

TESIS DE MAESTRÍA

**DISEÑO OPTIMIZADO DE SUBMÓDULOS DE SISTEMAS DE RIEGO
LOCALIZADO DE ALTA FRECUENCIA.**

David Hernández Benítez

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2012**

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE GRÁFICAS	v
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. Introducción.	1
1.2. Objetivo General.	3
1.3. Objetivos Específicos.	3
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Características de un sistema de riego localizado de alta frecuencia.	5
2.1.1. Emisores.	7
2.1.2. Uniformidad del riego.	13
2.2. Diseño hidráulico de sistemas de RLAF.	17
2.2.1. Ecuaciones básicas de la hidráulica de redes.	17
Para flujo laminar, el factor de fricción se calcula mediante:	18
2.2.2. Diseño de sistemas de RLAF.	19
2.2.3. Resultados y análisis de trabajo de Bermúdez (2011).	32
2.3. Programas.	38
2.3.1. Programa REDES.	38
2.3.2. Optimizador Xpress.	40
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS PRIMERA FASE	41
3.1. Análisis metodología SOGH.	41
3.1.1. Análisis etapa 2, metodología SOGH.	41
3.1.2. Flecha mínima y máxima para el diseño de sistemas de riego.	42
3.2. Casos de estudio metodología SOGH.	46
3.2.1. Diseño de los submódulos de riego.	49
3.2.2. Resultados diseños.	54
3.3. Análisis de la metodología propuesta por Bermúdez.	74
3.3.1. Red Asimétrica 1, con emisores de exponente 0.3.	74

3.4.	Diseño de submódulos de riego usando programación lineal.....	79
3.4.1.	Formulación matemática del problema de diseño de redes abiertas.	79
3.4.2.	Aplicación de programación lineal al diseño de submódulos de riego.....	86
3.4.3.	Metodología para el diseño de submódulos de riego usando programación lineal en conjunto con SOGH.	94
3.4.4.	Resultados de la metodología planteada en el diseño de submódulos de sistemas de RLAF.....	100
4.	CONCLUSIONES	119
5.	RECOMENDACIONES	121
6.	REFERENCIAS	123
7.	ANEXOS	124
7.1.	Programa para el cálculo de PES y generar archivo de Xpress.....	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema común de un sistema de riego, Adaptado de (Saldarriaga, 2007).	6
Figura 2. Clasificación de emisores en sistemas de RLAF, Adaptado de (Saldarriaga, 2007).....	8
Figura 3. Tipos de curva caudal-altura, Tomado de Bermúdez (2010) y Adaptado de De Paco (1993).	9
Figura 4. Secuencia del diseño hidráulico de un sistema de RLAF. Adaptado de Pizarro (1996).	19
Figura 5. Esquema de cálculo de los caudales en un lateral de riego. Tomado de Bermúdez (2011). Adoptado de Saldarriaga (2007).	21
Figura 6. Esquema de un submódulo de riego. Tomado de Saldarriaga (2007).	22
Figura 7. Etapas de la metodología SOGH. Tomando de Saldarriaga y Ochoa (2009).	31
Figura 8. Diagrama de flujo de la metodología SOGH ajustada propuesta por Bermúdez (2011). ..	37
Figura 9. Mapa de un submódulo de RLAF en el programa REDES con altura piezométrica en los nudos de acuerdo a una escala de colores.	39
Figura 10. LGH objetivo, basada en tres puntos conocidos.	42
Figura 11. Red Asimétrica 1. Modelo de REDES.	46
Figura 12. Red Simétrica. Modelo de REDES.	47
Figura 13. Red Asimétrica 2. Modelo de REDES.	47
Figura 14. Curva Costo vs. Diámetro de tubería.	48
Figura 15. Curva exponente del emisor vs. Coeficiente, para un caudal de 120 l/h.	49
Figura 16. Rutas posibles para la Red Asimétrica 1.	55
Figura 17. Red abierta de ejemplo para establecer la formulación matemática del problema de optimización lineal.	80
Figura 18. Pérdidas de altura piezométrica que se presentarían en la red ejemplo si se utiliza el Diámetro d_1 en cada tubería, unidades de presión en metros de columna de agua.	81
Figura 19. Pérdidas de altura piezométrica que se presentarían en la red ejemplo si se utiliza el Diámetro d_2 en cada tubería, unidades de presión en metros de columna de agua.	81
Figura 20. Pérdidas de altura piezométrica que se presentarían en la red ejemplo si se utiliza el Diámetro d_3 en cada tubería, unidades de presión en metros de columna de agua.	81
Figura 21. Submódulo Asimétrico 2.	86
Figura 22. Superficie de gradiente hidráulico definida a partir de metodología SOGH, Submódulo Asimétrico 2.	88
Figura 23A. Diagrama de flujo, metodología para el diseño de submódulos de riego usando programación lineal en conjunto con SOGH. Parte A.	98
Figura 24. Caso de Estudio 1, Submódulo Asimétrico 2 Plano.	101
Figura 25. Caso de estudio 3, Submódulo Simétrico Plano.	105
Figura 26. Caso de Estudio 3, Submódulo Asimétrico 2 con Topografía Variable.	106



Figura 27. Caso de Estudio 3, Submódulo Asimétrico 3 con Topografía Variable, vista en planta.	111
Figura 28. Caso de Estudio 4, Submódulo Asimétrico 3 con Topografía Variable, vista en perfil.	111
Figura 29. Caso de Estudio 5, Submódulo con Emisores Autocompensantes, vista en planta.	115
Figura 30. Hoja “INICIO”. Programa para el cálculo de PES y la generación de matrices de Xpress.	124
Figura 31. Red ejemplo para mostrar uso de programa.	127
Figura 32. Vista general de la hoja “Matriz” para la generación del archivo con las matrices de entrada a Xpress.	128
Figura 33. Ventana para seleccionar el archivo de EPANET que se desea importar, Red Ejemplo.	129
Figura 34. Generación del rótulo de las matrices de costos y pérdidas totales, Red Ejemplo.	130
Figura 35. Ventana para ingresar el valor del coeficiente de la curva de costos, Red Ejemplo.	130
Figura 36. Ventana para ingresar el valor del exponente de la curva de costos, Red Ejemplo.	130
Figura 37. Matriz de Costos, Red Ejemplo.	131
Figura 38. Matriz de pérdidas totales, Red Ejemplo.	133
Figura 39. Ventana para ingresar la presión mínima deseada, Red Ejemplo.	134
Figura 40. Ventana para guardar el archivo *.DAT de entrada a Xpress.	135
Figura 41. Interfaz Xpress.	136
Figura 42A. Código de formulación lineal, problema de diseño de tuberías.	136
Figura 43. Resultados del diseño generado por Xpress, Red Ejemplo.	138

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 2-1. Coeficiente de uniformidad resultante vs. Presión de entrada al submódulo. Tomado de Bermúdez (2011).	32
Gráfica 2-2. Costo total de la red vs. Presión a la entrada del submódulo. Tomado de Bermúdez (2011).	33
Gráfica 3-1. LGH objetivo vs. Distancia topológica, para diferentes flechas de diseño.	43
Gráfica 3-2. Costos vs. Flecha, Red Asimétrica 1. Emisores con exponente 0.3.	54
Gráfica 3-3. Presión en los nudos correspondientes a la ruta crítica (Ruta 8), Flecha 0.	56
Gráfica 3-4. Presión en los nudos correspondientes a la Ruta 7, Flecha 0.	56
Gráfica 3-5. Presión en los nudos correspondientes a la Ruta 6, Flecha 0.	57
Gráfica 3-6. Presión en los nudos correspondientes a la Ruta 5, Flecha 0.	57
Gráfica 3-7. Presión en los nudos correspondientes a la Ruta 4, Flecha 0.	57
Gráfica 3-8. Presión en los nudos correspondientes a la Ruta 3, Flecha 0.	58
Gráfica 3-9. Presión en los nudos correspondientes a la Ruta 2, Flecha 0.	58
Gráfica 3-10. Presión en los nudos correspondientes a la Ruta 1, Flecha 0.	58
Gráfica 3-11. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Tubería múltiple, Flecha 0.	59
Gráfica 3-12. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Lateral ruta 8 (crítica), Flecha 0.	60
Gráfica 3-13. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Lateral ruta 7, Flecha 0.	60
Gráfica 3-14. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Lateral ruta 6, Flecha 0.	60
Gráfica 3-15. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Lateral ruta 5, Flecha 0.	61
Gráfica 3-16. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Lateral ruta 4, Flecha 0.	61
Gráfica 3-17. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Lateral ruta 3, Flecha 0.	61
Gráfica 3-18. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Lateral ruta 2, Flecha 0.	62
Gráfica 3-19. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Lateral ruta 1, Flecha 0.	62
Gráfica 3-20. Costos vs. Flecha, Red Asimétrica 1. Emisores con exponente 0.5.	64
Gráfica 3-21. Costos vs. Flecha, Red Asimétrica 1. Emisores con exponente 1.0.	64
Gráfica 3-22. Línea de presiones para diferentes flechas, Flecha 0, 0.14, 0.25.	65

