para L1	Para L2
I	\$ 70.029.493,58	\$ 130.163.569,67
	\$ 4.727.927,51	\$ 88.026.434,45
	\$ 104.793.637,67	\$ 111.525,92
	\$ 150.280.079,16	\$ 7.126.865,80
II	\$ 73.970.641,47	\$ 58.264.047,52
	\$ 43.783.202,97	\$ 33.009.073,20
	\$ 39.275.925,35	\$ 17.507.723,15
III	\$ 2.213.665,31	\$ 43.073.397,88
	\$ 9.630.027,70	\$ 26.613.448,24
	\$ 43.139.957,77	\$ 27.748.243,40
IV	\$ 7.399.274,52	\$ 17.178.609,13
	\$ 1.721.418,98	\$ 21.518.796,26
	\$ 3.644.089,59	\$ 23.568.171,38
V	\$ 1.693.141,48	\$ 13.804.765,76
	\$ 1.721.702,99	\$ 21.518.177,22
	\$ 9.149.505,71	\$ 14.200.537,12
VI	\$ 168.390.701,94	\$ 5.451.624,74
	\$ 32.355.905,65	\$ 129.660.968,96
	\$ 104.838.203,52	\$ 56.349,96
VII	\$ 79.622.359,37	\$ 31.275.516,63
	\$ 61.990.084,24	\$ 13.427.977,91
VIII	\$ 14.783.995,80	\$ 51.343.995,90
	\$ 2.942.960,46	\$ 133.114.752,34
IX	\$ 5.110.111,48	\$ 16.854.061,90
	\$ 40.639.812,23	\$ 30.843.617,08
X	\$ 42.203.372,81	\$ 8.482.657,32
	\$ 37.400.773,82	\$ 34.853.797,33
COSTO TOTAL	\$ 1.157.451.973,09	\$ 998.798.706,17
	\$ 2.156.250.679,26	

Tabla 6. Resultados de los costos optimizados en Matlab, Simplex no lineal.

CIRCUITOS	Costo por tramo	
	Para L1	Para L2
I	\$ 172.590.000,00	\$ 132.900,00
	\$ 144.070.000,00	\$ 15.001.000,00
II	\$ 72.835.000,00	\$ 1.154,70
	\$ 21.046.000,00	\$ 65.039.000,00
III	\$ 25.323.000,00	\$ 6.948.900,00
	\$ 8.912.700,00	\$ 53.283.000,00
IV	\$ 4.448.200,00	\$ 22.200.000,00
	\$ 1.865.600,00	\$ 21.205.000,00
V	\$ 14.833,00	\$ 17.463.000,00
	\$ 9.853.200,00	\$ 3.794.200,00
	\$ 234.000,00	\$ 24.761.000,00
VI	\$ 104.790.000,00	\$ 110.010,00
	\$ 17.439.000,00	\$ 80.318.000,00
	\$ 95.936.000,00	\$ 11.078.000,00
VII	\$ 27.118.000,00	\$ 34.635.000,00
	\$ 86.150.000,00	\$ 5.354.500,00
	\$ 3.301.000,00	\$ 100.230.000,00
VIII	\$ 45.972.000,00	\$ 791.750,00
	\$ 69.275.000,00	\$ 15.804.000,00
	\$ 48.658.000,00	\$ 36.339.000,00
IX	\$ 10.580.000,00	\$ 11.767.000,00
	\$ 17.972.000,00	\$ 58.908.000,00
	\$ 27.990.000,00	\$ 3.409,50
X	\$ 14.844.000,00	\$ 4.511.000,00
	\$ 25.139.000,00	\$ 4.855.500,00
	\$ 15.428.000,00	\$ 43.819.000,00
	\$ 12.830.000,00	\$ 27.494,00
COSTO TOTAL	\$ 1.722.995.351,20	

Se debe aclarar que los costos que se están manejando en este proyecto son sólo de tuberías, no incluyen instalación.

Comparando los resultados en cuanto a los costos optimizados en Excel utilizando el algoritmo Gradiente Reducido Generalizado (GRG), con respecto a los costos del diseño sin optimizar, se puede observar que hay una diferencia de aproximadamente \$ 2. 351. 650. En cuanto a los costos optimizados por medio del

Simplex no lineal en Matlab, se presenta una diferencia de \$ 435. 606.979 en relación a los costos del diseño no optimizado.

El algoritmo utilizado en Matlab (Simplex no lineal) lleva a cabo una mejor minimización de los costos del diseño frente al utilizado en Excel (GRG, Gradiente Reducido Generalizado).

A continuación se muestran las Tabla 7 y Tabla 8, en las que se presenta una clasificación de los diámetros utilizados con sus respectivas longitudes a emplear en el diseño sin optimizar y optimizado con la herramienta Excel.

Tabla 7. Clasificación de los diámetros optimizando con Gradiente Reducido Generalizado.

