

PROYECTO DE GRADO

**PRUEBA DEL PROGRAMA RIDAP BASADA EN DISEÑOS REALES DE
REDES INTERNAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**

Willy Alberto Zambrano Chávez

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
PREGRADO EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2015**

AGRADECIMIENTOS

A Juan Saldarriaga por su asesoría y a Daniel Vallejo por su apoyo constante.

A mis padres y a toda mi familia por el esfuerzo que hacen cada día en pro de mis metas, además de motivarme todo el tiempo.

Por último, a María Alejandra Rondón Villabona por hacer parte importante de toda esta etapa de mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	1
1.1.1	Objetivo General	1
1.1.2	Objetivos Específicos	1
2	Marco teórico	3
2.1	Método de diseño	3
2.1.1	Método de Hunter	3
2.1.2	Metodología RIDAP	5
3	Metodología	18
3.1	Diseño	18
3.1.1	Topología	19
3.1.2	Presión mínima	19
3.1.3	Curvas de los aparatos	19
3.1.4	Frecuencia	19
3.1.5	Usuarios	20
3.1.6	Duración	20
3.2	Análisis de presiones	20
3.3	Análisis de costos	21
4	Resultados	23
4.1	Caso de estudio 1 – Red del edificio W	23
4.2	Caso de estudio 2 – Red del edificio ML	25
4.3	Caso de estudio 3 – Red residencial Casita Roja	27
4.4	Caso de estudio 4 – Red residencial San Fernando	30
5	Análisis de resultados	34
5.1	Análisis de presiones	34
5.1.1	Caso de estudio 1 – Red del edificio W	34

5.1.2	Caso de estudio 2 – Red del edificio ML.....	35
5.1.3	Caso de estudio 3 – Red residencial Casita Roja	35
5.1.4	Caso de estudio 4 – Red residencial San Fernando.....	36
5.2	Análisis de costos	37
5.2.1	Caso de estudio 1 – Red del edificio W	37
5.2.2	Caso de estudio 2 – Red del edificio ML.....	38
5.2.3	Caso de estudio 3 – Red residencial Casita Roja	38
5.2.4	Caso de estudio 4 – Red residencial San Fernando.....	39
6	Conclusiones.....	40
7	Recomendaciones	41
8	Referencias.....	42
9	Anexos.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interfaz RIDAP.....	7
Figura 2. Interfaz RIDAP.....	8
Figura 3. Diseño original - Red Edificio W – Piso 1.	23
Figura 4. Especificación de aparatos - Red Edificio W – Piso 1.....	24
Figura 5. Diseño RIDAP - Red Edificio W- Piso 1.	24
Figura 6. Diseño original - Red Edificio ML – Piso 8.	25
Figura 7. Especificación de aparatos - Red Edificio ML – Piso 8.	26
Figura 8. Diseño RIDAP - Red Edificio ML - Piso 8.....	27
Figura 9. Diseño original - Red Casita Roja.	28
Figura 10. Especificación de aparatos - Red Casita Roja.....	29
Figura 11. Diseño RIDAP - Red Casita Roja.	30
Figura 12. Diseño original - Red San Fernando.....	31
Figura 13. Especificación de aparatos - Red San Fernando.	32
Figura 14. Diseño RIDAP - Red San Fernando.....	33

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva Presión-Caudal típica - Bañera.	10
Gráfica 2. Curva Presión-Caudal típica – Llave Manguera.	11
Gráfica 3. Curva Presión-Caudal típica - Regadera.	12
Gráfica 4. Curva Presión-Caudal típica - Lavamanos.	13
Gráfica 5. Curva Presión-Caudal típica - Lavaplatos.	14
Gráfica 6. Curva Presión-Caudal típica - Sanitario.	15
Gráfica 7. Curva Presión-Caudal típica - Fregadero.	16
Gráfica 8. Patrón de consumo adoptado para la comprobación de presiones.	20
Gráfica 9. Relación diámetro-precio.	21
Gráfica 10. Verificación de presiones nudo 67 - Red Edificio W – Piso 1.	34
Gráfica 11. Verificación de presiones nudo 27 - Red Edificio ML – Piso 5.	35
Gráfica 12. Verificación de presiones nudo 8 - Red Casita Roja.	36
Gráfica 13. Verificación de presiones nudo 83 - Red San Fernando.	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Unidades de Hunter para cada aparato (González, 2010)	4
Tabla 2. Conversiones Unidades de Hunter-Caudal (Castro, Garzón, & Ortiz, 2006)	5
Tabla 3. Presiones mínimas de cada aparato (Código Colombiano de Fontanería, 2004).	9
Tabla 4. Curva Presión-Caudal típica - Bañera.....	9
Tabla 5. Curva Presión-Caudal típica – Llave Manguera.....	10
Tabla 6. Curva Presión-Caudal típica - Regadera.....	11
Tabla 7. Curva Presión-Caudal típica - Lavamanos.....	12
Tabla 8. Curva Presión-Caudal típica - Lavaplatos.....	13
Tabla 9. Curva Presión-Caudal típica - Sanitario.....	14
Tabla 10. Curva Presión-Caudal típica - Fregadero.....	15
Tabla 11. Frecuencia y duración de aparatos sanitarios típicos (Blokker, 2010).....	16
Tabla 12. Código de colores de aparatos.....	19
Tabla 13. Relación diámetro-precio para tuberías de distribución interna.....	21
Tabla 14. Comparación de costos – Red Edificio W.....	38
Tabla 15. Comparación de costos – Red Edificio ML.....	38
Tabla 16. Comparación de costos – Red Casita Roja.....	38
Tabla 17. Comparación de costos – Red San Fernando.....	39

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	3
Ecuación 2	6
Ecuación 3	6
Ecuación 4	6
Ecuación 5	7
Ecuación 6	7

1 INTRODUCCIÓN

El diseño de redes internas de agua potable es vital en la cotidianidad. Todas las edificaciones deben contar con una red que asegure el suministro de agua potable para el uso de los usuarios de dichas estructuras. Un correcto diseño asegura la comodidad de los usuarios. No obstante, se tienen casos en los que las redes destinadas a cumplir la función mencionada, fallan. Esto se debe a que los diseños que se hacen hoy en día están basados en metodologías incluso de comienzos del siglo pasado. Por esta razón, se plantea la solución de implementar la metodología RIDAP para diseñar y tener una mejor certeza a la hora de implementar una red de distribución interna. Todo por medio de un software del mismo nombre que fue diseñado en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) de la Universidad de los Andes, por Daniel Vallejo (2012).

La finalidad de este software es la optimización del diseño de una red interna de distribución de agua potable (Vallejo, 2012). Dicha optimización atiende motivos como la comodidad del usuario al momento de usar los diferentes aparatos de una red, y la disminución de costos. En este proyecto de grado se expone lo presentado anteriormente, por medio de diseños de redes de edificaciones existentes. Para verificar que la red sea funcional se plantea una comprobación de presiones en redes diseñadas utilizando el programa. En cuanto a costos, se compara el costo de las redes diseñadas convencionalmente contra su diseño realizado utilizando RIDAP.

A lo largo del documento se puede encontrar la diferencia entre la metodología utilizada para el diseño optimizado y la metodología convencional. Además, se hace el diseño de las redes internas de distribución de agua potable para 4 edificaciones reales. Con estos diseños, se presenta un análisis detallado de presiones, el cual muestra que se garantiza la comodidad del usuario; y un análisis de costos, que se hace comparando los costos de las redes originales contra el costo de las redes diseñadas con el programa RIDAP.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Comprobar el funcionamiento del programa RIDAP con el fin de obtener un diseño optimizado redes de distribución interna de agua potable.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para cumplir con el objetivo general de este proyecto de grado, es necesario que los siguientes objetivos específicos se cumplan:

-
- Realizar el diseño de redes internas de distribución de agua potable en edificaciones existentes.
 - Comprobar que dichos diseños cumplan restricciones de presión que garanticen la comodidad del usuario de los diferentes aparatos.
 - Verificados los diseños, hacer un análisis de costos de la red diseñada con la metodología RIDAP contra la red original de la edificación.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Método de diseño

El método de diseño comúnmente utilizado en el país y en general, es el método de Hunter. Aunque para el diseño de la red de distribución interna de agua potable se propone utilizar el programa RIDAP, un software desarrollado en Visual Basic de Excel que cumple con la misma función de diseñar los diámetros de la red de distribución pero que optimiza el diseño, para generar ahorros en la inversión total de los diferentes proyectos.

Las diferencias entre los métodos se explican a continuación:

2.1.1 Método de Hunter

Método publicado en 1932, relativamente al comienzo del siglo XX. Es muy utilizado porque considera la opción de que no todos los aparatos hidrosanitarios estén funcionando simultáneamente (más cercano a la realidad). El método se basa en la probabilidad p de que cierto aparato se encuentre en uso en un momento de observación aleatorio.

La forma general para definir la probabilidad de que R de N aparatos conectados a la red, estén en funcionamiento, es:

$$P_R^N = {}_N C_R * (1 - p)^{N-R} * p^R \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde,

p^R es la probabilidad conjunta de encontrar R aparatos encendidos a la vez, $(1-p)^{N-R}$ asegura que sólo los R aparatos estén encendidos.

La *combinatoria* da todas las posibles combinaciones de tener R aparatos de un conjunto de N , en uso.

Para determinar el caudal que demanda cada aparato estando en uso, se utiliza un valor de referencia conocido como “Unidades de Hunter”.

Tabla 1. Unidades de Hunter para cada aparato (González, 2010)

Aparato	Tipo de Uso	Tipo de Suministro	Unidades de Aparato		Total	
			Agua Fría	Agua Caliente		
Sanitario	Público	Fluxómetro	10,00	-	10,00	
Sanitario		Tanque	5,00	-	5,00	
Orinal Pedestal		Fluxómetro 1"	10,00	-	10,00	
Orinal Pared		Fluxómetro 3/4"	5,00	-	5,00	
Lavamanos		-	1,50	1,50	2,00	
Tina		-	3,00	3,00	4,00	
Regadera Ducha		Mezclador	3,00	3,00	4,00	
Lavaplatos		Mezclador	3,00	3,00	4,00	
Sanitario		Privado	Fluxómetro	6,00	-	6,00
Sanitario			Tanque	4,00	-	3,00
Lavamanos	Mezclador		0,75	0,75	1,00	
Tina	Mezclador		1,50	1,50	2,00	
Regadera Ducha	Mezclador		1,50	1,50	2,00	
Grupo de Baño	Sanitario Fluxómetro		6,75	2,25	8,00	
Grupo de Baño	Sanitario Tanque		4,50	2,25	6,00	
Lavaplatos	Mezclador		1,50	1,50	2,00	
Lavadora	-		2,25	2,25	3,00	

Estos valores se convierten a l/s utilizando tablas de conversión. Para el caso colombiano, se tiene la siguiente:

Tabla 2. Conversiones Unidades de Hunter-Caudal (Castro, Garzón, & Ortiz, 2006)

Unidades	Caudal (l/s)		Unidades	Caudal (l/s)		Unidades	Caudal (l/s)	
	Flujómetro	Tanque		Flujómetro	Tanque		Flujómetro	Tanque
1	0.63	0.13	66	1.91	0.68	775	5.97	3.16
2	0.67	0.14	69	1.93	0.70	811	6.17	3.27
3	0.71	0.15	73	1.96	0.72	850	6.37	3.39
4	0.75	0.16	76	1.98	0.74	931	6.80	3.66
5	0.78	0.17	82	2.02	0.78	1009	7.20	3.89
6	0.82	0.18	88	2.05	0.82	1091	7.61	4.13
7	0.86	0.19	95	2.09	0.86	1173	8.02	4.38
8	0.89	0.20	102	2.13	0.89	1254	8.41	4.61
9	0.92	0.21	108	2.17	0.92	1335	8.80	4.85
10	0.96	0.22	116	2.21	0.96	1418	9.19	5.08
11	0.99	0.23	124	2.25	1.00	1500	9.57	5.31
12	1.02	0.24	132	2.30	1.04	1583	9.94	5.55
13	1.05	0.25	140	2.35	1.07	1668	10.32	5.78
14	1.08	0.26	148	2.39	1.11	1755	10.69	6.02
15	1.11	0.27	158	2.45	1.15	1845	11.08	6.27
16	1.14	0.28	168	2.52	1.18	1926	11.41	6.49
18	1.19	0.30	176	2.57	1.21	2018	11.78	6.74
20	1.24	0.32	186	2.63	1.25	2110	12.14	6.99
21	1.27	0.33	195	2.69	1.28	2204	12.50	7.24
23	1.32	0.34	205	2.75	1.31	2298	12.86	7.49
25	1.36	0.36	214	2.80	1.34	2388	13.18	7.74
26	1.38	0.37	223	2.86	1.37	2480	13.51	7.98
28	1.42	0.39	234	2.92	1.40	2575	13.83	8.24
30	1.46	0.41	245	2.98	1.44	2670	14.15	8.49
31	1.48	0.41	270	3.13	1.51	2765	14.45	8.74
33	1.52	0.43	295	3.28	1.59	2862	14.76	9.00
35	1.55	0.45	329	3.48	1.69	2960	15.12	9.26
37	1.58	0.46	365	3.69	1.80	3060	15.49	9.53
39	1.62	0.48	396	3.87	1.90	3150	15.82	9.76
42	1.66	0.50	430	4.06	2.01	3620	17.61	11.01
44	1.69	0.52	460	4.23	2.11	4070	19.38	12.18
46	1.71	0.54	490	4.40	2.21	4480	21.04	13.24
48	1.74	0.55	521	4.58	2.32	5380	24.69	15.53
50	1.76	0.57	559	4.79	2.45	6280	28.13	17.78
52	1.78	0.58	596	5.00	2.58	7280	31.65	20.28
54	1.80	0.60	631	5.19	2.70	8300	35.21	22.93
57	1.83	0.62	666	5.38	2.82	9000	37.81	24.89
60	1.86	0.64	700	5.57	2.93	10000	41.52	28.01
63	1.88	0.66	739	5.78	3.05			

2.1.2 Metodología RIDAP

Primero, se calcula la línea de gradiente hidráulico (LGH), utilizando una función objetivo como sugiere I Pai Wu (1975). La función objetivo plantea que la línea de gradiente hidráulico debe ser una curva cóncava hacia arriba y con una flecha máxima del 15% en la mitad de ella. Luego, se determina el número de aparatos aguas abajo de cada nodo. Esto con el fin de calcular el caudal, pues los aparatos son los que demandan caudales.