Gráfica 3-23. Pendiente de fricción vs distancia topológica, Red Asimétrica 1, exponente del emisor 0.3.....	67
Gráfica 3-24. Flecha vs. Coeficiente de uniformidad resultante. Red Asimétrica 1, exponente del emisor 0.3.....	68
Gráfica 3-25. Flecha vs. Coeficiente de uniformidad resultante. Red Asimétrica 1, exponente del emisor 0.5.....	68
Gráfica 3-26. Flecha vs. Coeficiente de uniformidad resultante. Red Asimétrica 1, exponente del emisor 1.0.....	69
Gráfica 3-27. Costos vs. Flecha, Red Simétrica. Emisores con exponente 0.3.....	70
Gráfica 3-28. Costos vs. Flecha, Red Simétrica. Emisores con exponente 0.5.....	70
Gráfica 3-29. Costos vs. Flecha, Red Simétrica. Emisores con exponente 1.0.....	71
Gráfica 3-30. Costos vs. Flecha, Red Asimétrica 2. Emisores con exponente 0.3.....	72
Gráfica 3-31. Costos vs. Flecha, Red Asimétrica 2. Emisores con exponente 0.5.....	72
Gráfica 3-32. Costos vs. Flecha, Red Asimétrica 2. Emisores con exponente 1.0.....	73
Gráfica 3-33. Curva PES vs. Coeficiente de uniformidad resultante, Red Asimétrica 1, exponente 0.3.....	76
Gráfica 3-34. Curva Costo-Flecha, Red Asimétrica 1, exponente del emisor 0.3. Metodología de Bermúdez.....	77
Gráfica 3-35. Coeficiente de Uniformidad resultante vs. Flecha, Red Asimétrica 1, exponente del emisor 0.3. Metodología de Bermúdez.....	77
Gráfica 3-36. Curva Coeficiente de Uniformidad vs. PES, Submódulo Asimétrico 2.....	87
Gráfica 3-37. Relación Costo-Flecha obtenida mediante la metodología SOGH para el diseño del Submódulo Asimétrico 2, variando el valor de la flecha y utilizando 4 criterios de redondeo de diámetros.....	90
Gráfica 3-38. Costo del diseño del Submódulo Asimétrico 2 partiendo de diferentes flechas iniciales, usando programación lineal.....	91
Gráfica 3-39. Coeficientes de uniformidad resultantes, variando flecha de inicio, Submódulo Asimétrico 2.....	92
Gráfica 3-40. Presiones mínimas resultantes, variando flecha de inicio, Submódulo Asimétrico 2.....	92
Gráfica 3-41. Número de nudos por debajo de la presión mínima resultantes, variando flecha de inicio, Submódulo Asimétrico 2.....	93
Gráfica 3-42. Curva Costo vs. Diámetro de tubería.....	100
Gráfica 3-43. Curva CU vs PES. Caso de estudio 1, Submódulo Asimétrico 2 Plano.....	102
Gráfica 3-44. Comparación de la relación Costo-Flecha usando SOGH y utilizando 4 criterios de redondeo, con el costo del diseño obtenido mediante la metodología propuesta. Submódulo Asimétrico 2 Plano.....	104



Gráfica 3-45. Comparación de la relación Costo-Flecha usando SOGH y utilizando 4 criterios de redondeo, con el costo del diseño obtenido mediante la metodología propuesta. Submódulo Simétrico Plano.	105
Gráfica 3-46. Curva CU vs PES. Submódulo Asimétrico 2 con Topografía.	107
Gráfica 3-47. Comparación de la relación Costo-Flecha usando SOGH y utilizando 4 criterios de redondeo, con el costo del diseño obtenido mediante la metodología propuesta. Submódulo Asimétrico 2 con Topografía Variable.	110
Gráfica 3-48. Curva CU vs PES. Caso de estudio 3, Submódulo Asimétrico 3 con Topografía Variable.	112
Gráfica 3-49. Comparación de la relación Costo-Flecha usando SOGH y utilizando 4 criterios de redondeo, con el costo del diseño obtenido mediante la metodología propuesta. Submódulo Asimétrico 3 con Topografía Variable.	114
Gráfica 3-50. Comparación de la relación Costo-Flecha usando SOGH y utilizando 4 criterios de redondeo, con el costo del diseño obtenido mediante programación lineal. , Submódulo con Emisores Autocompensantes.	116
Gráfica 3-51. Comparación de la relación Costo-Flecha usando SOGH y utilizando 4 criterios de redondeo, con el costo del diseño obtenido mediante programación lineal. Caso de estudio 5 usando la curva de costos C_2	117
Gráfica 3-52. Comparación de la relación Costo-Flecha usando SOGH y utilizando 4 criterios de redondeo, con el costo del diseño obtenido mediante programación lineal. Caso de estudio 5 usando la curva de costos C_3	118
Gráfica 7-1. Curva CU vs PES, Hoja “Cálculo PES”.	126



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción.

En 1992 la Conferencia Internacional sobre el Agua y Medio Ambiente (CIAMA), en Dublín estableció como Principio Número 1 que “el agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente”. Lo que esto implica es que el agua es indispensable para la vida y por lo tanto se requiere de una gestión eficaz de los recursos hídricos (CIAMA, 1992). A partir de éste principio fundamental del agua se deriva un segundo principio, el cual establece que “el aprovechamiento y la gestión del agua debe inspirarse en un planteamiento basado en la participación de los usuarios, los planificadores y los responsables de las decisiones a todos los niveles”. De éste último principio, vale la pena resaltar la referencia a la participación de los planificadores dentro del uso eficaz y sostenible del agua. Dentro del grupo de planificadores se encuentran una serie de entidades (e.g. Departamento Nacional de Planeación, Empresas Prestadoras de Servicio de agua potable, Gobernaciones, Ministerios) que tienen como función armonizar una serie de variables de tal manera que se maximice el beneficio socioeconómico. Dentro de las variables que intervienen en la toma de decisiones están los diseños de obras civiles. Teniendo en cuenta los principios de la Conferencia de Dublín, la relevancia de los diseños de obras civiles y la necesidad de optimizar el uso del agua de riego, éste trabajo busca la manera de realizar diseños de sistemas de Riego Localizado a Alta Frecuencia (RLAF) con el fin de alcanzar un aprovechamiento máximo de los recursos hídricos y económicos, y que a su vez permitan una adecuada producción agropecuaria.

Según estudios realizados por la Organización Económica para la Cooperación y el Desarrollo (OECD) en el año 2006, el 70% del agua extraída de fuentes naturales es usada para la irrigación de zonas agrícolas. Éste valor representa una importante cantidad de agua si se tiene en cuenta que el volumen de agua dulce consumida, en total, es de 2500 km³ anuales. Adicional a esto, la cantidad de agua que es extraída y consumida ha venido creciendo. En 1990, la cantidad de agua extraída de las fuentes hídricas para uso agrícola en el mundo era apenas de 500 km³ anuales. Se estima que para el año 2025 esta misma variable crezca a 3200 km³ anuales (OECD, 2006). Como bien muestran los datos del estudio de la OECD, el consumo anual para agricultura es muy importante; por esta razón, es necesario lograr que éste proceso sea eficiente. En varias partes del mundo, como por ejemplo en India y algunos países de Latinoamérica, la irrigación de cultivos se realizaba tradicionalmente por inundación del área de cultivo. Esta manera de regar los cultivos, según el mismo estudio de la OECD, presenta apenas un 40% de eficiencia, lo cual no sólo se traduce en un desperdicio del recurso, sino que además, saliniza el suelo e implica problemas de exudación en acuíferos. Por esta razón aparece (en la segunda mitad del siglo XX) el riego por medio de tuberías a presión. Lo que se busca con éste tipo de sistemas de abastecimiento de agua para plantas, es que a través de emisores (orificios en tuberías que emiten un caudal en función de la presión) se lleve a cada planta la cantidad exacta de agua que necesita para lograr su desarrollo eficiente.



Con la introducción del abastecimiento de áreas agropecuarias, por medio de tuberías a presión, aparece el concepto de sistemas de Riego Localizado a Alta Frecuencia. Tal como su nombre lo indica, éste tipo de sistemas se basan en dos hechos fundamentales, la localización y la frecuencia. La localización obedece al hecho que sólo se humedece parte del volumen del suelo del cultivo en la zona de las raíces de la planta; por otro lado, la frecuencia hace referencia a la necesidad continua de agua por parte de la planta (Goldemberg, 1976). Este tipo de sistemas fueron desarrollados inicialmente en los países netamente agrícolas, pioneros en la realización de grandes proyectos. De estos sistemas es importante decir que deben ser diseñados para optimizar la utilización del recurso agua, teniendo en cuenta que día a día éste es un recurso más escaso (Saldarriaga, 2009).

Partiendo del crecimiento en la extracción del agua y el crecimiento en la cantidad de áreas cultivadas, resulta importante buscar una manera de realizar los diseños de RIAF lo más económicos posibles. En el caso de Colombia, según estudios del Departamento Nacional de Planeación, en 1999 existían en Colombia 3'759,174 hectáreas de cultivos; años después, en el 2008, éste número se había incrementado en 152,594 hectáreas. Estos valores implican una alta inversión en rehabilitación de redes existentes y en inversión para construcción de nuevos sistemas de riego; además, si se tiene presente que los sistemas de abastecimiento de agua presentan una vida útil de alrededor de 30 años, será necesario hacer inversiones de renovación de redes de riego existentes. En un informe presentado por Manuel Ramírez (Asesor de la Unidad de Desarrollo Agraria, 1998), se estima que en Colombia, de acuerdo con los recursos asignados en el Presupuesto General de la Nación para proyectos que se van a ejecutar y sobre los cuales existe certeza de construcción, la parte que financia el Estado por hectárea oscila alrededor de los 6,500 dólares. Para optimizar éste presupuesto y hacer un mejor uso de los recursos públicos, se debe procurar concebir sistemas de Riego Localizado a Alta Frecuencia que sean económicos.

Actualmente, el diseño de los sistemas de Riego Localizado a Alta Frecuencia se hace mediante las metodologías clásicas basadas en la comprobación de diseño. Esto último quiere decir que se prueban diferentes diámetros de tuberías para cada uno de los tubos que conforman el sistema y se escoge alguna de las múltiples soluciones que cumplen con los requisitos hidráulicos (Saldarriaga, 2007). Algunos ejemplos de estas maneras de diseño se pueden encontrar en los trabajos de Goldemberg (1976), Rodríguez (1982) y Pizarro (1987). Muchas veces la escogencia del conjunto de diámetros de las tuberías se basa en la experiencia del diseñador, y por lo tanto no existe ningún proceso exhaustivo como heurísticas de “Colonia de Hormigas” (Ostfeld & Tubaltzev, 2008) o metodologías de diseño basadas en la hidráulica (Ochoa & Saldarriaga, 2009) que permitan llegar a un diseño óptimo. Éste trabajo compara los resultados obtenidos al diseñar submódulos de riego haciendo uso de la metodología de Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico (SOGH) (Ochoa & Saldarriaga, 2009) y una metodología planteada con base en optimización lineal. Los resultados finales muestran que la metodología planteada, que hace uso de los conceptos de optimización lineal, SOGH y el programa Xpress presentan diseños más económicos que la metodología SOGH planteada originalmente por Ochoa y cumplen con todas las restricciones hidráulicas y agronómicas. Adicionalmente, al final de este documento se presentan algunas recomendaciones para seguir estudiando metodologías basadas en optimización lineal en diferentes problemas de hidráulica.