DIAMETRO (pulg)	SIN OPTIMIZAR Longitud (metros)	OPTIMIZADO Longitud (metros)
3		
4	574,2599761	574,450445
6	2662,102624	2662,632337
8	2124,478252	2127,832479
10	1846,357338	1844,020757
12	4189,378803	4194,140071
14	945,2610595	946,3271134
16	2467,237832	2481,885475
18	1120,924115	1098,711323
20		
TOTAL	15930	15930

Tabla 8. Clasificación de los diámetros optimizando con Simplex no lineal.

DIAMETRO (pulg)	SIN OPTIMIZAR Longitud (metros)	OPTIMIZADO Longitud (metros)
3		
4	574,2599761	1390,2418
6	2662,102624	3864,6505
8	2124,478252	1172,6383
10	1846,357338	2313,0976
12	4189,378803	4480,701
14	945,2610595	1250,4529
16	2467,237832	1408,4531
18	1120,924115	49,7648
20		
TOTAL	15930	15930

De acuerdo a la Tabla 7, se puede evidenciar que tanto para los diámetros de 4” y 6” las longitudes empleadas serán las mismas tanto para el diseño no optimizado como para el optimizado; en los diámetros 8”, 10”, 12”, 14”, 16” las longitudes en el diseño optimizado serán un poco mayores que en los no optimizados. Pero la gran diferencia la hace la tubería de 18”, que al ser la de mayor precio en el mercado y que se estaría empleando en una cantidad considerablemente menor en el diseño optimizado que en el no optimizado, hace que disminuya el costo total en el diseño minimizado.

Considerando la Tabla 8, se observa que la optimización de la red en las tuberías de 8”y 18” son las que permiten una mejor reducción de costo total con respecto al diseño no optimizado.

5. CONCLUSIONES

Se ajustó una superficie piezométrica, eligiendo entre distintas hipótesis de distribución de agua una que cumpliera con las normas que se establecen para las mallas principales de una red de acueducto, como se presenta en la Tabla 1.

En cuanto a la topología de la red, se estableció una red de distribución de agua conformada por 10 circuitos de manera rectangular.

Los algoritmos y las herramientas computacionales escogidas para llevar a cabo la solución del problema fueron las más convenientes (Gradiente Reducido Generalizado, Simplex no lineal), además de ser las más utilizadas por los estudiantes, profesores, entre otros, para mayor entendimiento.

Se pudieron comparar los distintos costos del diseño de la red de acueducto, tanto en la herramienta Excel como en Matlab.

Se programó en Matlab con ayuda Fminsearch que trabaja directamente con el algoritmo Simplex no lineal, una función que permitiera llevar a cabo una disminución de costos de tuberías.

Al emplear los algoritmos de optimización, se pudo evidenciar que el Simplex que se aplicó en Matlab, tiene una potencia más eficiente para efectos de minimizar costos, teniendo en cuenta que en este caso la optimización fue de \$ 435. 600.000, mientras en Excel con el algoritmo Gradiente Reducido Generalizado la disminución fue sólo de \$ 2. 351. 650.

Considerando que el costo del diseño planteado fue de \$ 2.158.602.330, se presenta una diferencia porcentual de 0,11 % entre el costo del diseño optimizado

en Excel y el costo del diseño sin optimizar. En Matlab, la diferencia de costos con respecto al diseño sin optimizar es del 20%, por consiguiente se afirma que el algoritmo Simplex empleado en Matlab lleva a cabo una mejor optimización que el GRG en Excel.

Los diseños programados tanto en Excel como en Matlab pueden servir para llevar a cabo trabajos en empresas de diseño de acueducto que tengan en cuenta las presiones presentes en las tuberías como datos iniciales.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

[1] RODRÍGUEZ, Katya - FUENTES, Oscar - JIMÉNEZ, Martin - CRUZ, Faustino. Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable utilizando un algoritmo genético multiobjetivo [Proyecto Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua]. João Pessoa, Brasil. Junio 2006.

[2] MILIARIUM INGENIERIA CIVIL Y MEDIO AMBIENTE, Cálculo de Pérdidas de Energía en tuberías. Madrid, 2004. [En línea]. Disponible en: <<http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.htm>>

[3] GARCÍA SOLANO, Mario. Acueducto integrado. Acueductos y Alcantarillados. Bucaramanga, Colombia.

[4] Empresas Públicas de Medellín, EPM, Reglamento, Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto de EPM. Colombia, 2009.

[5] CELTA, Lista de Precios Mayo 2015. Disponible en: <<http://www.celta.com.co/precios.pdf>> (consultado 25 de Mayo 2015)

[6] SÁNCHEZ ALVAREZ, Isidro - LÓPEZ ARES, Susana. Optimización con Solver. Revista de Estudios Empresariales de Cartagena. Departamento de Publicaciones de la U. de Murcia. Volumen III. España, 1998

[7] WIKIPEDIA, The Free Encyclopedia. Nelder–Mead method [En línea] Disponible en < https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_Nelder-Mead > (consultado 17 de Julio de 2015).