Lo siguiente es determinar la probabilidad de que cada uno de los aparatos se encuentre en uso en un determinado momento del día. Dicha probabilidad se calcula así:

$$p = \frac{\lambda\mu N}{3600}$$

Ecuación 2

Dónde,

λ es la frecuencia de uso de un aparato en específico [usos/hora*persona].

μ es la duración promedio en la que se utiliza cada tipo de aparato [segundos].

N es el número de personas con acceso al aparato [persona].

Teniendo las probabilidades de uso de cada aparato, se calcula la probabilidad de todos los estados para cada tubo. El número de estados de un tubo es determinado por el número de aparatos aguas abajo de este.

Por último, se calcula la probabilidad final de la red (Distribución binomial de Poisson), utilizando:

$$P_{NN}(X = x) = {}_{NN}C_x * (1 - p)^{NN-x} * p^x$$

Ecuación 3

Dónde,

NN es el número total de estados.

x representa el estado para el que se quiere encontrar la probabilidad.

Se calcula el caudal de cada aparato con las curvas ingresadas por el usuario y la presión mínima ingresada como parámetro de diseño. Se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_n = \frac{Q_2 - Q_1}{P_2 - P_1} (P_n - P_2) + Q_2$$

Ecuación 4

El caudal de diseño se determina utilizando el valor del estado de diseño. Para esto, se encuentra el caudal de los nodos de demanda, aguas abajo de cada tubo. Los caudales se ordenan de mayor a menor y se suman tantos caudales como el valor de estado lo determine. El resultado obtenido es el caudal de diseño, con el cual se procede a calcular el diámetro de cada tubería.

Teniendo el caudal de diseño, se calcula el diámetro de cada tubería utilizando la siguiente ecuación:

$$H - z_2 = \frac{16Q^2}{\pi^2 d^4 2g} \left(f \frac{l}{d} + \sum km \right)$$

Ecuación 5

Dónde,

H es la altura piezométrica al inicio de la tubería.

z_2 es la altura topográfica al final de la tubería.

Q es el caudal de diseño de la tubería.

d es el diámetro de la tubería.

f es el valor del factor de fricción de la tubería.

l es la longitud de la tubería.

$\sum km$ es el valor para la suma de pérdidas menores para la tubería.

De la ecuación anterior no es posible despejar directamente el diámetro, y se hace una modificación para realizar el cálculo del mismo de forma iterativa. El factor de fricción también se encuentra iterando. Esta forma de calcular el diámetro, permite encontrar el diámetro continuo de cada tubería, el cual es posteriormente redondeado.

La ecuación del diámetro resulta ser:

$$d_j = \left(\frac{8Q^2}{\pi H g} \left(f \frac{l}{d_i} + \sum km \right) \right)^{\frac{1}{4}}$$

Ecuación 6

Para utilizar el programa para el diseño, se debe ingresar la red como un formato *.inp. Para esto, se utilizar el programa EPANET (Rossman, 2000) para realizar el trazado. En dicha red, es importante verificar las longitudes de las tuberías, el ks (0.0015 mm para PVC) y no importa el diámetro que asigne el programa por default, pues con el proceso de diseño se obtendrá el diámetro comercial a utilizar.

El programa RIDAP lee el archivo de red y lo organiza para proceder con el diseño. Cuando está listo para diseñar, se muestra la siguiente interfaz:

Datos Importantes					
Gravedad	9,81	m/s ²	Prob Falla	0,95	Val<1
nu	1,1708E-06	m ² /s	F	0	(-)
Exponente	2,6		Redondeo		
					Lista de Diametros
					Pulgadas(in) Milímetros (mm)

Figura 1. Interfaz RIDAP.

Datos Tanque						
Nodo	Altura					
1	20					
APARATOS						
Nodo (ID)	Presión min (m.c.a.)	Curva (Tipo)	Frecuencia usos/(hora*persona)	Personas Unidad	Duración (μ) (seg)	LISTO
	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <input type="checkbox"/> Agregar <input type="checkbox"/> Eliminar </div> </div>					
7						
9						
10						
15						
16						

Figura 2. Interfaz RIDAP.

A continuación se hace una aclaración de los parámetros que se encuentra en el documento de forma predeterminada (verde) y los parámetros a ingresar (rojo):

2.1.2.1 Parámetros de diseño generales

Las casillas señaladas en color verde representan valores predeterminados. La gravedad y la viscosidad cinemática, son constantes. Las unidades de gravedad son m/s^2 y la la viscosidad cinemática ν , se ingresa en m^2/s .

Otro parámetro general será el *Exponente*, este se requiere para realizar el redondeo de los diámetros discretos obtenidos en el diseño. Se tienen 3 tipos de redondeo: el mayor, el menor y el potencial. El redondeo potencial se debe a la relación entre los caudales y el diámetro. Para este redondeo se sugiere 2.6 (Takahashi, Saldarriaga, Hernández, Díaz, & Ochoa, 2011). El redondeo menor consiste en aproximar el diámetro discreto obtenido, al menor más cercano. El redondeo mayor, por su parte, aproxima el diámetro obtenido al mayor más cercano. Y, el redondeo potencial se hace utilizando la relación mencionada.

Otro parámetro a ingresar es una lista con los diámetros comerciales con los que se cuente en cada lugar en donde se construyan distintos proyectos. Se ingresan en centímetros o en pulgadas.

La probabilidad de falla está dada para las redes en general. La flecha (F) se utiliza para optimizar la línea de gradiente hidráulico. Un valor de 0.15 es recomendado (Wu, 1975) pero 0 está bien, igualmente.

2.1.2.2 Parámetros de diseño específicos

Para poder realizar el diseño, se deben ingresar unos parámetros específicos, los cuales está representados por casillas en color rojo. A continuación se explican cada uno de ellos:

- **Presión mínima:** A partir de esta presión se calcula la línea de gradiente hidráulico (LGH) ideal, además de los caudales iniciales. Para los casos de estudio de este proyecto de

grado, se utilizan las presiones mínimas sugeridas por la NTC 1500 (Código Colombiano de Fontanería) (2004).

Tabla 3. Presiones mínimas de cada aparato (Código Colombiano de Fontanería, 2004).

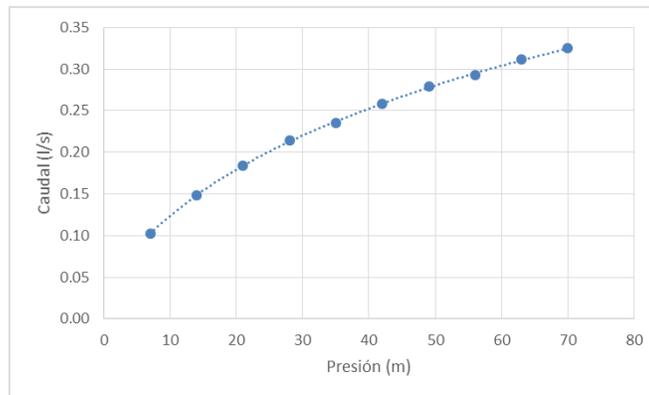
Aparato Sanitario	Presión Mínima (m)
Inodoro con Tanque	1.02
Inodoro con Fluxómetro	1.02
Orinal	0.51
Orinal con Fluxómetro	1.53
Lavamanos	0.51
Lavaplatos	0.28
Ducha	1.02
Llave para Lavadora	0.51
Llave para Manguera	0.51

- **Curva:** A los nudos de terminación, se debe asignar una curva que corresponda con el aparato que se tiene en este. Estas curvas relacionan la presión de servicio con los caudales iniciales. Si no se cuenta con un aparato, se debe asignar la curva *Nada*. Las curvas utilizadas en los diseños de este proyecto, son predeterminadas por el programa. Sin embargo, si se considera necesario, se pueden modificar dichas curvas.

Las curvas mencionadas son las siguientes:

Tabla 4. Curva Presión-Caudal típica - Bañera.

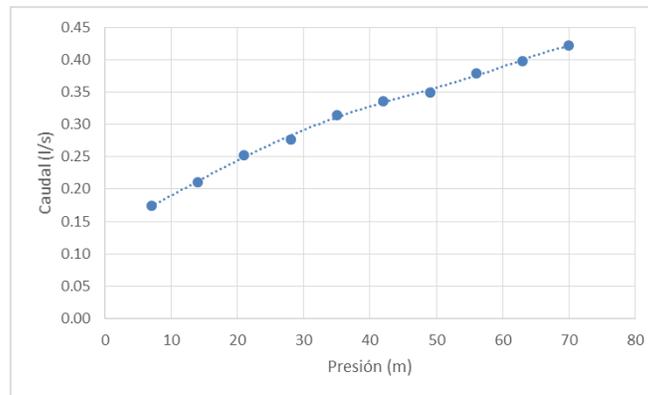
ID Curva: Bañera	
Presión (m)	Q (l/s)
7	0.1027
14	0.1485
21	0.1835
28	0.2143
35	0.2357
42	0.2585
49	0.2796
56	0.2932
63	0.3111
70	0.3247



Gráfica 1. Curva Presión-Caudal típica - Bañera.

Tabla 5. Curva Presión-Caudal típica – Llave Manguera.

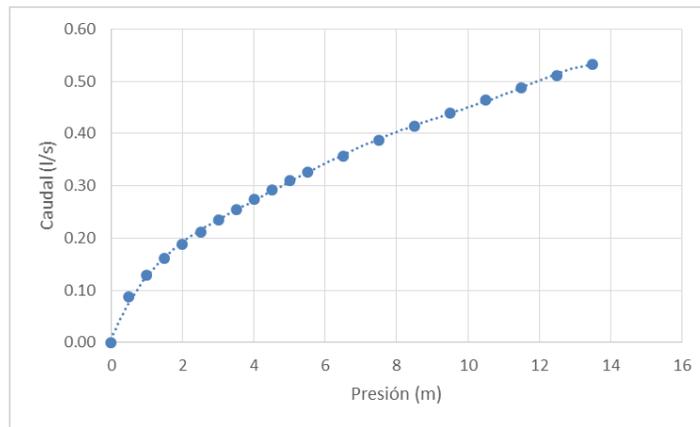
ID Curva: Llave Manguera	
Presión (m)	Q (l/s)
7	0.1737
14	0.2111
21	0.2529
28	0.2772
35	0.3148
42	0.3351
49	0.3493
56	0.3787
63	0.3981
70	0.4214



Gráfica 2. Curva Presión-Caudal típica – Llave Manguera.

Tabla 6. Curva Presión-Caudal típica - Regadera.

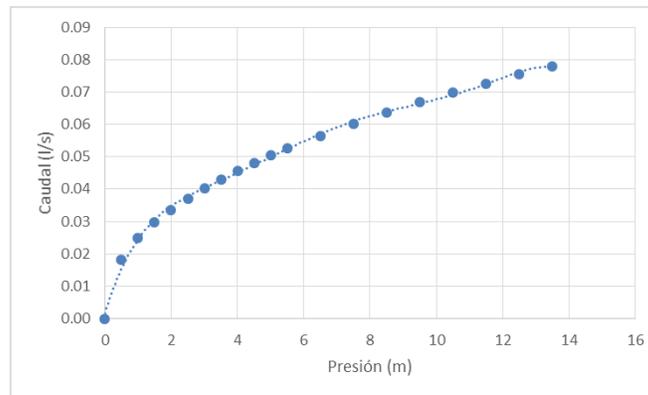
ID Curva: Regadera	
Presión (m)	Q (l/s)
0	0
0.5	0.0879
1	0.1284
1.5	0.1603
2	0.1876
2.5	0.2120
3	0.2342
3.5	0.2548
4	0.2741
4.5	0.2923
5	0.3097
5.5	0.3262
6.5	0.3575
7.5	0.3866
8.5	0.4140
9.5	0.4399
10.5	0.4647
11.5	0.4884
12.5	0.5112
13.5	0.5332



Gráfica 3. Curva Presión-Caudal típica - Regadera.