1.2. Objetivo General.

Desarrollar una metodología para realizar diseños óptimos de submódulos de sistemas de riego localizado de alta frecuencia.

1.3. Objetivos Específicos.

Los objetivos específicos planteados, que permitirán lograr el objetivo general, consisten en el análisis de metodologías actuales para el diseño de redes de distribución, su aplicación en el diseño de submódulos de riego y a partir de esto formular una metodología para la optimización del diseño de estos sistemas. Adicionalmente, los objetivos específicos consisten en el desarrollo de toda herramienta informática y análisis comparativos que permitan plantear, generar y evaluar una metodología nueva para el diseño de submódulos de riego.

- Generar la formulación matemática del problema de diseño de redes abiertas, usando conceptos de optimización lineal e implementando su formulación en el programa Xpress para realizar de forma eficiente el diseño de submódulos de riego localizado de alta frecuencia.
- Realizar comparaciones entre los resultados de la metodología propuesta y la metodología SOGH planteada por Ochoa, para evaluar el desempeño del nuevo algoritmo de diseño que se propone.
- Realizar análisis de sensibilidad del desempeño de la metodología planteada respecto a cambios en diferentes variables de entrada al problema de diseño. Adicional a esto, se realizará la evaluación de la metodología planteada en diferentes casos de estudio con características topográficas, agronómicas y topológicas diferentes.
- Desarrollar un programa informático que permita facilitar al usuario el proceso de diseño mediante la metodología propuesta, presentando su correspondiente manual de usuario y haciendo de este una herramienta fácil para el diseñador..
- Analizar la metodología para el diseño hidráulico de submódulos de sistemas de RIAF, definida como “Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico Ajustada” (SOGH Ajustada), propuesta por Bermúdez (2011), con el fin de aplicar sus conceptos en la nueva metodología propuesta.



-
- Desarrollar un programa informático para realizar de forma automática el procedimiento propuesto por Bermúdez (2011) para el cálculo de la presión de entrada al submódulo de riego, que permita realizar el diseño del submódulo por medio de la nueva metodología que se propone.
 - Presentar un análisis de los costos resultantes de los diferentes casos de estudio, y el efecto de las diferentes flechas utilizadas para establecer la superficie de gradiente hidráulico de diseño.
 - Establecer los límites de las flechas que pueden utilizarse para el diseño de sistemas de tuberías, realizando un análisis matemático de la ecuación establecida por Ochoa que permita determinar las restricciones de la metodología SOGH al diseño de tuberías.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Características de un sistema de riego localizado de alta frecuencia.

Un sistema de riego localizado de alta frecuencia (RLAF) se caracteriza, tal como su nombre lo indica, por la localización óptima del riego y la utilización de alta frecuencia. La localización hace referencia al hecho de que solo se humedece la parte del volumen del suelo donde se encuentra ubicada la raíz de las plantas, de tal manera que los cultivos obtengan el agua y los nutrientes necesarios para su correcto desarrollo, evitando el riego de áreas que no lo requieren. Por su parte, la frecuencia implica que el suelo se mantiene húmedo una mayor cantidad de tiempo en comparación a un riego convencional. Estas dos características se encuentran relacionadas porque la localización del riego obliga a que sea necesario aplicarlo con mayor frecuencia. Esta necesidad obedece a que el volumen del suelo humedecido es reducido y, por lo tanto, se tiene una baja capacidad de almacenamiento, siendo preciso aplicar con frecuencia pequeñas dosis de agua y nutrientes (Saldarriaga, 2007).

El objetivo primordial del diseño de una RLAF es lograr una alta eficiencia, entendiéndose por ésta, que el área humedecida por el sistema de riego se limite únicamente a la zona radicular. Esto se hace con el objetivo de conseguir un ahorro importante de agua y entregar a la planta únicamente la cantidad que ésta necesita para su correcto desarrollo. Adicional al objetivo de no desperdiciar agua se requiere que cada uno de los cultivos reciba como mínimo, un caudal superior al que establece el diseño agronómico.

Para poder realizar el diseño de los sistemas de RLAF es necesario tener en cuenta que estos presentan un esquema diferente al conocido para las redes de distribución de agua potable. Un esquema común se presenta en la Figura 1.

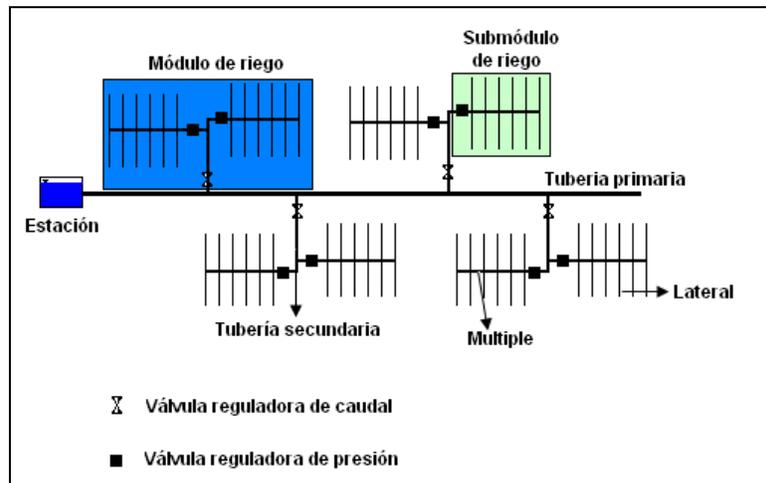


Figura 1. Esquema común de un sistema de riego, Adaptado de (Saldarriaga, 2007).

En la Figura 1 se observan los componentes de un sistema de RIAF típico. De acuerdo con Saldarriaga (2007), cada uno de los componentes se define de la forma que se presenta a continuación:

Estación de riego: conjunto de elementos que permiten el bombeo, tratamiento, filtrado y control de la presión del agua de riego. En algunos casos permite también la fertilización y la medición integral de los caudales que se envían hacia el cultivo.

Tubería primaria: Tubería que parte de la estación y llega a todos los módulos de riego del cultivo.

Tubería secundaria: Tubería que parte del tubo principal y lleva el caudal a uno solo de los módulos de riego.

Tubería múltiple: Tubería que alimenta directamente los laterales de riego.

Laterales de riego: Tuberías de último orden en donde se conectan los emisores que suministrarán agua a las plantas.

Regulador de presión: Por lo general, este elemento se encuentra ubicado al inicio de cada tubería terciaria. El objetivo del regulador de presión es controlar la presión de entrada a los submódulos de riego.

Regulador de caudal: Elemento que controla la cantidad de agua que entra en una tubería secundaria y por lo tanto a un módulo de riego.



Además de la diferencia esquemática que existe entre un sistema de riego localizado de alta frecuencia y una red de distribución de agua potable, se presenta una diferencia importante en la hidráulica de los nudos de consumo. Ésta última es tal vez una de las características hidráulicas más importante de un sistema RLAF, y es que los nudos de consumo funcionan con emisores. A diferencia de una red de distribución de agua potable donde la demanda es constante e independiente de la presión, en un sistema de riego el caudal que recibe cada uno de los emisores se verá afectado por la presión en el punto de llegada al emisor.

Como se mencionó en el párrafo anterior, los emisores representan los nudos de consumo de agua en un sistema de riego localizado de alta frecuencia. Por esta razón es necesario entender adecuadamente su comportamiento para comprender la hidráulica de los submódulos de riego. En la siguiente sección se presenta una descripción detallada de las características de los emisores.

2.1.1. Emisores.

De acuerdo con Pizarro (1996), los emisores son la parte más delicada de un RLAF, debido a que son los encargados de suministrar el caudal y los nutrientes necesarios para el adecuado desarrollo de cada planta. El problema principal en el diseño con emisores, es la contradicción presente en los criterios que deben tener en cuenta los fabricantes. Los tres criterios que se deben tener en cuenta son bajo caudal, alta presión y diámetros de entrega máximos. El primer criterio hace referencia a que los emisores deben proporcionar un bajo caudal, con el objetivo de que los diámetros de las tuberías (laterales y múltiples) sean bajos. Por su parte, una alta presión en los emisores, es deseable para minimizar el efecto de los desniveles del terreno y las pérdidas de energía sobre la uniformidad del riego. Finalmente, el tercer criterio es que el diámetro de entrega de los emisores sea lo más grande posible, con el fin de evitar posibles obstrucciones del emisor, que son el principal problema en el manejo de los sistemas RLAF.

De acuerdo con el caudal que se requiera por planta y la presión normal de trabajo, los emisores se pueden caracterizar en tres grandes grupos. Estos grupos son, emisores de alto caudal, emisores de bajo caudal y cintas de exudación. Las características de cada uno de estos grupos se presentan en la siguiente figura.

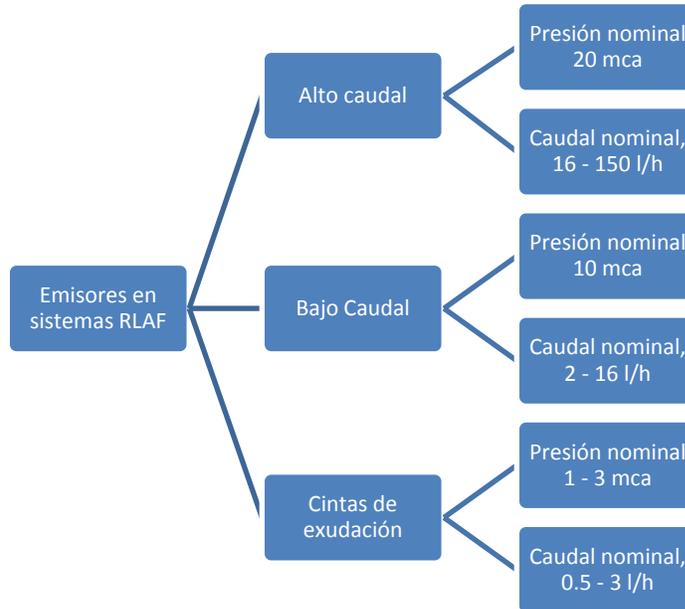


Figura 2. Clasificación de emisores en sistemas de RLAF, Adaptado de (Saldarriaga, 2007).