BIBLIOGRAFIA

CELTA, Lista de Precios Mayo 2015. Disponible en: <<http://www.celta.com.co/precios.pdf>> (consultado 25 de Mayo 2015)

Empresas Públicas de Medellín, EPM, Reglamento, Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto de EPM. Colombia, 2009.

GARCÍA SOLANO, Mario. Acueducto integrado. Acueductos y Alcantarillados. Bucaramanga, Colombia.

MILIARIUM INGENIERIA CIVIL Y MEDIO AMBIENTE, Cálculo de Pérdidas de Energía en tuberías. Madrid, 2004. [En línea]. Disponible en: <<http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.htm>>

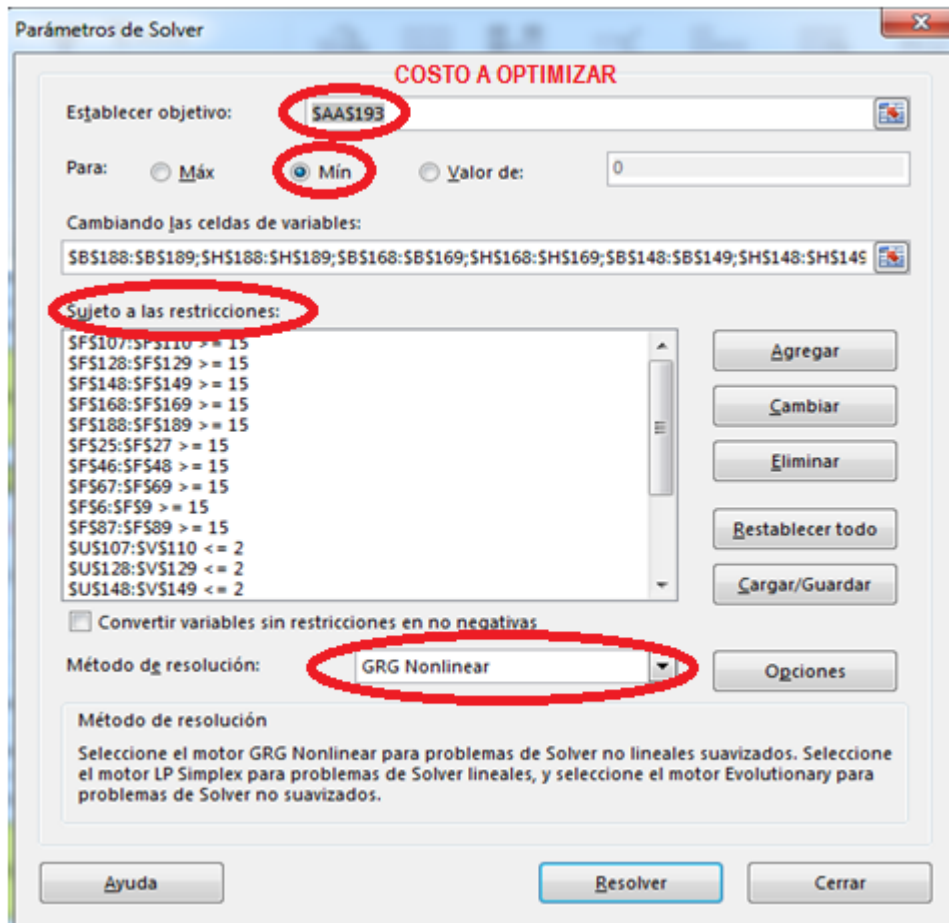
RODRÍGUEZ, Katya - FUENTES, Oscar - JIMÉNEZ, Martin - CRUZ, Faustino. Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable utilizando un algoritmo genético multiobjetivo [Proyecto Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua]. João Pessoa, Brasil. Junio 2006.

SÁNCHEZ ALVAREZ, Isidro - LÓPEZ ARES, Susana. Optimización con Solver. Revista de Estudios Empresariales de Cartagena. Departamento de Publicaciones de la U. de Murcia. Volumen III. España, 1998

WIKIPEDIA, The Free Encyclopedia. Nelder–Mead method [En línea] Disponible en < https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_Nelder-Mead > (consultado 17 de Julio de 2015).

ANEXOS

Anexo A. Gradiente Reducido Generalizado en Excel



Anexo B. Simplex no lineal en Matlab

The screenshot displays the MATLAB environment with the following components:

- Editor:** Shows the script 'Optimizar.m' with MATLAB code defining circuit components (CPI, CTI) and a matrix Q.
- Workspace:** A table showing the values of variables after execution. The 'fval' variable is highlighted in red, indicating the optimized cost.

Name	Value	Min	Max
CTI	10W double	135	142
fval	1.7230e+09	1.7230e+09	1.7230e+09
L	10W double	450	720
Q	10W double	5	250
x	10W double	48808	254.55...
x0	10W double	5	250
Xn	10W double	49829	254.55...
Y	1.7230e+09	1.7230e+09	1.7230e+09
Y0	2.1585e+09	2.1585e+09	2.1585e+09

Costo Optimizado: 1.7230e+09
 Costo sin optimizar: 2.1585e+09