Tabla 7. Curva Presión-Caudal típica - Lavamanos.

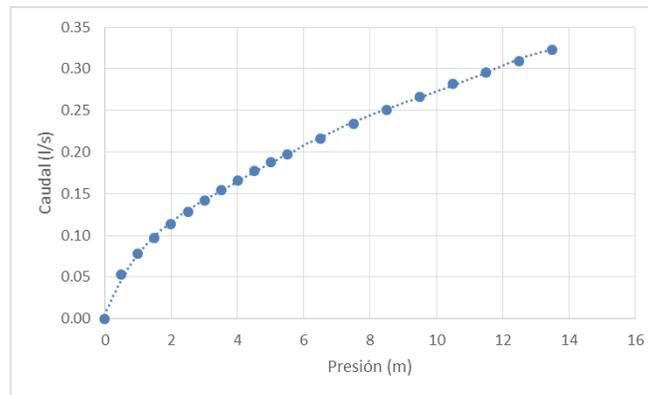
ID Curva: Lavamanos	
Presión (m)	Q (l/s)
0	0
0.5	0.0183
1	0.0248
1.5	0.0296
2	0.0336
2.5	0.0371
3	0.0402
3.5	0.0430
4	0.0456
4.5	0.0481
5	0.0503
5.5	0.0525
6.5	0.0565
7.5	0.0602
8.5	0.0636
9.5	0.0668
10.5	0.0698
11.5	0.0726
12.5	0.0754



Gráfica 4. Curva Presión-Caudal típica - Lavamanos.

Tabla 8. Curva Presión-Caudal típica - Lavaplatos.

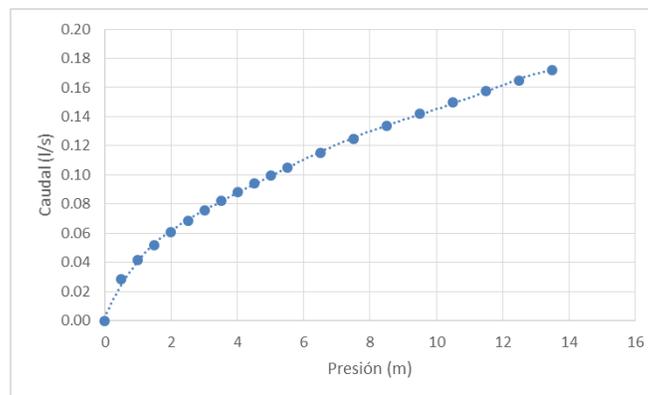
ID Curva: Lavaplatos	
Presión (m)	Q (l/s)
0	0
0.5	0.0532
1	0.0778
1.5	0.0971
2	0.1137
2.5	0.1284
3	0.1419
3.5	0.1544
4	0.1661
4.5	0.1771
5	0.1876
5.5	0.1977
6.5	0.2166
7.5	0.2342
8.5	0.2508
9.5	0.2666
10.5	0.2816
11.5	0.2959
12.5	0.3097
13.5	0.3231



Gráfica 5. Curva Presión-Caudal típica - Lavaplatos.

Tabla 9. Curva Presión-Caudal típica - Sanitario.

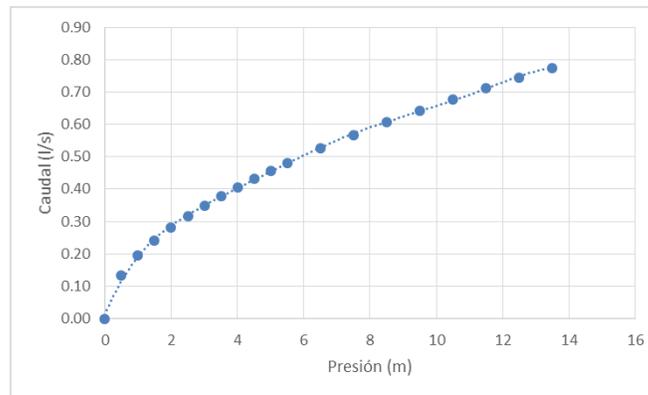
ID Curva: Sanitario	
Presión (m)	Q (l/s)
0	0
0.5	0.0283
1	0.0414
1.5	0.0517
2	0.0605
2.5	0.0683
3	0.0755
3.5	0.0821
4	0.0884
4.5	0.0943
5	0.0998
5.5	0.1052
6.5	0.1153
7.5	0.1246
8.5	0.1335
9.5	0.1418
10.5	0.1498
11.5	0.1575
12.5	0.1648
13.5	0.1719



Gráfica 6. Curva Presión-Caudal típica - Sanitario.

Tabla 10. Curva Presión-Caudal típica - Fregadero.

ID Curva: Fregadero	
Presión (m)	Q (l/s)
0	0
0.5	0.1345
1	0.1944
1.5	0.2411
2	0.2809
2.5	0.3162
3	0.3484
3.5	0.3781
4	0.4059
4.5	0.4321
5	0.4569
5.5	0.4806
6.5	0.5252
7.5	0.5667
8.5	0.6056
9.5	0.6425
10.5	0.6776
11.5	0.7111
12.5	0.7433
13.5	0.7743



Gráfica 7. Curva Presión-Caudal típica - Fregadero.

- **Frecuencia:** Corresponde a la frecuencia de uso de cada aparato. Para este caso se utilizan las siguientes frecuencias μ , encontradas en la literatura:

Tabla 11. Frecuencia y duración de aparatos sanitarios típicos (Blokker, 2010).

Tipo de Aparato Sanitario	Descripción o Aclaraciones Relevantes	Frecuencia		Duración	
		μ (1/día)	Función de Probabilidad	μ	Función de Probabilidad
Bañera	120 litros	0.044	Poisson	10 min	Indeterminada
Lavamanos	Lavado de manos y afeitado Lavado de Dientes	4.1	Poisson	40 s 15 s	Log Normal
Lava Vajillas	Dependiendo del tipo y Marca	0.3	Poisson	Un patrón específico de lavado (4 ciclos de entrada de agua con un total de 84 segundos; 0.167 L/s = 14 L)	
Ducha	Normal Ahorradora de Agua	0.7	Binomial	8.5 min	Chi Cuadrado
Sanitario	Cisterna de 6 Litros Cisterna de 9 Litros	6	Poisson	2.4 min 3.6 min	Indeterminada
Lavadora	Dependiendo del tipo y Marca	0.3	Poisson	Un patrón específico de lavado (4 ciclos de entrada de agua con un total de 5 minutos; 0.167 L/s = 50 L)	
Manguera	Jardín Otro	0.44	Poisson	300 s 15 s	Log Normal
Lavaplatos	Consumo Lavando platos Lavando manos Otros	12.6	Binomial Negativa (r=3; p = 0.192)	16 s 48 s 15 s 37 s	Log Normal

Cabe aclarar que este valor se debe ingresar en usos/persona/hora, por lo cual se debe dividir los valores de la tabla entre 24.

-
- **Usuarios:** es el número de usuarios que tienen acceso a cada uno de los aparatos de la red interna de agua potable, puede tener una variación importante de acuerdo al tipo de edificación.
 - **Duración:** es el uso de los aparatos dado en tiempo. Esta información también puede ser obtenida de la Tabla 11 y se debe ingresar en segundos.

3 METODOLOGÍA

3.1 Diseño

Para realizar la prueba del programa RIDAP, se hace un diseño de un trazado de redes definido previamente que se basa en edificaciones reales; 2 de tipo universitario y 2 de tipo residencial. Esto se realiza con el fin de no sesgar el análisis a un único tipo de edificación. Las edificaciones universitarias corresponden a los edificios ML y W de la Universidad de los Andes, mientras que las edificaciones residenciales corresponden a 2 edificios ubicados en la ciudad de Cartagena, Colombia.

Es importante mencionar que el diseño se puede realizar de dos formas. La primera forma consiste en diseñar las redes piso a piso. La otra forma es diseñar la red completa. En este caso, es importante tener en cuenta la cota de cada uno de los nudos de la red y que el embalse está por encima de toda la red.

Se escogen las edificaciones universitarias para hacer un diseño piso a piso debido a su complejidad. Esto es posible porque las edificaciones universitarias analizadas, cuentan con un sistema de bombas hidroneumático que permite la misma altura de presión en cada piso (20 m de acuerdo a la NTC 1500, (2004)). Este tipo de diseño permite mostrar los resultados de estas edificaciones con claridad. En la sección 5.1, se muestra sólo un piso de cada edificación. Se seleccionan los pisos que ilustran mejor los resultados obtenidos. Para el caso del edificio W, se selecciona el piso 1. Para el caso del ML, se selecciona el piso 8.

Para las edificaciones de tipo residencial, se escoge diseñar la red completa. La selección se hace porque se tienen redes no tan complejas que permiten observar los resultados de forma clara, en su totalidad.

Para diseñar las redes de cada una de las edificaciones, se sigue el proceso explicado en la sección 2.1.2. Los parámetros generales son los predeterminados por el programa RIDAP. La lista de diámetros comerciales se obtiene de los manuales técnicos de PAVCO para redes de distribución interna (PAVCO, s.f.).

El método de redondeo escogido es el redondeo mayor. Esto se hace porque al aproximar los diámetros discretos encontrados al mayor diámetro comercial, se encuentra un diseño optimizado que no deja de ser conservador. Así se puede tener una red confiable que garantice que no se presenten fallas. El hecho de escoger este tipo de redondeo, no implica que no haya un ahorro considerable en los costos de la red.

3.1.1 Topología

Lo primero que se debe hacer es obtener el trazado de la red en formato .inp. Con este fin se utiliza el programa EPANET (Rossman, 2000), partiendo de los planos de las edificaciones, en formato .dwg.

Muchos de los parámetros a seleccionar dependen de los aparatos hidrosanitarios que se tengan en la red. Para poder determinar los parámetros adecuadamente, se especifica un código de colores para los nudos de terminación, los cuales van a representar cada uno de los aparatos de estos. El código de colores se presenta a continuación:

Tabla 12. Código de colores de aparatos.

Aparato	Color
Sube	Rojo
Lavamanos	Azul claro
Inodoros/orinales	Amarillo
Llave de lavadora	Verde
Llaves de manguera	Naranja
Lavaplatos	Oliváceo
Fregadero	Púrpura
Regadera	Azul oscuro

Conociendo el aparato correspondiente a cada nudo, se procede a escoger los siguientes parámetros:

3.1.2 Presión mínima

Esta presión se escoge para cumplir las recomendaciones de la NTC 1500 y corresponde a los valores dados por la Tabla 3, los cuales son específicos de cada aparato.

3.1.3 Curvas de los aparatos

Las curvas de presión-caudal específicas de cada aparato que se utilizan son las que tiene el programa. Estas se muestran en la sección 2.1.2.2.

3.1.4 Frecuencia

Al igual que los parámetros anteriores, depende del tipo de aparato y los valores son obtenidos de la Tabla 11. Como se aclara antes, se debe dividir entre 24 este valor para ingresar el parámetro en las unidades correctas.

3.1.5 Usuarios

El número de usuarios es el parámetro que varía dependiendo del tipo de edificación. Para las redes universitarias se utiliza un número de 110 usuarios, considerando que son el número de usuarios que tienen acceso a los aparatos hidrosanitarios en cada piso. Para las edificaciones residenciales, se asume que cada familia que habita la edificación cuenta con 5 miembros.

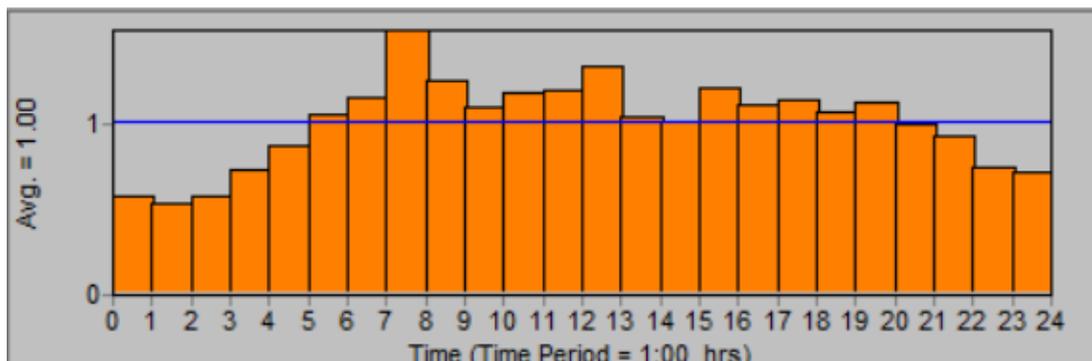
3.1.6 Duración

La duración, al igual que la frecuencia, se puede obtener de la Tabla 11. También depende del tipo de aparato hidrosanitario.