Esta caracterización es una muestra inicial de los tipos de emisores que existen. Para poder clasificarlos con un mayor detalle, es necesario entender las ecuaciones y conceptos hidráulicos que permiten modelar y determinar sus características cuando están presentes en un sistema de riego.

2.1.1.1. Hidráulica de Emisores.

Para describir el funcionamiento de un emisor presente en un sistema de riego, es necesario empezar diciendo que el caudal resultante es función de la presión observada en el punto de ubicación del emisor. La relación que describe el comportamiento de un emisor es la que se presenta a continuación:

$$Q = kh^x \tag{Ecuación 2.1}$$

donde Q hace referencia al caudal del emisor y h a la presión en el mismo. Por su parte, k y x corresponden al coeficiente y el exponente de descarga del emisor respectivamente. Es importante decir que la ecuación no es dimensionalmente homogénea, por lo que k y x dependen del sistema de unidades utilizado. De estos dos parámetros resulta muy importante el exponente x, que mide la sensibilidad del emisor con respecto a la altura de presión.

Tanto k como x pueden variar de acuerdo con el tipo de emisor. Pero resulta muy importante hacer énfasis en el exponente del emisor, dado que este determinará la forma de la curva que

relaciona el caudal del emisor con la altura de presión y permite establecer si se presenta un flujo laminar o turbulento. Este comportamiento se puede apreciar gráficamente en la Figura 3, que presenta un esquema de varios tipos de curvas correspondientes a la ecuación que relaciona caudal-altura. En la figura se observa el caso en que el exponente del emisor (x), es igual a 1 y se presenta un flujo laminar; también se presenta el caso en que $x=0.5$ y existe plena turbulencia, representado en la zona 1 de regímenes hidráulicos. Finalmente se presenta el caso teórico en que el exponente del emisor es cero (zona 2) y el emisor se comporta como un emisor autocompensante o con limitaciones de caudal.

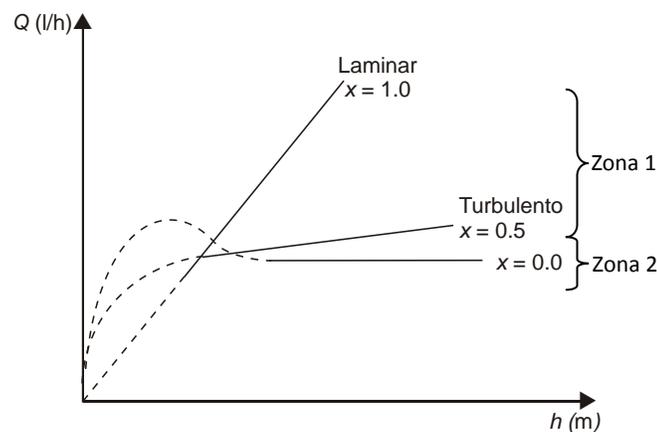


Figura 3. Tipos de curva caudal-altura, Tomado de Bermúdez (2010) y Adaptado de De Paco (1993).

Es importante tener en cuenta que la ecuación del emisor final es válida, solo a partir de cierto rango de presiones, que este rango no es suministrado por los fabricantes de emisores y que debe ser determinado de forma empírica por el diseñador del sistema de riego.

Ahora bien, una vez se han identificado las posibles curvas caudal-altura que pueden existir en los emisores finales de un sistema de riego, se debe entender por qué no es recomendado que exista un flujo laminar en los emisores finales y se requiere asegurar la turbulencia en los ductos de estos accesorios. De acuerdo con Pizarro (1996), el régimen laminar en los emisores, es inconveniente porque:

- En régimen laminar las pérdidas de energía a lo largo de una conducción dependen de la viscosidad y por lo tanto de la temperatura. De esta manera, para una misma presión, los emisores en donde el agua se encuentre a una mayor temperatura tendrán un mayor caudal. Este problema resulta importante si se tiene en cuenta que los materiales de estos sistemas están conformados de aditivos que según mediciones, hacen que la temperatura a lo largo de un lateral llegue a variar hasta 20°C (Saldarriaga, 2007). Este fenómeno puede a veces compensar las pérdidas de energía a lo largo del lateral, pero su comprensión a la

hora de diseñar un sistema de riego resulta difícil y además se recomienda considerarlo como un factor de pérdida de uniformidad del riego.

- La relación entre el caudal que sale del emisor y la presión en el punto, es una relación lineal para flujo laminar. Esta relación implica una mayor dependencia por parte del caudal y puede llevar a una menor uniformidad en el riego.
- Finalmente, en flujo laminar, el riesgo de sedimentación puede ser alto. Esto se debe a que en este tipo de flujos se requiere que el área de salida de los emisores sea mayor y a su vez conlleve a una menor velocidad en los conductos.

Una vez definidas las causas por las cuales no es recomendable un flujo laminar en los emisores finales, vale anotar que en principio el valor del exponente de los emisores estaría comprendido entre 0.5 y 1; sin embargo, debido a la existencia actualmente de emisores autocompensantes, el valor de x puede ser incluso inferior a 0.5. Lo que interesa en el diseño es que los emisores tengan un exponente de descarga bajo, esto con el objetivo de que una variación en la presión no conlleve a cambios importantes en el caudal de los emisores y mantener la uniformidad del riego. De esta manera, y teniendo en cuenta la ecuación de los emisores se puede definir la siguiente ecuación que, a partir de la tolerancia de caudales y el exponente del emisor, permitirá fijar una tolerancia de presiones:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^{1/x} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Más adelante se explicará, en más detalle, los conceptos de tolerancia de caudales y tolerancia de presiones a partir de la definición de uniformidad de riego.

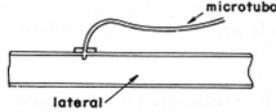
2.1.1.2. Clasificación y tipos de emisores.

De acuerdo con la investigación desarrollada por Bermúdez (2011), existen una gran variedad de emisores en el mercado. Este tipo de accesorios pueden clasificarse de diferentes maneras, atendiendo a sus características hidráulicas, forma de inserción en laterales, riesgo de obturaciones, etc. A continuación se describen algunos emisores considerados en el trabajo de Bermúdez (2011), con base en los trabajos de Pizarro (1996) y López (1992).

- Goteros: Hacen parte del grupo de emisores de bajo caudal. Los goteros pueden clasificarse según la configuración de los conductos de paso del agua. Estos pueden ser de largo conducto, de orificio, vortex y autocompensantes.

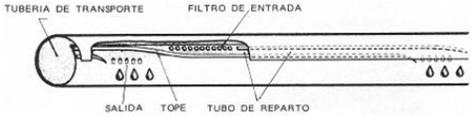
- De largo conducto: El flujo dentro del emisor es laminar y en ellos la pérdida de energía tiene lugar en un largo conducto de pequeño diámetro. A este grupo pertenecen los emisores helicoidales, microtubos y de laberinto. En la Tabla 1 se observan las características de cada uno de estos tipos de goteros de largo conducto:

Tabla 1. Características de goteros de largo conducto, Tomado de Bermúdez (2011).

Emisor	Características	Esquema
Microtubos	Diámetro interior: 2mm – 0.6mm. Coeficiente de variación: 0.02 – 0.05. Exponente del emisor: 0.55 – 0.80. Constante del emisor: 4 – 8.	
Helicoidales [Prácticamente en desuso por problemas de obturaciones]	Caudales nominales: 2 – 4 L/h. Coeficiente de variación: 0.02 – 0.13. Exponente del emisor: 0.65 – 0.85. Constante del emisor: 0.4 – 0.8.	
De laberinto	Caudales nominales: 2 – 8 L/h. Coeficiente de variación: <0.05. Exponente del emisor: 0.5 – 0.6.	

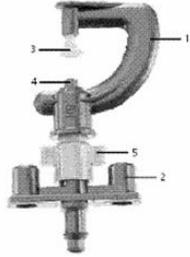
- De orificio: Son emisores que se caracterizan por tener un diámetro inferior a 0.4 mm, un coeficiente de variación entre 0.07 y 0.11 y el exponente del emisor es de 0.5.
- Vortex: Este tipo de emisores tipo gotero de largo conducto cuenta con una cámara de vórtice donde se genera una fuerza centrífuga que se opone a la dirección del flujo y genera pérdidas adicionales de energía. Este tipo de emisor surgió como un intento de solucionar el problema del diámetro pequeño de los goteros de orificio (Saldarriaga, 2007).
- Autocompensante: Como se ha mencionado anteriormente, un emisor autocompensante tiene el objetivo de lograr que el caudal sea independiente de la presión. La autorregulación del caudal se consigue mediante una pieza móvil y flexible de caucho o algún elastómero sintético que se deforma bajo el efecto de la presión, disminuyendo la sección de paso del agua y limitando así el caudal de salida.
- Mangueras: Al igual que los goteros, este tipo de accesorios hacen parte de los emisores de bajo caudal. El exponente de descarga x para este tipo de emisores varía entre 0.4 y 0.8, lo cual corresponde a un flujo en régimen turbulento. Sus principales características se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 2. Características de emisores tipo manguera, Tomada de Bermúdez (2011).

Emisor	Características	Esquema
Mangueras	Presiones de operación: < 10 mca. Coeficiente de variación: 0.10 – 0.20. Exponente del emisor: 0.4 – 0.8.	

- Cintas de exudación: Hacen parte del grupo de emisores de bajo caudal, y se caracterizan por su fabricación a partir de un geotextil compuesto de microfibras de polietileno entrecruzadas que forman una malla en la cual los poros tienen un tamaño medio de 4 a 5 micras y ocupan el 50% de la superficie (Saldarriaga, 2007). Este tipo de emisores no cumplen con la Ecuación 2.1.
- Microaspersores y difusores: A diferencia de los emisores presentados anteriormente, este tipo de emisores forman parte del grupo de emisores de alto caudal. Al hacer parte de los emisores de alto caudal, este tipo de accesorios conlleva a tener un diámetro de los laterales y los múltiples mayor al de los emisores de bajo caudal. La ventaja de los microaspersores y los difusores es que, a pesar de tener diámetros pequeños, son poco sensibles a las obturaciones debido a la velocidad del agua. Este tipo de emisores se pueden clasificar en cuatro grupos, de acuerdo con el exponente de descarga del emisor (ver Tabla 3).