Con todos los parámetros definidos, se procede a diseñar y los resultados se pueden observar en la sección 4.

3.2 Análisis de presiones

Con la red diseñada, se procede a hacer un análisis de presiones en EPANET (Rossman, 2000). Para esto, es necesario definir un patrón de consumo y asignarlo a cada uno de los nudos de terminación. El patrón de consumo escogido para los dos tipos de edificaciones es el mismo, pues se basa en el consumo por horas de una ciudad en general (Páez, 2011), y se muestra a continuación:



Gráfica 8. Patrón de consumo adoptado para la comprobación de presiones.

La simulación se hace tanto para la red original como para la red diseñada y los resultados obtenidos se pueden apreciar en la sección 5.1.

Se hace la verificación para diversos nudos en cada una de las redes. Sin embargo, debido a la similitud de los resultados, se decide mostrar lo encontrado para sólo un nudo de cada red analizada.

3.3 Análisis de costos

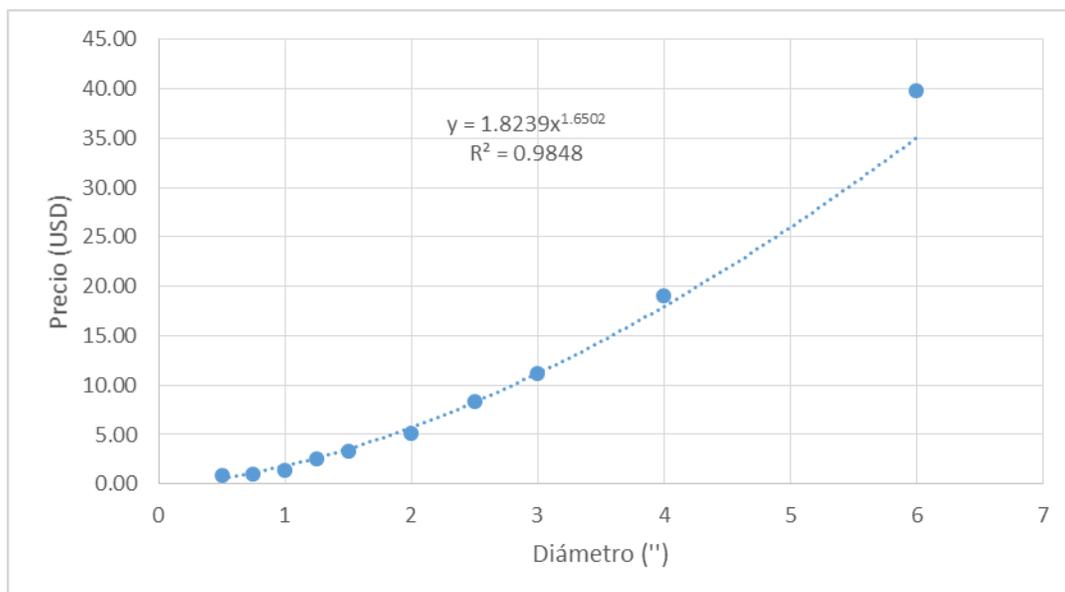
Para realizar el análisis de costos, se utilizan los manuales técnicos de PAVCO para obtener los precios de las diferentes tuberías por unidad de longitud para cada diámetro (PAVCO, s.f.).

La información utilizada para este análisis, es la siguiente tabla:

Tabla 13. Relación diámetro-precio para tuberías de distribución interna.

Longitud (m)	Diámetro (")	Precio por tubo (COP)	Precio por metro (COP)	Precio por metro (UD)
6	1/2	11773	1962	0.82
6	3/4	14584	2431	1.02
6	1	20469	3412	1.43
6	1 1/4	36869	6145	2.57
6	1 1/2	48141	8024	3.36
6	2	73822	12304	5.16
6	2 1/2	119640	19940	8.35
6	3	159736	26623	11.15
6	4	272458	45410	19.03
6	6	569381	94897	39.76

Se hace una regresión potencial y se obtiene:



Gráfica 9. Relación diámetro-precio.

Entonces, la relación de costos a utilizar es:

$$\text{Costo (USD)} = L(1.8239D^{1.6502})$$

Dónde,

L es la longitud total de una tubería de cierto diámetro (metros).

D es el diámetro de dicha tubería (pulgadas).

Para obtener las longitudes de tubería que corresponde a cada diámetro en la red, es necesario utilizar los archivos *.inp, pues estos cuentan con la información necesario. En este punto es en el que se usan los resultados obtenidos de todas las redes, en todos los pisos de las edificaciones.

El análisis explicado se encuentra en la sección 5.2.

4 RESULTADOS

4.1 Caso de estudio 1 – Red del edificio W

El edificio W hace parte de la Universidad de los Andes, por lo cual esta edificación es utilizada por una gran cantidad de usuarios y presenta características especiales que se tienen en cuenta al momento de seleccionar los parámetros de diseño de las redes.

Primero, se muestra la red original de la edificación, la cual cuentan con los diámetros que se pueden observar en la Figura 3.

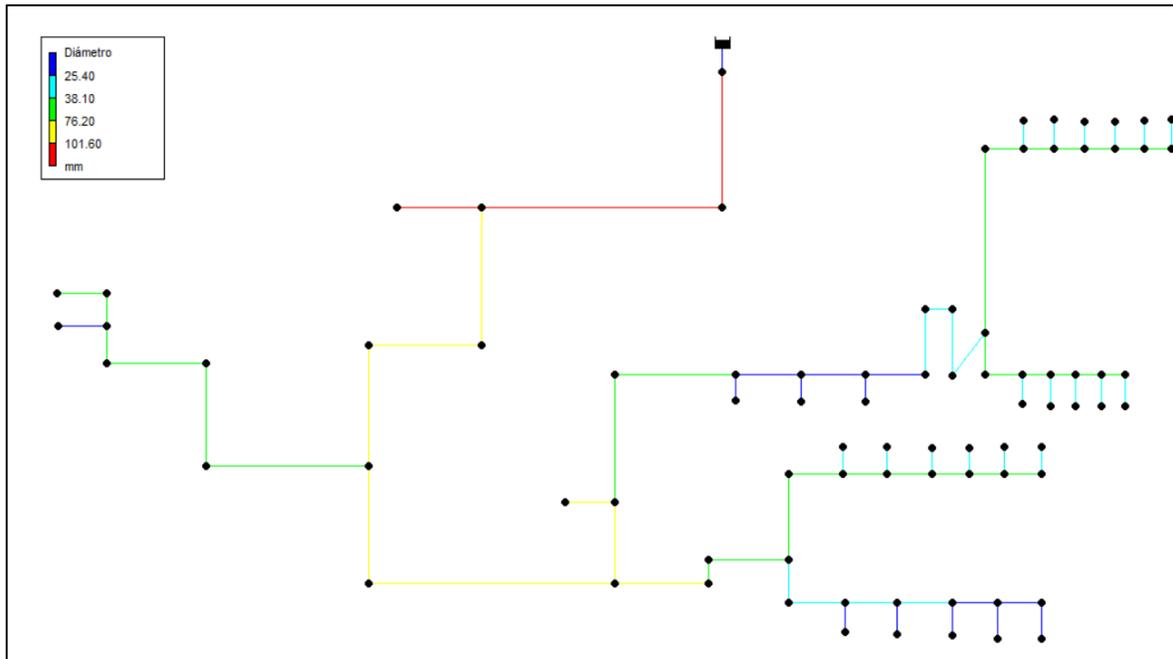


Figura 3. Diseño original - Red Edificio W – Piso 1.

Ahora, se muestra la red con el código de colores que permite identificar qué aparatos le corresponde a cada nudo de terminación (Figura 4).

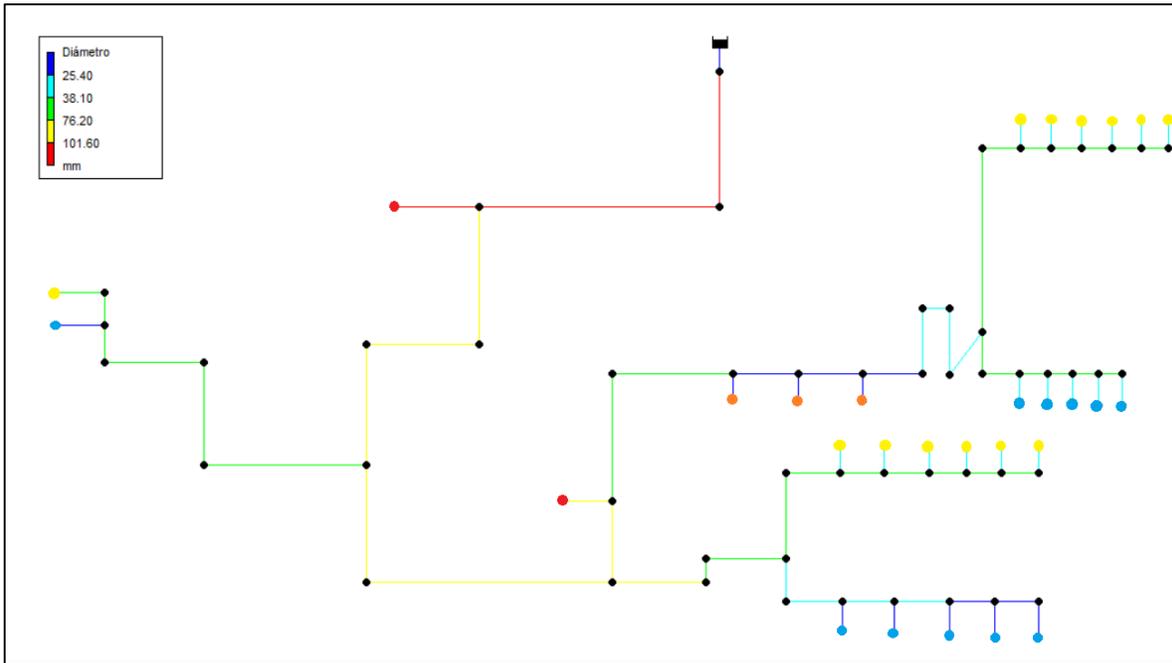


Figura 4. Especificación de aparatos - Red Edificio W – Piso 1.

Por último, en la Figura 5, se muestran los diámetros obtenidos para la red del piso 1 del edificio W.

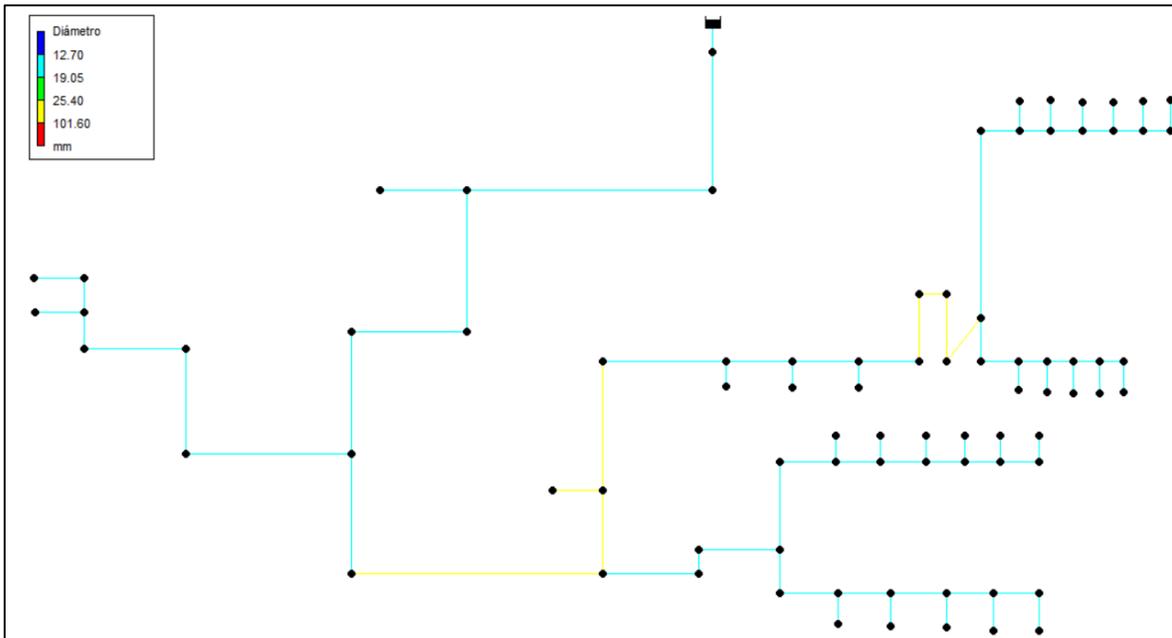


Figura 5. Diseño RIDAP - Red Edificio W- Piso 1.