Tabla 3. Características de microaspersores y difusores, tomado de Bermúdez (2011).

Tipo de Emisor	Exponente del Emisor	Esquema
De largo conducto	0.45 – 0.5.	 <p><i>Micro aspersor</i></p>
De orificio	0.45 – 0.85.	
Vortex	0.35 – 0.45.	
Autocompensantes	0.0 – 0.25.	

- Microtubos de alto caudal: como su nombre lo dice, son microtubos que operan como emisores de alto caudal. No obstante, son poco empleados como emisores de alto caudal porque presentan los inconvenientes característicos de los emisores de alto caudal

(grandes diámetros en las tuberías laterales y múltiples) sin tener la ventaja de mojar grandes superficies.

2.1.2. Uniformidad del riego.

En la sección anterior se presentaron algunas características de los emisores, tales como sus características hidráulicas (regímenes de flujo y ecuación de los accesorios) y su clasificación. En esta sección se va a entender una de las características más importantes de un sistema de riego, la uniformidad del riego. Esta característica esencial de un sistema de riego localizado de alta frecuencia, va a estar dada por el diseño agronómico e influenciará directamente los resultados sobre el diseño de las tuberías que componen este tipo de sistemas. De esta manera, el diseñador debe buscar que el sistema de tuberías sea tal que el diseño sea económico y que todas las plantas reciban la misma cantidad de agua y nutrientes necesarios para alcanzar su correcto desarrollo y producción.

Como se mencionó anteriormente, este tipo de sistemas utilizan emisores como nudos de consumo. El uso de emisores implica que el caudal que recibe cada una de las plantas va a depender de la presión en el punto de llegada y por esta razón debe entenderse correctamente la hidráulica. Antes de hacer mención a la hidráulica de este tipo de sistemas es necesario definir el coeficiente de uniformidad como la variable que dará inicio y afectará todo el proceso de diseño.

Como se dijo anteriormente, la uniformidad del riego es una de las variables más importantes del diseño de los sistemas RLAF. La uniformidad del riego se caracteriza mediante el coeficiente de uniformidad (CU) que se define según la Ecuación 2.3:

$$CU = \left[1 - \frac{1.27 \cdot CV}{\sqrt{n_e}} \right] \frac{Q_{mp}}{Q_m} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

donde:

- CU: Coeficiente de uniformidad del riego; éste es un dato de entrada y es suministrado por el diseño agronómico
- n_e : Número de emisores por planta.
- Q_{mp} : Caudal del emisor sometido a la mínima presión. Este caudal será calculado a partir de la Ecuación 2.3 y será uno de los datos de entrada para el proceso de diseño.

- Q_m : Caudal medio por planta. Este dato es dado por el diseño agronómico y corresponde al caudal que se espera que cada planta reciba.
- CV: Coeficiente de variación por fabricación de los emisores finales. Éste se determina sobre una muestra mínima de 25 emisores y se calcula haciendo uso de las siguientes ecuaciones:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{q}} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

donde σ corresponde a la desviación estándar y se calcula como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (q_i - \bar{q})^2}{n-1}} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

y \bar{q} corresponde al caudal promedio de la muestra de n emisores.

$$\bar{q} = \frac{\sum_1^n q_i}{n} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Como se puede observar el coeficiente de uniformidad (CU) depende tanto de factores constructivos como de factores hidráulicos. Los factores constructivos se incluyen en el coeficiente de variación (CV) y tienen en cuenta las diferencias que causan los procesos de fabricación y los materiales utilizados en los caudales finales. Por su parte, los factores hidráulicos tienen en cuenta las pérdidas de energía (altura) ocurridas a lo largo de todas las tuberías que conforman el sistema de riego y la topografía del terreno. Además de los factores hidráulicos y constructivos, que afectan la uniformidad del riego, existen otros factores como el envejecimiento del sistema, las obturaciones que ocurran en los emisores y las diferencias de temperatura que se presentan en los diferentes laterales del sistema. Estos últimos factores no se tienen en cuenta en el proceso de diseño debido a la alta incertidumbre que existe con relación a estos.

El coeficiente de uniformidad, también puede calcularse aplicando la siguiente ecuación:

$$CU = \frac{Q_{25}}{Q_m} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

donde Q_{25} representa el caudal medio de los emisores que constituyen el 25 % de caudal más bajo, y Q_m representa el caudal medio de todos los emisores de la instalación.

Esta última ecuación (Ecuación 2.7), aunque es útil para definir el coeficiente de uniformidad por parte del diseño agronómico, no resulta útil a la hora de comenzar el proceso de diseño hidráulico del sistema de RLA. Para realizar el diseño se hace uso de la Ecuación 2.3 la cual permitirá, como se muestra a continuación, establecer la tolerancia de caudales y la tolerancia de presiones.

2.1.2.1. Cálculo de la tolerancia de caudales.

Con el objetivo de cumplir con el coeficiente de uniformidad impuesto por el diseño agronómico, es necesario que los caudales que emite cada uno de los emisores, no resulten muy diferentes entre ellos. Para esto es necesario asegurarse que el rango de caudales se encuentre entre un máximo y un mínimo. Para determinar el caudal de mínima presión que puede presentarse en un submódulo de riego se parte de la Ecuación 2.3.

$$CU = \left[1 - \frac{1.27 \cdot CV}{\sqrt{n_e}} \right] \frac{Q_{mp}}{Q_m} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

En esta ecuación, se conocen todas las variables a excepción del caudal de mínima presión (Q_{mp}). El Coeficiente de Uniformidad es un dato de entrada, dado por el diseño agronómico. También se conocen el número de emisores (n_e) que llegará a cada planta, el coeficiente de variación (CV) y el caudal medio. De esta manera, despejando la única incógnita se puede establecer la siguiente ecuación que permite determinar el caudal de mínima presión.

$$Q_{mp} = \frac{CU}{\left[1 - \frac{1.27 \cdot CV}{\sqrt{n_e}} \right]} \cdot Q_m \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Una vez obtenido el caudal de mínima presión que se puede presentar en un submódulo de riego, se establece la tolerancia de caudales como la relación entre el caudal de mínima presión y el caudal medio.

2.1.2.2. Cálculo de la tolerancia de presiones.

Para poder cumplir con la tolerancia de caudales, es necesario establecer la presión correspondiente para que se cumpla con el requerimiento de uniformidad. De esta manera, es lógico establecer una presión mínima que puede presentarse en un submódulo de riego y la presión máxima. Para poder determinar la presión mínima, se hace uso de la ecuación del emisor tal como se muestra a continuación:

$$h_{mp} = \left(\frac{Q_{mp}}{k} \right)^{1/x} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Como se observa en la Ecuación 2.9, para determinar la altura de mínima presión, solo es necesario conocer el caudal de mínima presión que fue determinado a partir de CU, CV, Q_m y n_e ;

además de conocer el coeficiente (k) y el exponente (x) del emisor. Esta misma ecuación puede utilizarse para determinar la presión correspondiente al caudal medio.

Una vez conocidas la presión media y la presión mínima, se puede determinar la tolerancia de presiones tal como se observa en la Ecuación 2.10.

$$\Delta H = M(h_m - h_{mp}) \quad \text{Ecuación 2.10}$$

En esta última ecuación ΔH hace referencia a la tolerancia de presiones, h_m a la presión media, h_{mp} a la presión mínima y M es un factor empírico que depende del número de diámetros que se vayan a emplear en una misma tubería, ya sea un múltiple o un lateral. El problema para determinar M, es que durante esta etapa no se han definido el número de diámetros que tendrá un lateral, por esta razón para realizar los diseños se recomienda un valor de $M=2.5$ (Saldarriaga, 2007).

Finalmente, conociendo la tolerancia de presiones, se puede determinar la presión de entrada al submódulo de riego. Para esto se hace uso de los resultados obtenidos en la Ecuación 2.9 y Ecuación 2.10 y se determina la presión máxima (presión de entrada) en el submódulo de riego:

$$h_{max} = \Delta H + h_{mp} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Una vez se han definido las características que componen un sistema de riego localizado de alta frecuencia, tales como su esquema, la hidráulica de emisores, clasificación de emisores, uniformidad de riego, tolerancia de caudales y presiones, el siguiente paso es entender como es el proceso de diseño de los sistemas de riego, en qué consiste la metodología de superficie óptima de gradiente hidráulico (Saldarriaga y Ochoa, 2009) y como puede aplicarse esta para el diseño optimizado de submódulos de riego.

2.2. Diseño hidráulico de sistemas de RLAf.

Para entender la hidráulica de tuberías es necesario tener claras algunas definiciones y leyes que se utilizarán a la hora de hacer los diseños de estas redes por medio del método de Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico. Las leyes base del diseño de redes son la conservación de la masa y energía. Una vez se han entendido las ecuaciones básicas, se puede hacer usos de estas a nivel macro para analizar los diferentes sistemas hidráulicos que existen.

2.2.1. Ecuaciones básicas de la hidráulica de redes.

Como se mencionó anteriormente, las ecuaciones básicas para analizar sistemas como los de riego, son las ecuaciones de conservación de la energía, conservación de masa, y pérdidas de energía.

2.2.1.1. Ley de conservación de la masa.

La ley de conservación de la masa es aplicable en cada uno de los nudos de la red. La Ecuación 2.12 es la ecuación de conservación de la masa para toda la red.

$$\sum_{i=j}^{NT_i} Q_{ij} - Q_{Di} = 0 \quad \text{Ecuación 2.12}$$

NT_i = número de tuberías que llegan al nudo i .

Q_{ij} = Caudal que pasa por la tubería ij al nudo i desde el nudo j .

Q_{Di} = Caudal demandado en el nudo i .

La convención adoptada por la ingeniería hidráulica es que el caudal Q_{ij} es positivo si el flujo va hacia el nudo i , o negativo si el caudal sale de este nudo.