4.2 Caso de estudio 2 – Red del edificio ML

El edificio Mario Laserna (ML) igualmente hace parte de la Universidad de los Andes. Para mostrar los resultados, se escoge el piso 8 de la edificación. En la Figura 6 se puede observar la red de este piso con los diámetros correspondientes de cada tubería.

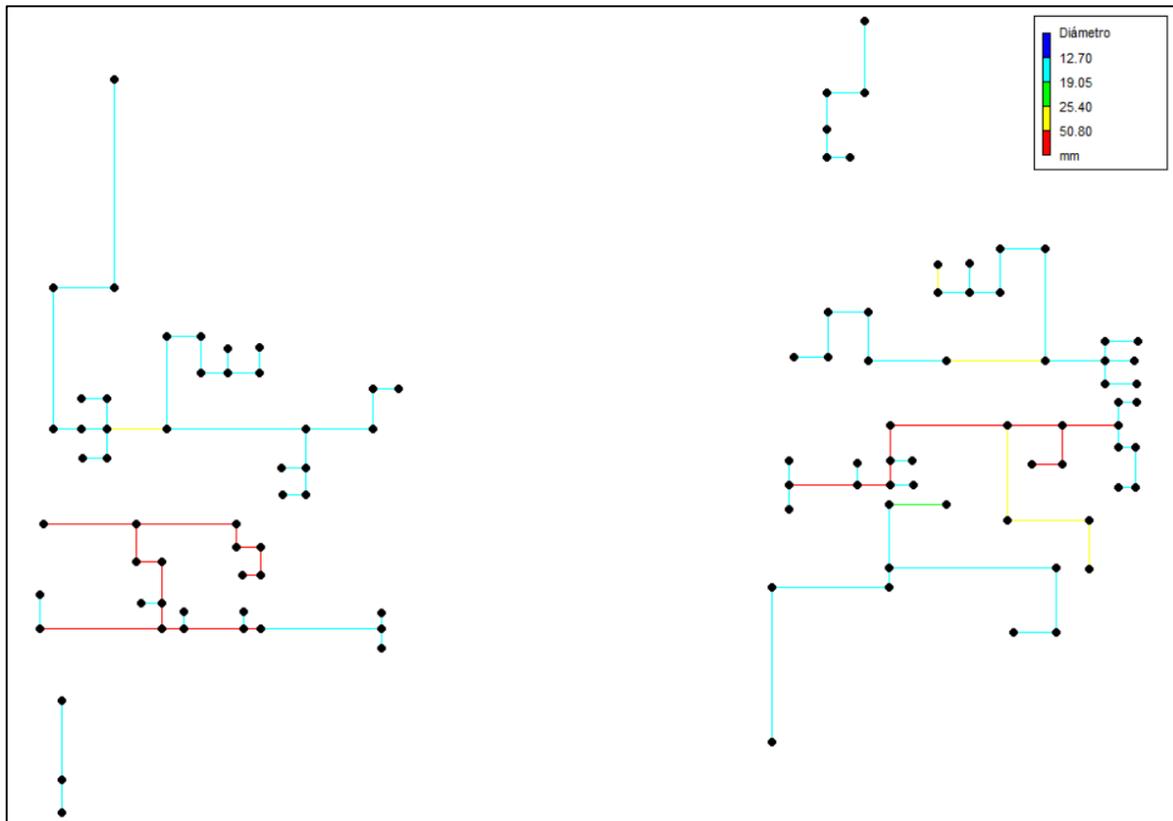


Figura 6. Diseño original - Red Edificio ML – Piso 8.

Por su parte, la Figura 7, presenta una especificación de los aparatos de cada nudo de terminación, siendo acorde con el código de colores mostrado en la sección 3.1, Tabla 12.

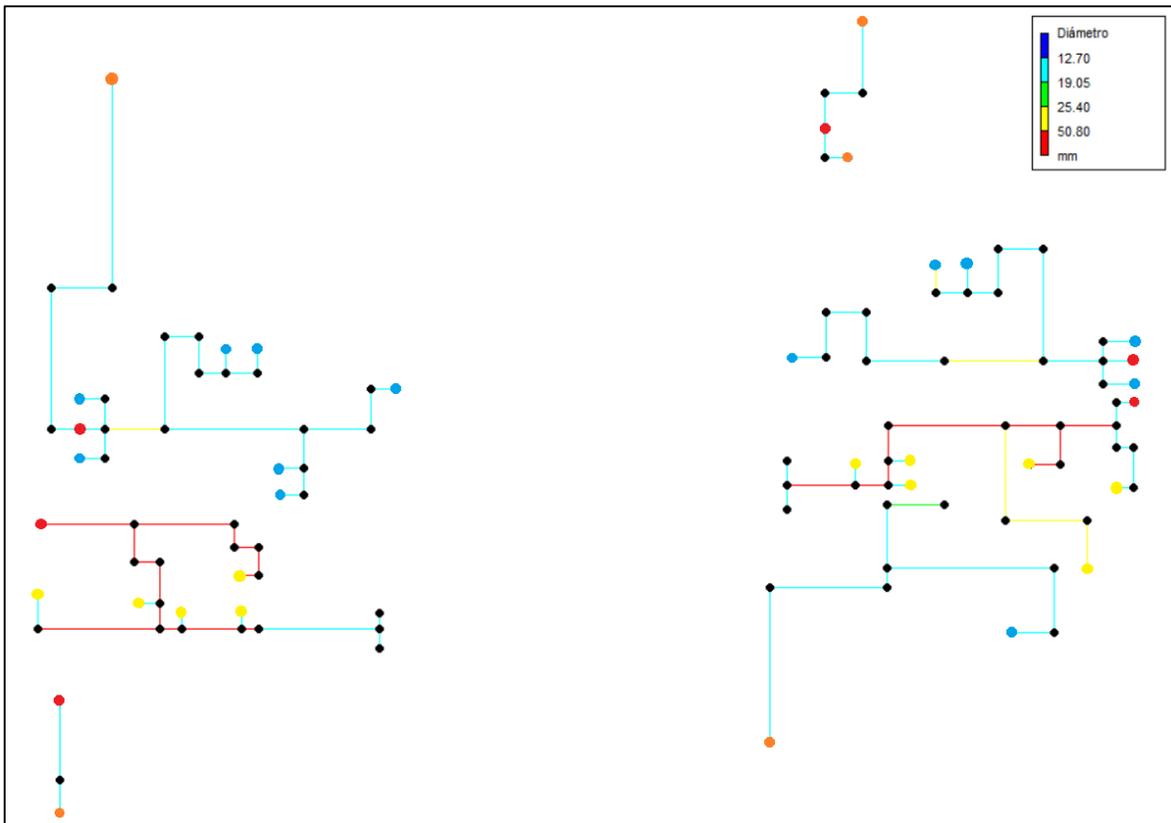


Figura 7. Especificación de aparatos - Red Edificio ML – Piso 8.

La Figura 8 permite observar el diseño que se encuentra para la red del octavo piso de la edificación analizada.

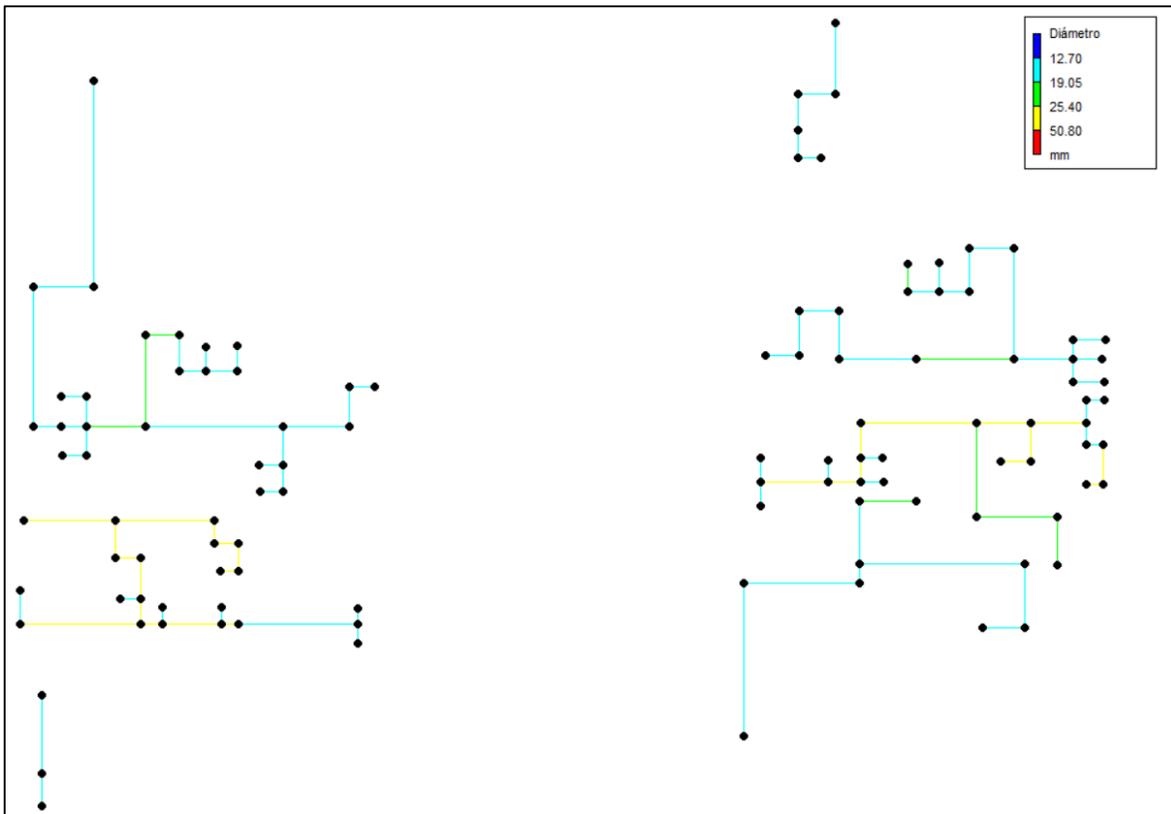


Figura 8. Diseño RIDAP - Red Edificio ML - Piso 8.

4.3 Caso de estudio 3 – Red residencial Casita Roja

Esta edificación se encuentra ubicada en la ciudad de Cartagena, Colombia. Cuenta con 3 plantas, en las cuales la primera es sólo de parqueaderos, y las dos siguientes tienen 4 apartamentos pequeños, cada una. La red original se muestra a continuación (Figura 9):

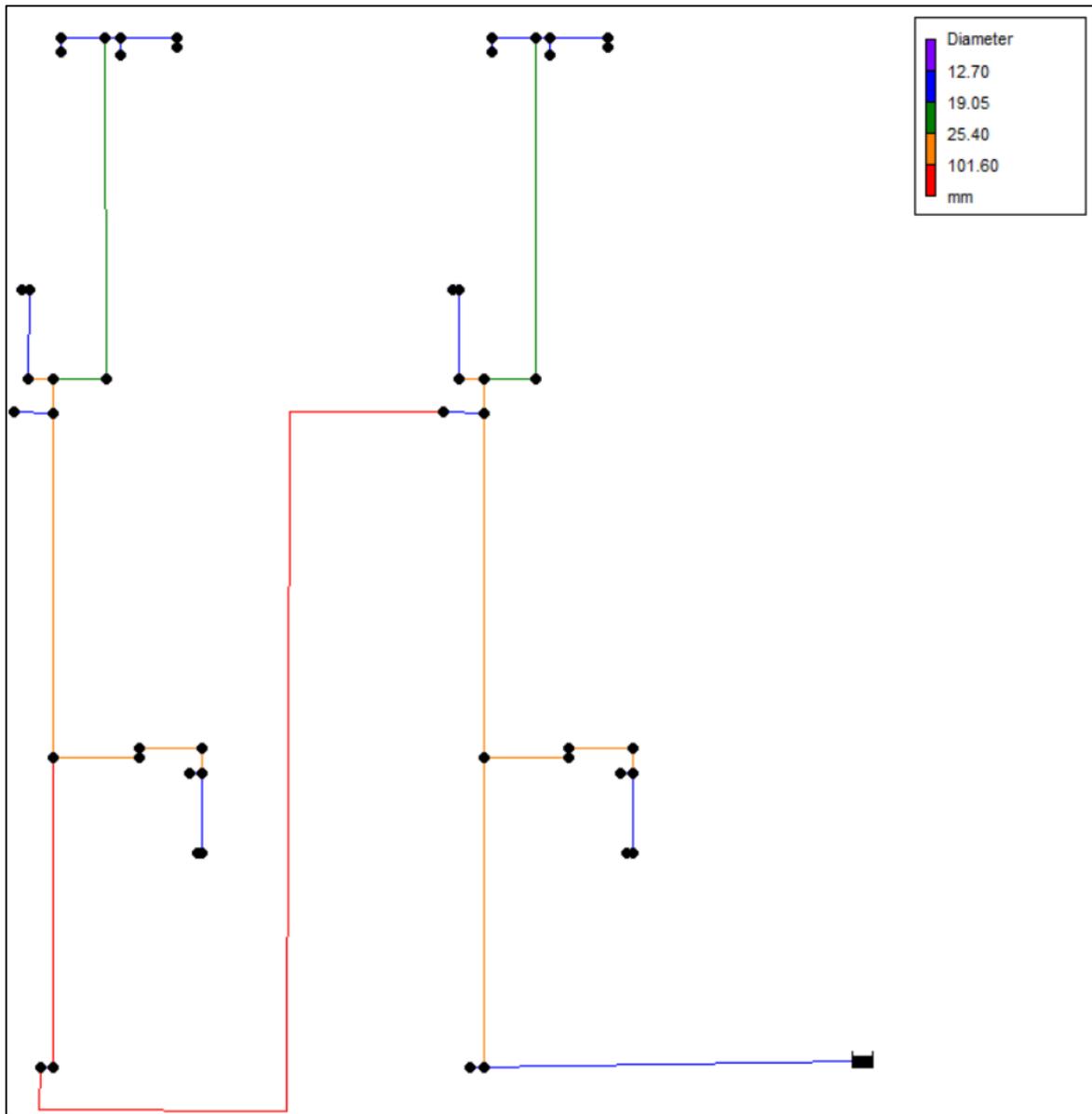


Figura 9. Diseño original - Red Casita Roja.

Con esta red montada en el programa EPANET (Rossman, 2000), se especifica ahora qué tipo de aparato se encuentra en cada uno de los nudos de terminación (Figura 10), con el fin de poder hacer una correcta selección de los parámetros de diseño:

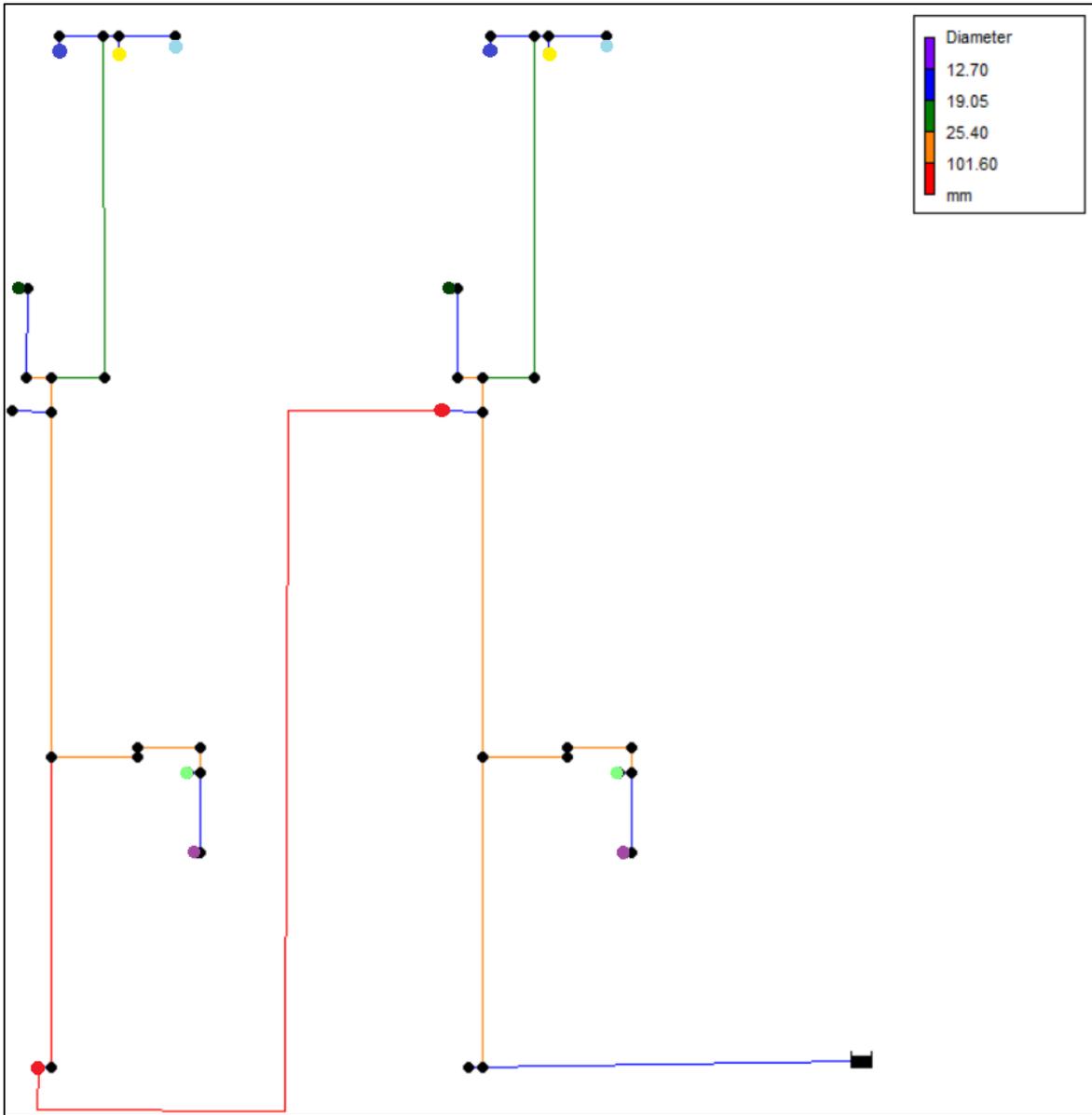


Figura 10. Especificación de aparatos - Red Casita Roja.

Con los aparatos identificados en la figura anterior, se diseña y se obtienen los resultados mostrados en la Figura 11.

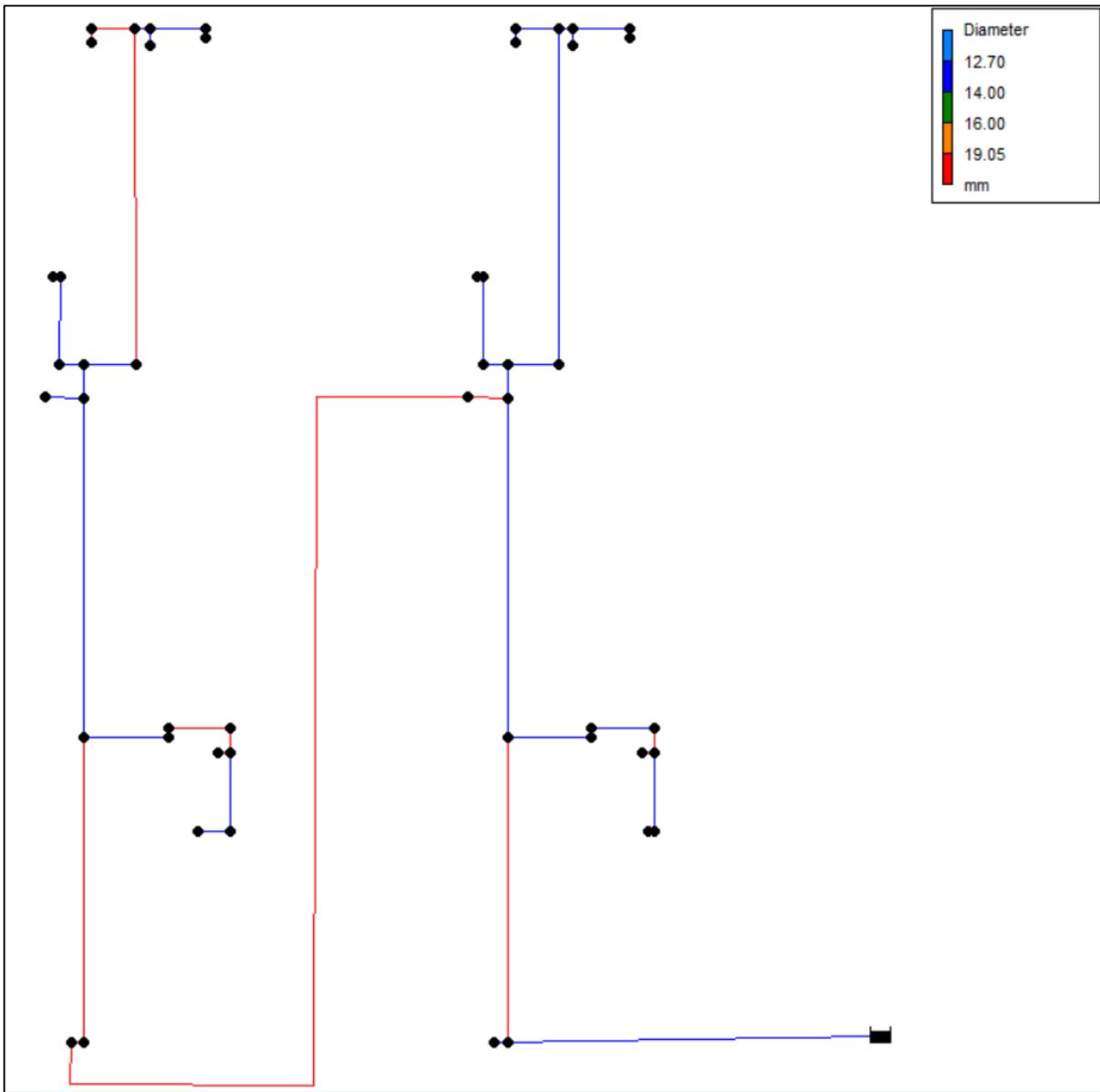


Figura 11. Diseño RIDAP - Red Casita Roja.

4.4 Caso de estudio 4 – Red residencial San Fernando

La unidad residencial San Fernando es un edificio que cuenta con 5 pisos y un apartamento por cada piso. Este se encuentra ubicado en la ciudad de Cartagena, al igual que el edificio Casita Roja. En la Figura 12 se aprecia la red original de esta edificación.

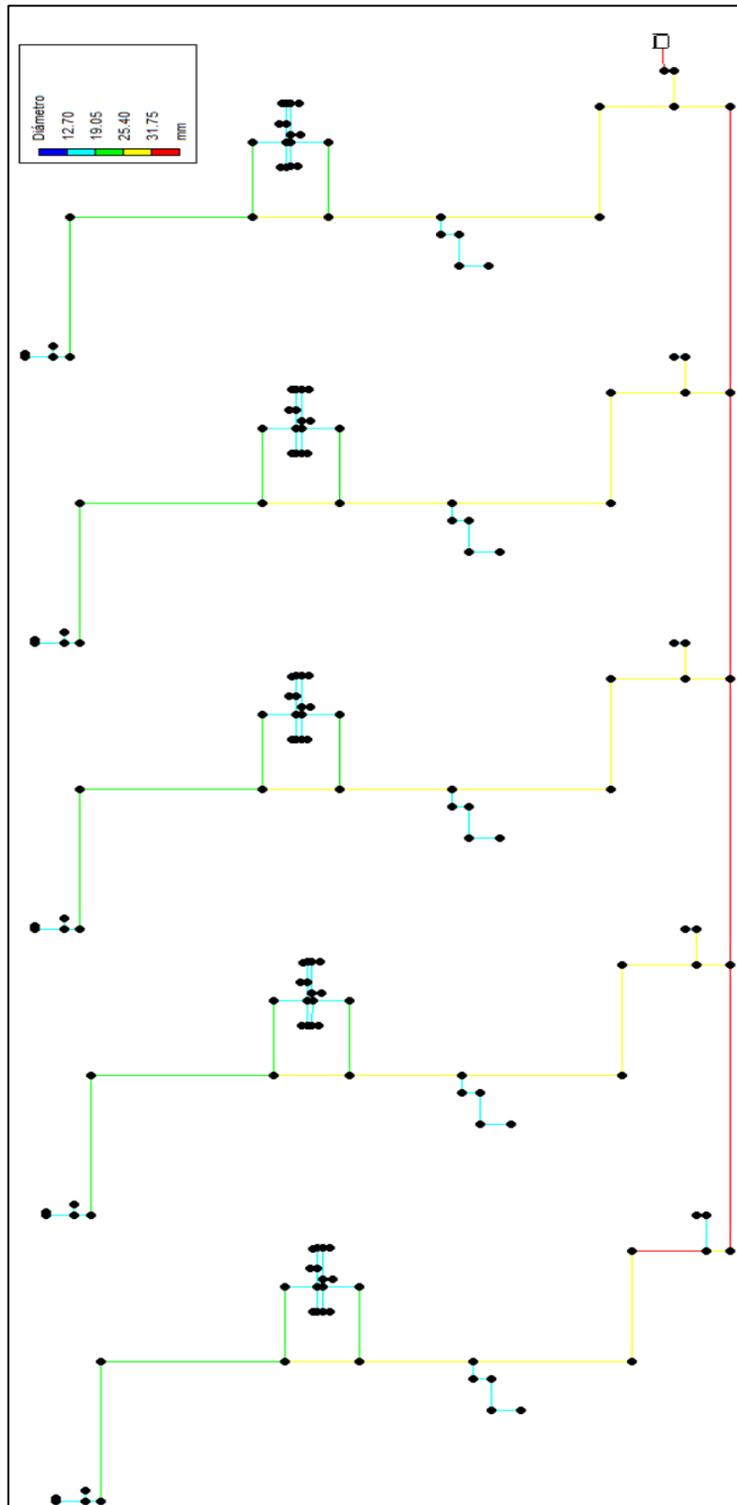


Figura 12. Diseño original - Red San Fernando.