2.2.1.2. Ley de conservación de la energía.

La ecuación de conservación de energía se establece para dos puntos en la red de agua potable (Ecuación 2.13).

$$H_j - H_i = \frac{Q_{i,j}^2}{2gA_{i,j}^2} \left[\sum K m_{i,j} + f_{i,j} \left(\frac{l_{i,j}}{d_{i,j}} \right) \right] \quad \text{Ecuación 2.13}$$

$H_j =$ Altura en el nudo j.

$H_i =$ Altura en el nudo i.

$Q_{i,j} =$ Caudal transportado por el tramo comprendido entre los nudos i y j.

$A_{i,j} =$ Área transversal de la tubería entre el nudo i y j.

$K_{m_{i,j}} =$ Coeficiente de pérdidas menores.

$f_{i,j} =$ Factor de fricción en la tubería.

En esta ecuación se establece que la diferencia de energía entre un punto j y un punto i es igual a las pérdidas que se presentan en el tramo comprendido entre los dos puntos. Las pérdidas que generan esa diferencia de energía corresponden a las pérdidas por fricción y las pérdidas por accesorios.

2.2.1.3. *Pérdidas por fricción.*

Las pérdidas por fricción en un tramo de tuberías se pueden calcular haciendo uso de la ecuación deducida por los ingenieros Henry Darcy y Julius Weisbach. Estas pérdidas son función de la longitud y diámetro de la tubería, la velocidad del flujo a través de esta y el factor de fricción (ver Ecuación 2.14).

$$h_f = f \frac{l v^2}{d 2g} = f \frac{l Q^2}{d 2gA^2} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

donde f se calcula por medio de una ecuación no explícita, para flujos no laminares (ver Ecuación 2.15).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Para flujo laminar, el factor de fricción se calcula mediante:

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

2.2.2. Diseño de sistemas de RLAF.

El diseño de un sistema de riego localizado de alta frecuencia, es un proceso que depende de una serie de datos de entrada que se pueden dividir en agronómicos y no agronómicos. Dentro de los datos de entrada agronómicos se encuentran el coeficiente de uniformidad (CU), el número de emisores por planta (n_e), el caudal medio del emisor, la dosis de riego, tiempo de riego y el espaciamiento entre emisores. Dentro de los datos no agronómicos, se encuentran el coeficiente de variación (CV), la ecuación del emisor, el plano topográfico, las ecuaciones de diseño de tuberías y la conexión emisor-lateral. En la siguiente figura, tomada del trabajo de Bermúdez (2011), se muestra la secuencia de diseño de un sistema RLAF.

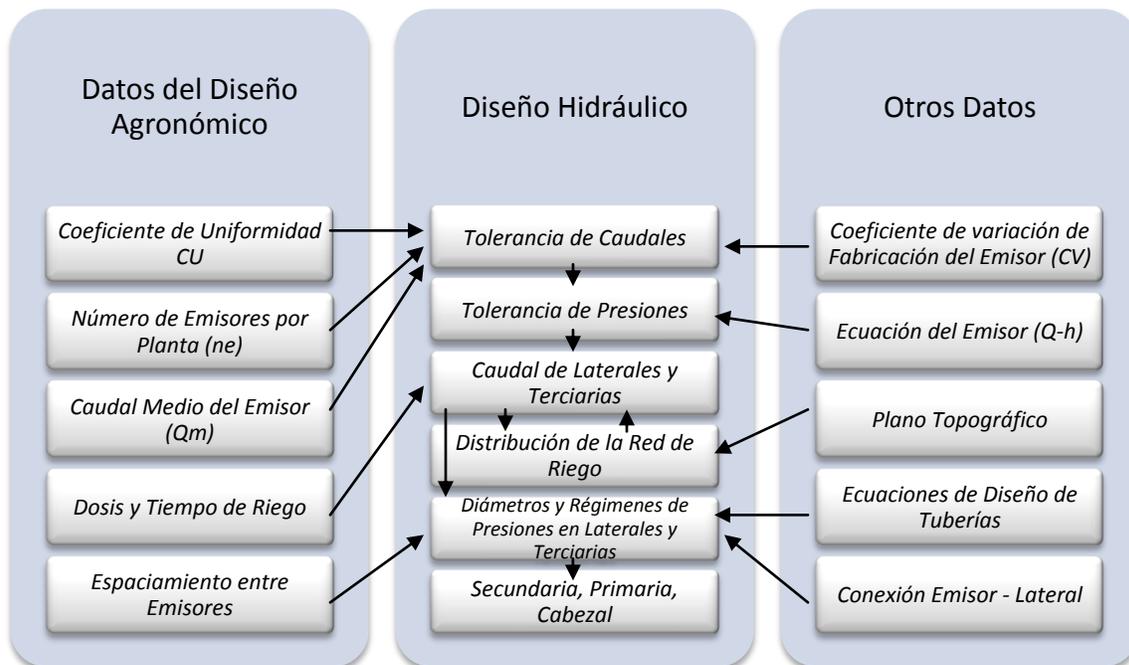


Figura 4. Secuencia del diseño hidráulico de un sistema de RLAF. Adaptado de Pizarro (1996).

Como puede observarse en la Figura 4 el proceso de diseño comienza con la determinación de la tolerancia de caudales (ver Sección 2.1.2.1), seguido por el cálculo de la tolerancia de presiones (ver Sección 2.1.2.2). Una vez se tienen los datos de presión mínima, presión máxima y caudal mínimo, los siguientes pasos corresponden a un diseño basado en una comprobación de diseño, donde el diseñador conociendo los caudales que se esperan en cada lateral prueba diferentes combinaciones de diámetros hasta encontrar una que satisfaga las condiciones de uniformidad de

riego, tolerancia de presiones y tolerancia de caudales. El procedimiento para realizar el cálculo hidráulico de un submódulo de riego se presenta a continuación.

2.2.2.1. *Cálculo hidráulico de los submódulos.*

Con base en el Capítulo 9 del libro Hidráulica de Tuberías de Juan Saldarriaga (2007), a continuación se presentan una serie de pasos que se requiere llevar a cabo para realizar el diseño hidráulico de los submódulos de riego. Esto incluye únicamente el cálculo de la tubería múltiple y los laterales de riego. El diseño no puede realizarse de forma directa y requiere de un proceso iterativo en el que el diseñador prueba diferentes diámetros de tuberías hasta satisfacer las condiciones impuestas por el diseño agronómico y los resultados del cálculo de tolerancia de caudales y presiones. Al colocar los diámetros correspondientes, el diseñador conoce únicamente las propiedades de las tuberías que utilizarán (tales como el diámetro, la rugosidad absoluta, la longitud y los coeficientes de pérdidas menores) y el caudal que sale por el emisor de mínima presión. El proceso de cálculo de un submódulo de RLAF se describe a continuación y fue tomado de Saldarriaga (2007):

1. Escoger los diámetros de las tuberías que van a conformar los laterales de riego, utilizando los disponibles en el mercado local. Escoger el diámetro del múltiple, el cual debe permitir una conexión adecuada con los laterales de riego.
2. Escoger el emisor con las condiciones más adversas de presión. Este emisor puede ser el emisor más alejado del punto de entrada al submódulo o el emisor que se encuentre ubicado en el punto más elevado. A este emisor se le asigna la presión mínima permisible.
3. A partir, del emisor de mínima presión, se procede a calcular el lateral que lo contiene. En este punto vale la pena aclarar que se conoce el diámetro del lateral (este fue asignado por el diseñador) y siempre se conocen los caudales aguas abajo, del emisor que se va a analizar. Para realizar el cálculo hidráulico es necesario hacer uso de las ecuaciones de pérdidas por fricción (ver Ecuación 2.14 y Ecuación 2.15).

$$h_f = f \frac{l v^2}{d 2g} = f \frac{l Q^2}{d 2gA^2}$$

Ecuación 2.14

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right]$$

Ecuación 2.15

Si el flujo es laminar utilizar



$$f = \frac{64}{Re}$$

Ecuación 2.16

Por su parte, el caudal que debe utilizarse para calcular el número de Reynolds y las pérdidas por fricción corresponde a la suma de los caudales de los emisores localizados inmediatamente aguas abajo del emisor que está siendo calculado. De esta manera, conociendo la presión en el nudo aguas abajo del emisor de análisis y el caudal que corre aguas abajo del nudo de análisis se puede determinar la presión en este punto como se muestra en la siguiente ecuación:

$$h_i = h_{i-1} + \sum_{j=1}^{i-1} h_{fj}$$

Ecuación 2.17

El caudal de salida del emisor de análisis se encuentra utilizando la ecuación del emisor:

$$Q_i = kh_i^x$$

Ecuación 2.1

Se debe tener en cuenta que cada uno de los términos de pérdidas de fricción de la Ecuación 2.14 tiene un caudal diferente, el cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q_j = \sum_{i=1}^j Q_i$$

Ecuación 2.18

donde los Q_i son los caudales individuales de los emisores. En la siguiente figura se muestra un esquema del cálculo de los caudales para cada uno de los tramos del lateral entre los emisores finales.

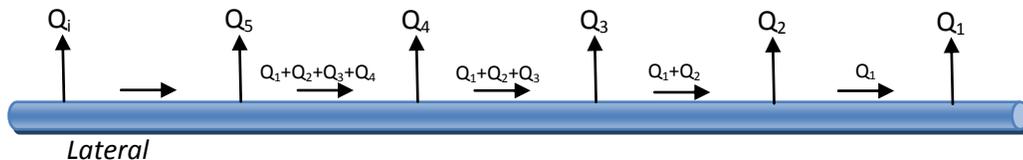


Figura 5. Esquema de cálculo de los caudales en un lateral de riego. Tomado de Bermúdez (2011). Adaptado de Saldarriaga (2007).

4. Mediante las ecuaciones anteriores se llega al cálculo de la presión en el punto en que se unen el lateral de análisis y la tubería múltiple (punto m_1 de la Figura 6).