Ahora, se presenta la especificación de aparatos de la red, utilizando el código de colores en cada uno de los nudos de terminación (Figura 13).

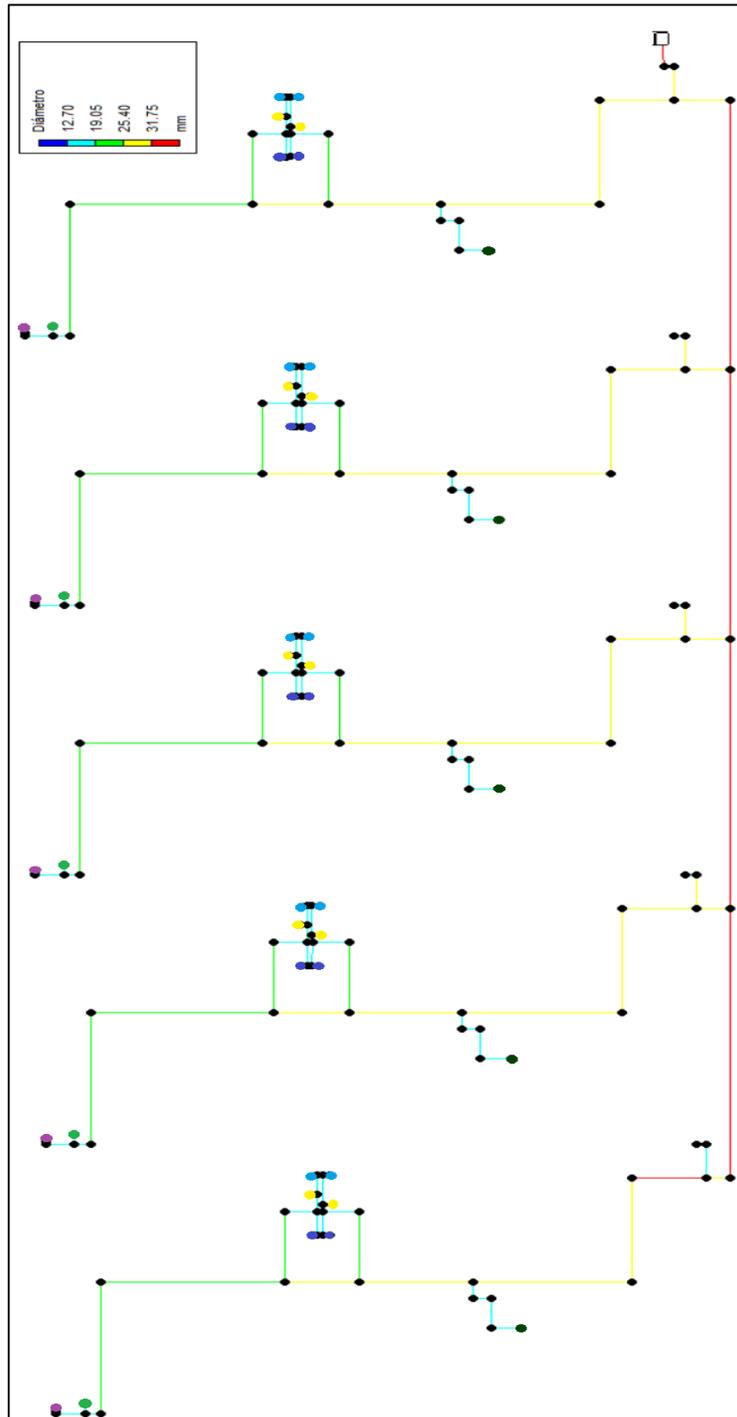


Figura 13. Especificación de aparatos - Red San Fernando.

Con los aparatos identificados, se procede a diseñar la red y se obtienen los resultados mostrados en la Figura 14.

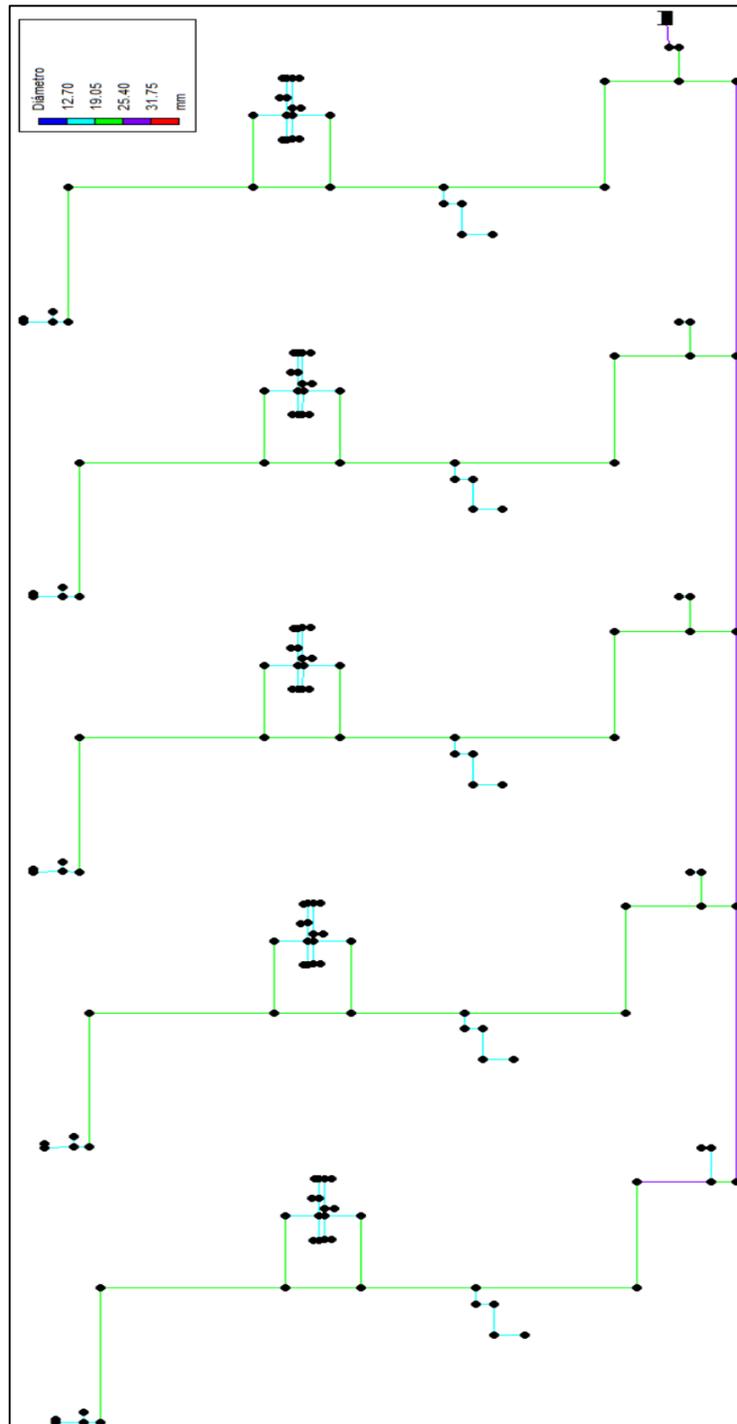


Figura 14. Diseño RIDAP - Red San Fernando.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los resultados obtenidos antes, se procede a realizar un análisis de presiones de las redes diseñadas. Esto se hace con el fin de que las presiones obtenidas cumplan con las recomendaciones sugeridas por la norma NTC 1500 (2004).

Además, se realiza un análisis de costos de la red para la diseñada con el método convencional y la diseñada con el programa RIDAP.

5.1 Análisis de presiones

5.1.1 Caso de estudio 1 – Red del edificio W

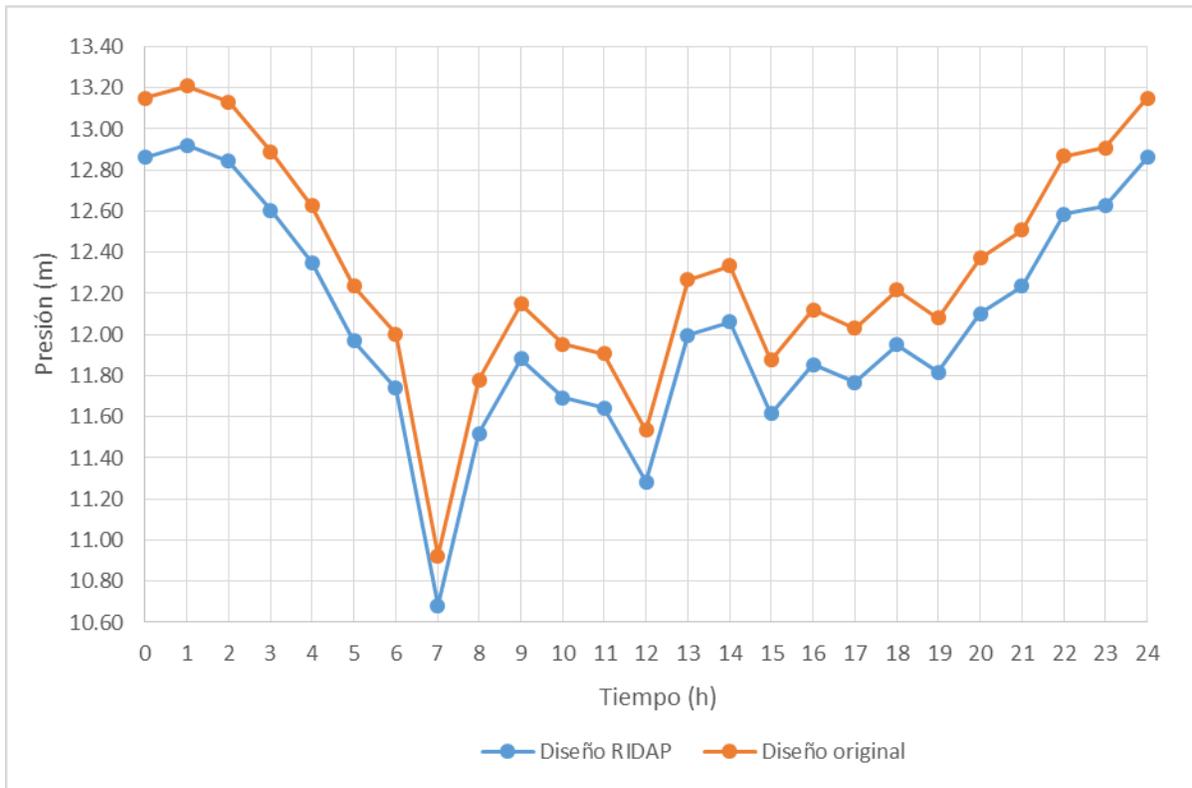
Se selecciona el nudo 67 del primer piso del edificio para mostrar los resultados que se obtienen para el análisis de este caso de estudio. El aparato correspondiente al nudo es un lavamanos.



Gráfica 10. Verificación de presiones nudo 67 - Red Edificio W – Piso 1.