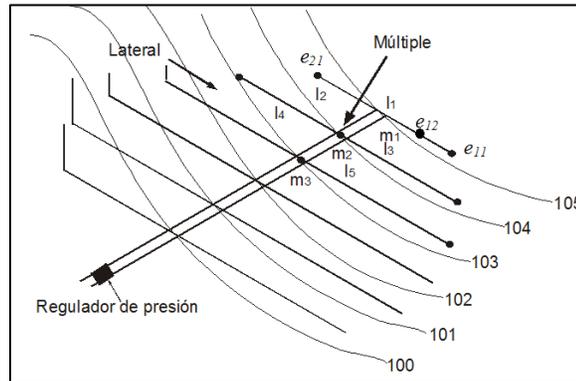


Figura 6. Esquema de un submódulo de riego. Tomado de Saldarriaga (2007).

5. Conociendo la presión en el punto m_1 se procede a calcular el siguiente lateral. En este caso, el proceso debe hacerse por tanteo ya que no se conoce el caudal que pasa por el lateral. Este proceso implica:
- Se debe suponer una presión en el último emisor del nuevo lateral de análisis (e_{21}).
 - Calcular el lateral de la misma manera como se hizo en el caso anterior (pasos 1 a 4).
 - Comparar la presión en el múltiple (m_{1i}) con la encontrada en el paso 4. Si son diferentes se debe volver a calcular la presión en el último emisor del lateral que está siendo determinado, utilizando el siguiente criterio.

$$Si \ h_{m_1} > h_{m_{1T}} \rightarrow h_{e_{2i}} = h_{e_{2i-1}} + \Delta h$$

$$Si \ h_{m_1} < h_{m_{1T}} \rightarrow h_{e_{2i}} = h_{e_{2i-1}} - \Delta h$$

en donde el Δh es un dato que debe ser suministrado por el diseñador. El proceso se detiene cuando:

$$(h_{m_1} - h_{m_{1T}}) \leq E$$

Es decir, cuando la diferencia en dos iteraciones sucesivas del valor de la presión en el múltiple sea menor que un cierto error (E) definido por el diseñador.



6. Con la presión calculada en el punto m_1 se determina la presión en el punto m_2 mediante la Ecuación 2.19.

$$h_{m2} = h_{m1} + h_{f_{m1-m2}} \quad \text{Ecuación 2.19}$$

donde la pérdida de energía debida a la fricción entre los puntos m_1 y m_2 se calcula de acuerdo con la Ecuación 2.20.

$$h_{f_{m1-m2}} = f \frac{l}{d_m} \frac{v^2}{2g} = f \frac{l}{d_m} \frac{Q^2_{m1-m2}}{2gA^2_m} \quad \text{Ecuación 2.20}$$

7. Con la presión m_2 se repite todo el proceso del paso 5 para los laterales y después la presión en m_3 y m_4 y así sucesivamente.
8. El proceso sigue hasta llegar al punto de entrada al submódulo de riego.
9. Una vez se han determinado las presiones en todos los puntos, se verifica que en ningún punto, es decir en ninguno de los emisores o grupos de emisores de alguna de las plantas del cultivo, la presión sea menor que la presión mínima permisible. De ocurrir esto, se debe reiniciar el proceso asignando la presión mínima al emisor o punto de emisión donde el proceso haya dado esa presión menor que la mínima permisible.
10. Finalmente se verifica la tolerancia de presiones.

El proceso de diseño descrito en esta sección hace referencia al proceso de diseño clásico. En este trabajo se propone hacer uso de una metodología que hace uso de programación lineal en conjunto con los primeros pasos del método de Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico (SOGH) con el objetivo de obtener un diseño económico de forma rápida. En la siguiente sección se comienza por describir la metodología SOGH, más adelante se mostrará la formulación matemática de la metodología planteada y el algoritmo final para el diseño de submódulos.

2.2.2.2. Método de Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico.

En el año 2009 y conscientes del problema que implica obtener un diseño de redes de agua potable óptimo, Juan Saldarriaga y Susana Ochoa de la Universidad de los Andes, propusieron este método con el objetivo de tener de manera rápida y óptima, los diseños de redes de agua potable.

El objetivo de esta metodología es minimizar el costo de la red. Este costo incluye el costo comercial de las tuberías y el costo de instalación. Los costos constructivos se pueden calcular de la siguiente manera:

$$C = \sum_{i=1}^{NT} \alpha \cdot L_i \cdot D_i^b$$

Ecuación 2.21

donde NT es el número de tuberías que forman parte de la red, L_i es la longitud de la i -ésima tubería, D_i es el diámetro de la i -ésima tubería, α y b son parámetros que se determinan mediante una regresión de costos comercial y de instalación de las tuberías en función de su diámetro. Esta función de costos es la que se pretende minimizar teniendo en cuenta las restricciones hidráulicas y comerciales que se tienen al momento de diseñar la red.

Como se mencionó en el párrafo anterior el objetivo es minimizar el costo de la red. Esto se logra a partir de la línea de gradiente hidráulico (LGH) que implique los menores costos. Esta LGH conocida como la línea de gradiente hidráulico, depende de tres factores que son la distribución de las demandas, la relación entre el caudal total demandado y la longitud total de la serie de tuberías y del exponente de la función de costos.

La LGH óptima presenta una forma parabólica; de esta manera es necesario conocer tres puntos de la curva para encontrar la ecuación que describe su trayectoria. Estos tres puntos son el inicio de la LGH (LGH de la fuente de abastecimiento), la LGH del nudo topológicamente más alejado de la fuente y el punto de máxima curvatura.

Las etapas que conforman la metodología se describen a continuación:

1. Asignación inicial de diámetros.

Con el fin de determinar la distancia topológica de un nudo a la fuente (distancia que recorre el agua desde un punto de almacenamiento antes de llegar a un nudo) es necesario conocer una hidráulica previa de la red, por lo que es importante asignar inicialmente un diámetro a cada tubería. Se recomienda asignar el menor diámetro disponible a todas las tuberías, lo cual garantiza que la distribución de caudales sea lo más independiente posible del diseño y hace que el agua fluya de las fuentes de abastecimiento hacia los nudos y no en sentido contrario. Después de conocer la hidráulica de la red, es decir, qué caminos toma el agua antes de llegar a un nudo, se calcula la distancia topológica de cada nudo.

Conociendo la distancia topológica se puede asignar a cada tubería un diámetro inversamente proporcional a esa distancia, es decir entre más lejos se encuentren la tubería de la fuente de abastecimiento, menor debe ser su diámetro.

2. Estimación de la flecha óptima de la curva LGH vs abscisa.

La flecha óptima se calcula de la misma manera que en el caso de una serie de tuberías; sin embargo, debido a que se tiene una red y no una serie de tuberías, la manera en la cual se calcula el centroide de demandas, varía y se calcula como se explica a continuación.

- Calcular el centroide de demandas:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=0}^{NN} q_i d_{i \text{ Topológica}}}{Q_{total} d_{\text{Topológica Máxima}}} \quad \text{Ecuación 2.22}$$

Donde:

NN = número de nudos.

q_i = caudal demandado en el nudo i .

$d_{i \text{ Topológica}}$ = distancia del nudo i con respecto a las fuentes de abastecimiento.

Q_{total} = Caudal total demandado en la red.

$d_{\text{topológica máxima}}$ = Distancia topológica del nudo más alejado de las fuentes de abastecimiento.

- El Coeficiente de Uniformidad 7 (CU_7) es un indicador de la localización de las demandas, considerando tanto su ubicación espacial como su magnitud, con respecto al Centroide de Demandas. Para estimar el CU_7 se supone que el Centroide de Demandas (\bar{x}) divide la red en dos subconjuntos: el primero corresponde a los nudos cuya distancia topológica es inferior a la distancia a la que se encuentra localizado (\bar{x}) con respecto a la fuente de abastecimiento; el segundo está conformado por los nudos con mayor distancia topológica. Para cada uno de los dos subconjuntos se debe calcular su Centroide de Demandas con respecto al centroide general (\bar{x}) y luego se hace un promedio ponderado de estos dos centroides, así:

$$CU_7 = \bar{x}_1 \left(\frac{L_1}{d_{\text{topológica máxima}}} \right) + \bar{x}_2 \left(\frac{L_2}{d_{\text{topológica máxima}}} \right) \quad \text{Ecuación 2.23}$$



donde \bar{x}_1 es el centroide de demandas del subconjunto 1, \bar{x}_2 es el centroide de demandas del subconjunto 2, L_1 es la longitud del primer subconjunto y L_2 la del segundo. L_1 es igual a la distancia a la que se encuentra localizado (\bar{x}) con respecto a la fuente de abastecimiento y L_2 corresponde a la diferencia entre la distancia topológica máxima y L_1 :

$$L_1 = \bar{x} \cdot d_{\text{topológica máxima}} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

$$L_2 = d_{\text{topológica máxima}} - L_1 \quad \text{Ecuación 2.25}$$

Los centroides \bar{x}_1 y \bar{x}_2 se calculan con respecto al centroide general (\bar{x}) y la expresión para su estimación es la siguiente:

$$\bar{x}_s = \frac{\sum_{i=1}^{NNs} q_i \cdot |d_{\text{topológica } i} - \bar{x} \cdot d_{\text{topológica máxima}}|}{\sum_{i=1}^{NNs} q_i \cdot d_{\text{topológica máxima}}} \quad \text{Ecuación 2.26}$$

donde NNs corresponde al número de nudos del subconjunto s .

- *Cálculo de la flecha óptima en función del centroide de demandas y el coeficiente de uniformidad 7:*

$$Flecha_{1.46} = a + b \cdot \bar{x} + c \cdot CU_7 + d \cdot (CU_7)^2 \quad \text{Ecuación 2.27}$$

donde:

$$a = 0.435521465$$

$$b = -0.176612805$$

$$c = -0.977366227$$

$$d = 0.906254447$$

La flecha calculada con esta ecuación corresponde a una relación $Q^2/L^3 = 1 \times 10^{-9}$ y a un exponente de la función de costos de 1,46, dado que estos fueron los parámetros considerados en la derivación de dicha ecuación.

- *Cálculo de la flecha óptima para el exponente de la función de costo (n) que se tenga:*

$$\text{Flecha}_n = \alpha \cdot n^2 + \beta \cdot n + \gamma$$

Ecuación 2.28

donde:

n = Exponente de la función de costos.

$$\alpha = -0.1134F_{1.46} + 0.0032$$

$$^1\beta = 0.6443F_{1.46} + 0.0043$$

$$\gamma = 0.2835F_{1.46} - 0.0111$$

$F_{1.46}$ = Flecha óptima para un exponente de 1.46.