5.1.2 Caso de estudio 2 – Red del edificio ML

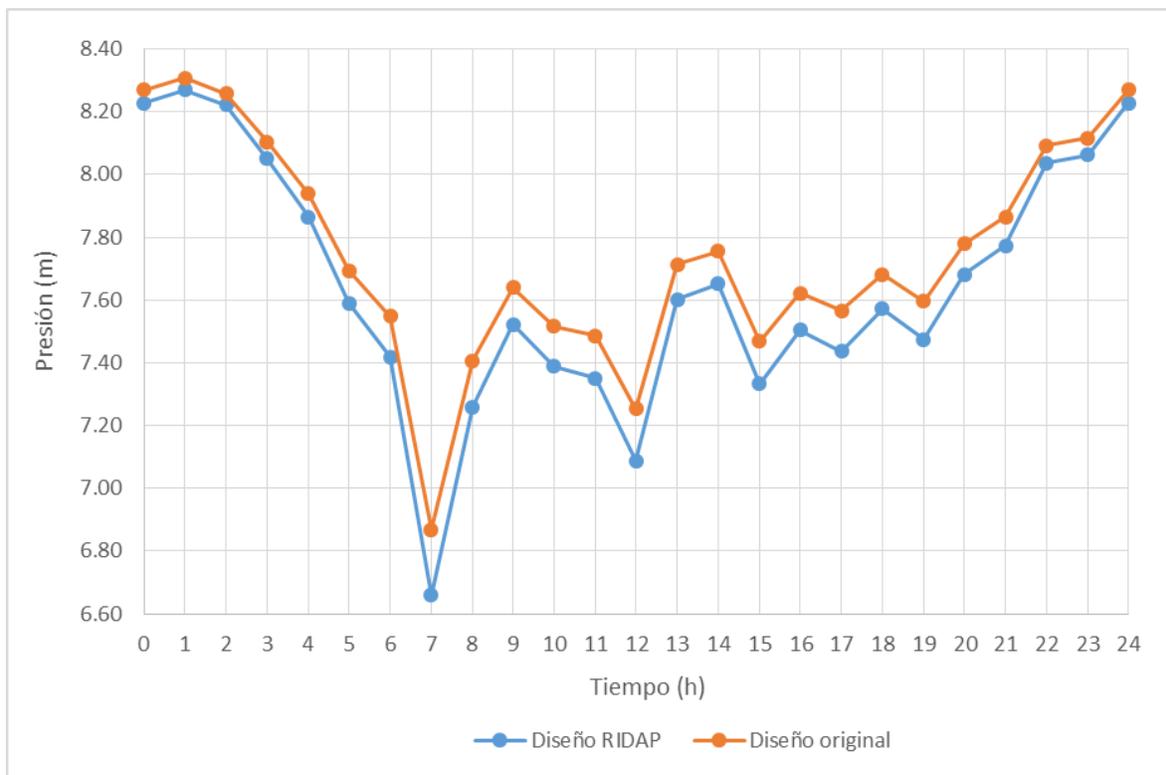
Para este análisis se selecciona el nudo 27 del piso 5 del edificio ML. El aparato correspondiente al nudo es un orinal con fluxómetro.



Gráfica 11. Verificación de presiones nudo 27 - Red Edificio ML – Piso 5.

5.1.3 Caso de estudio 3 – Red residencial Casita Roja

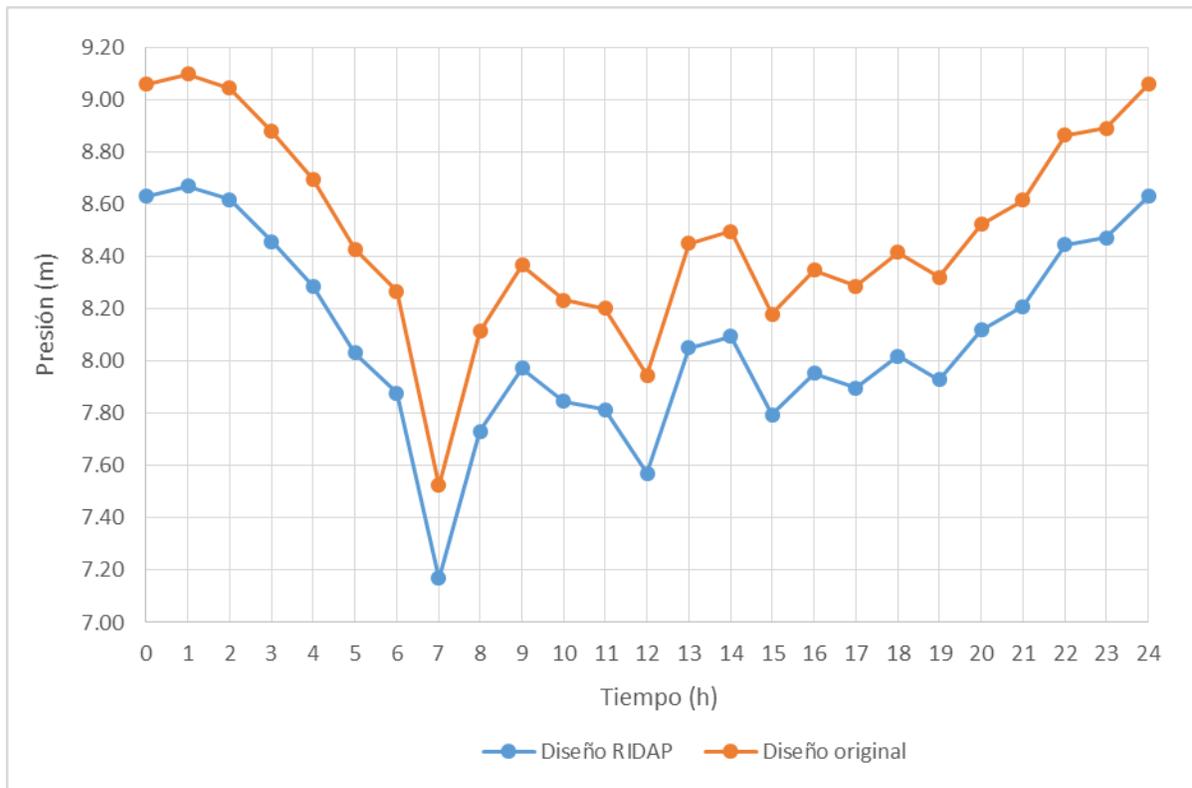
Para este análisis se selecciona el nudo 8 de la red, con el fin de mostrar los resultados obtenidos. El aparato correspondiente al nudo es un fregadero.



Gráfica 12. Verificación de presiones nudo 8 - Red Casita Roja.

5.1.4 Caso de estudio 4 – Red residencial San Fernando

En el edificio San Fernando, se selecciona el nudo 83 para mostrar los resultados obtenidos del análisis de presiones de la red. El aparato correspondiente al nudo es una regadera.



Gráfica 13. Verificación de presiones nudo 83 - Red San Fernando.

En las anteriores gráficas se observa la variación de la presión en los nudos de terminación seleccionados a lo largo del día, en cada una de las redes estudiadas. Como se puede apreciar, el patrón determina que estas variaciones tengan la misma forma.

Pasa en todas las redes, que el diseño RIDAP presente menores presiones de servicio. Esto es normal y se debe a la disminución de los diámetros de las redes originales en cada edificación. Aunque en algunas redes la variación sea mucha o poca, se puede decir que las presiones mínimas sugeridas por el Código Colombiano de Fontanería (2004) se cumplen en todos los casos, en cualquier momento del día. Esto implica que la comodidad del usuario no se verá afectada si se optimiza el diseño.

5.2 Análisis de costos

5.2.1 Caso de estudio 1 – Red del edificio W

De la red, se conoce su longitud y con esta se puede calcular el precio total de las tuberías como se explica en la sección 3.3. Los resultados del análisis de costos, se muestran resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 14. Comparación de costos – Red Edificio W.

	Diseño original	Diseño RIDAP
Longitud total 1/2" (m)	32.6	412.7
Longitud total 3/4" (m)	5.3	56.7
Longitud total 1" (m)	38.3	12.5
Longitud total 1 1/2" (m)	187.7	-
Longitud total 2" (m)	130.0	57.1
Longitud total 3" (m)	159.6	85.2
Longitud total 4" (m)	70.6	-
Costo total (USD)	4561	1606

5.2.2 Caso de estudio 2 – Red del edificio ML

Con la longitud total de cada diámetro de tubería utilizada en el edificio, se hace el análisis de costos correspondiente y se obtienen los resultados mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 15. Comparación de costos – Red Edificio ML.

	Diseño original	Diseño RIDAP
Longitud total 1/2" (m)	667.6	654.3
Longitud total 3/4" (m)	11.0	98.1
Longitud total 1" (m)	79.3	202.6
Longitud total 2" (m)	200.6	27.5
Longitud total 4" (m)	24.0	0.0
Costo total (USD)	2124	1018

5.2.3 Caso de estudio 3 – Red residencial Casita Roja

Conociendo la longitud de todas las tuberías y su diámetro, se analiza la red desde un punto de vista económico y se obtienen los resultados que se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 16. Comparación de costos – Red Casita Roja.

	Diseño original	Diseño RIDAP
Longitud total 1/2" (m)	80.6	144.4
Longitud total 3/4" (m)	36.4	68.6
Longitud total 1" (m)	69.5	-
Longitud total 4" (m)	26.4	-
Costo total (USD)	689	162

5.2.4 Caso de estudio 4 – Red residencial San Fernando

De la red, se conoce su longitud y con esta se puede calcular el precio total de las tuberías como se explica en la metodología de este proyecto de grado. Los resultados del análisis de costos, se muestran resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 17. Comparación de costos – Red San Fernando.

	Diseño original	Diseño RIDAP
Longitud total 1/2" (m)	41.8	41.8
Longitud total 3/4" (m)	49.6	105.5
Longitud total 1" (m)	55.9	28.4
Longitud total 1 1/4" (m)	28.4	-
Costo total (USD)	257	196

Como se puede observar las tablas de resumen de resultados, el hecho de optimizar las redes de cada edificación tiene una consecuencia directa en los costos de las mismas. El hecho de que en casos como el edificio W se presente una gran variación en el costo de la red, se debe a que la edificación maneja diámetros grandes que cuestan más. Por otra parte, variaciones pequeñas en los costos, se presentan porque la variación de diámetros después de diseñar con el programa RIDAP, no es muy significativa. Sin embargo, se puede afirmar que, ya sea en mayor o menor medida, se presentan reducciones de costos en las redes al optimizar el diseño.

6 CONCLUSIONES

Del desarrollo de este proyecto de grado, se puede concluir que:

- Los métodos de diseño convencionales de redes internas de distribución de agua potable, son en extremo conservadores, lo cual se debe a que están pensados para aparatos hidrosanitarios del comienzo del siglo pasado, que demandaban una mayor presión de servicio.
- A pesar de usar la aproximación mayor, que es conservadora, los diámetros diseñados utilizando el programa RIDAP, son menores en comparación a los diámetros que tienen las redes originales de los edificios analizados.
- La reducción en los diámetros de las diferentes redes causa una disminución en las presiones de servicio. Sin embargo, en todos los casos, la optimización del diseño no evita que se cumplan recomendaciones para la presión de cada aparato hidrosanitario, e igualmente, garantiza la comodidad del usuario.
- Lo más importante de la optimización de las redes de distribución interna de agua potable, utilizando la metodología RIDAP, es la reducción de los costos de dichas redes. La disminución en el costo se debe a la relación potencial entre diámetro y valor de tubería, lo cual provoca que a menores diámetros, el costo de la red sea mucho menor.

7 RECOMENDACIONES

- Se recomienda pasar el programa RIDAP a otro lenguaje de programación para mejorar la velocidad del diseño de las redes.
- Después de implementado el programa en otro lenguaje, se sugiere continuar con las pruebas en redes de grandes edificios como los edificios de la Universidad de los Andes.
- Se recomienda hacer diseños de edificaciones de otros tipos, como el comercial o el industrial.
- Para pruebas posteriores, se recomienda ser más específicos con parámetros como frecuencia y duración de cada aparato hidrosanitario, de acuerdo con el tipo de edificación.
- De igual forma, se recomienda solicitar a los fabricantes las curvas de presión-caudal para cada aparato específico.
- Al momento de verificar presiones, se sugiere utilizar un patrón que caracterice cada edificación de acuerdo a su tipo de uso, e incluso entre edificaciones del mismo uso, pues siempre se tienen patrones de consumo diferentes.

8 REFERENCIAS

- Blokker, E. (2010). *Stochastic water demand modeling for a better understanding of hydraulics in water distribution networks*. Netherlands: PhD Thesis, Delft University.
- Castro, N. Y., Garzón, J. E., & Ortiz, J. O. (2006). *Adaptación del método de Hunter para las condiciones locales*. Brasil.
- ICONTEC. (2004). *Código Colombiano de Fontanería*. Bogotá D.C.
- Páez, D. A. (2011). *ANÁLISIS DE REDES INTERNAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE UTILIZANDO SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS*. Bogotá: Universidad de los Andes, Tesis de maestría.
- PAVCO. (s.f.). *PAVCO*. Obtenido de <http://www.pavco.com.co/manuales/manuales-tecnicos/4-25/i/25#a25>
- Rossman, L. (2000). *EPANET 2 User's Manual*. Cincinnati OH: Risk Reduction Engineering Laboratory: US Environmental Protection Agency.
- Takahashi, S., Saldarriaga, J., Hernández, F., Díaz, D., & Ochoa, S. (2011). *An energy methodology for the design of water distribution systems*. Proceeding of the World Environmental and Water Resources Congress 2010, ASCE.
- Vallejo, D. (2012). *Diseño e implementación del programa DISRED para el diseño de redes internas de distribución de agua potable*. Bogotá: Proyecto de Grado, Universidad de los Andes.
- Wu, I. (1975). Design on Drip Irrigation Main Lines. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*.

9 ANEXOS

Los anexos de este proyecto de grado son las redes en formato*.inp. Las redes son tanto las originales como los diseños realizados. Además de esto, se anexan los planos de las edificaciones analizadas, en formato *.dwg. Dichos anexos se encuentran en formato digital debido a su extensión.