- *Cálculo de la flecha óptima para la relación real de Q^2/L^3 :*

$$\text{Flecha óptima} = a \ln\left(\frac{Q^2}{L^3}\right) + b$$

Ecuación 2.29

donde:

$$a = 0.00868F_n + 0.00066$$

$$b = 1.18069F_n + 0.01345$$

F_n = Flecha óptima para una relación de $Q^2/L^3 = 1 \times 10^{-9}$.

Q corresponde al caudal total demandado en el sistema y L a la longitud total del mismo. Para el cálculo de la relación Q^2/L^3 la longitud debe corresponder al recorrido total del agua en el sistema; por lo tanto, en el caso de redes de distribución esta longitud total se calcula como la sumatoria de las longitudes de los tubos, así:



$$L_{Total} = \sum_{i=1}^{NT} L_i$$

Ecuación 2.30

donde NT es número total de tubos de la red y L_i es la longitud total del tubo $_i$

3. Con los diámetros asignados, realizar una simulación hidráulica para determinar caudales, sentidos de flujo y las distancias topológicas de los nudos.
4. Cálculo de la superficie óptima de gradiente hidráulico:

Consiste en calcular la LGH ideal para cada nudo de la red; la superficie óptima de gradiente hidráulico está conformada por un conjunto de puntos con coordenadas (X, Y, LGH). Para calcular la SOGH se deben seguir los siguientes pasos.

- Iniciar el LGH de todos los nudos en cero.
- Determinar y asignar la fuente de abastecimiento de cada nudo. Esto se hace inyectando un trazador y simulando la hidráulica de la red. Si un nudo es abastecido por más de una fuente se le asigna aquella con mayor LGH.
- Detectar los sumideros de la red, es decir aquellos nudos que no alimentan a ningún otro nudo de la red.
- Ordenar los sumideros de mayor a menor distancia topológica.
- Recorrer los sumideros en el orden establecido en el paso 4 y para cada uno realizar los procedimientos descritos del paso 6 al 10.
- Iniciar el número de sumideros en 1.
- Asignar a cada sumidero una LGH ideal que cumpla con la presión mínima y considere la altura topográfica de cada nudo.

$$LGH_{IDEAL\ i} = Z_{sumidero\ i} + P_{min}$$

Ecuación 2.31

- Identificar el embalse asignado al sumidero i .
- Ajustar los coeficientes de la ecuación cuadrática que se utilizará para calcular la LGH óptima. Esta ecuación se puede reescribir de la siguiente manera para el caso de redes.

$$LGH(x) = \alpha d^2 + \beta d + \gamma$$

Ecuación 2.32

donde:



$$\alpha = 4F \frac{(LGH_{m\acute{a}x} - LGH_{m\acute{i}n})}{L_{total}^2}$$

$$\beta = - (1 + 4F) \frac{(LGH_{m\acute{a}x} - LGH_{m\acute{i}n})}{L_{total}}$$

$$\gamma = LGH_{m\acute{a}x}$$

5. Asignación de las pérdidas de energía objetivo a cada tramo de tubería.
6. Cálculo del diámetro ideal de cada tubería para las pérdidas objetivo fijadas en la etapa 5 y para los caudales obtenidos en la simulación hidráulica del paso 3.
7. Realizar una simulación hidráulica para estimar las pérdidas reales de energía que se presentan en cada tubería para los nuevos diámetros calculados.
8. Cálculo del error entre las pérdidas de energía objetivo obtenidas en la etapa 5 y las reales obtenidas en la etapa 7.
9. Si el error calculado en la etapa 8 es menor al error admisible o si el número de interacciones realizadas es superior al máximo se continúa con la etapa 10, de lo contrario se regresa a la etapa 3.
10. Realizar una simulación hidráulica con los diámetros obtenidos en la etapa 9, para determinar los caudales en las tuberías y las presiones en los nudos de la red.
11. Si en algún nudo de la red, la presión es inferior a la mínima, se realizan correcciones de las prominencias para poder continuar con la etapa 12.
12. Aproximación de todos los diámetros al siguiente diámetro comercial.
13. Aplicación de programación por restricciones para aumentar diámetros hasta que se satisfaga el requisito de presión mínima en todos los nudos.
14. Aplicación de programación por restricciones para disminuir los diámetros de algunas tuberías, teniendo en cuenta el requisito de presión mínima en todos los nudos.

Respecto a esta metodología es importante recalcar que tuvo sus inicios en el diseño de redes de distribución de agua potable. Para este tipo de redes, la metodología ha probado llevar a



resultados muy económicos y rápidos. Su uso para el diseño de sistemas de riego localizado de alta frecuencia comenzó en el 2010 con el trabajo realizado por Bermúdez y donde se probó la aplicabilidad de esta metodología para este tipo de sistemas. Existen algunas variaciones y puntos de esta metodología que no se han tomado en cuenta a la hora de hacer los diseños. Por ejemplo, en el paso 2 de la metodología (Cálculo de la flecha óptima), en sistemas de riego no es posible hablar de un centroide de demandas que lleve a determinar la flecha óptima. No se puede hablar de un centroide de demandas, dado que las demandas en los nudos no son constantes o no corresponden a una demanda base (La demanda base en los nudos es cero). Por el contrario, la demanda en los nudos de un sistema de RLAF son demandas que dependerán de las presiones en los nudos y por ende, de la línea de gradiente hidráulico objetivo que se tenga. De esta manera, la demanda en cada uno de los nudos, va a depender de la LGH objetivo, la cual a su vez depende de la flecha que el diseñador defina. Finalmente, en la Figura 7 se resumen los pasos de la metodología SOGH haciendo uso de un diagrama de flujo tomado del trabajo de Ochoa (2009).

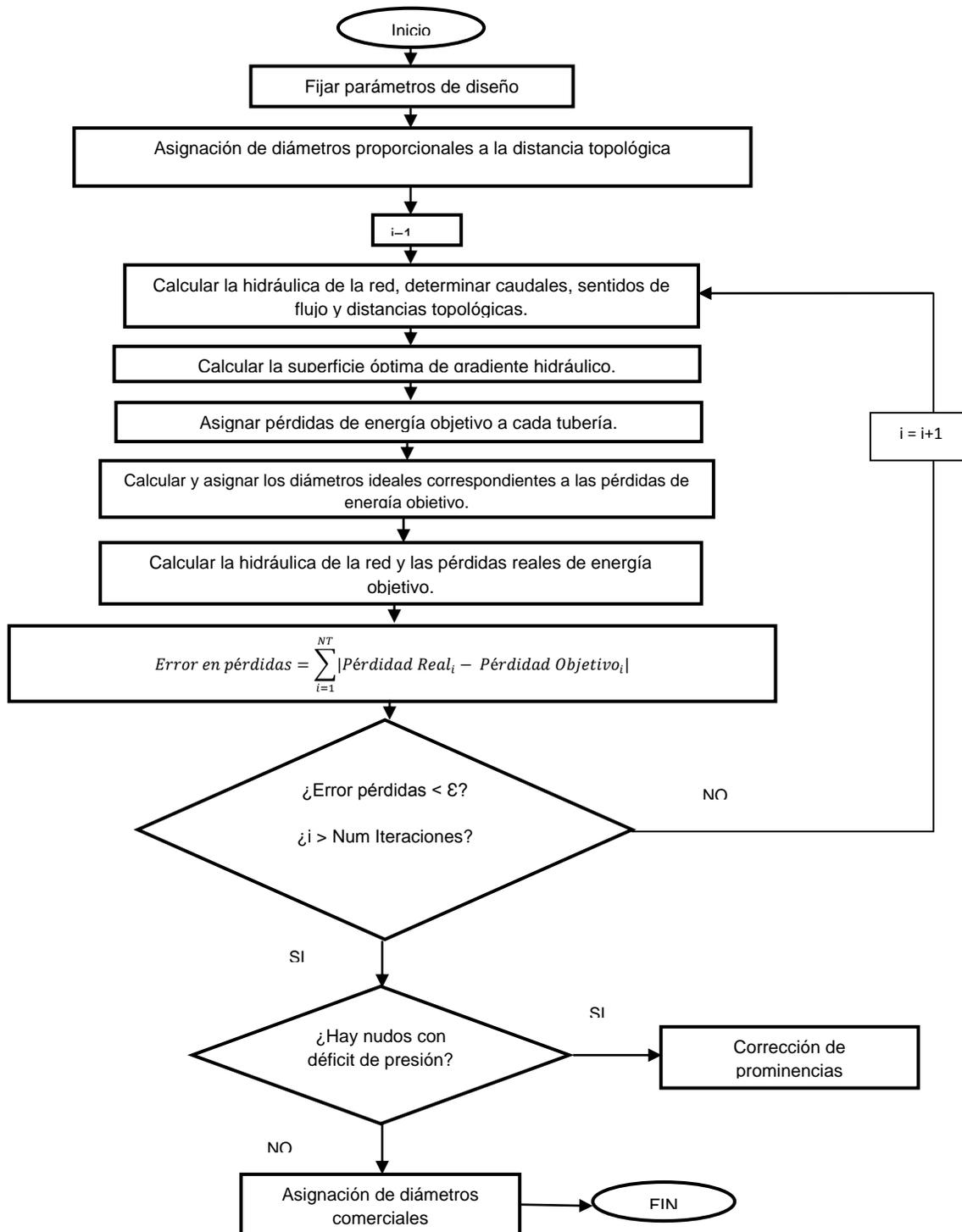


Figura 7. Etapas de la metodología SOGH. Tomando de Saldarriaga y Ochoa (2009).

2.2.3. Resultados y análisis de trabajo de Bermúdez (2011).

Para realizar el trabajo de diseño de submódulos de riego localizado de alta frecuencia, Bermúdez hizo uso del programa REDES, desarrollado en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA). El producto final de este trabajo consiste en una metodología para determinar la presión de entrada al submódulo de riego, de tal forma que el coeficiente de uniformidad resultante (después del diseño) sea igual o superior al mismo que suministra el diseño agronómico.

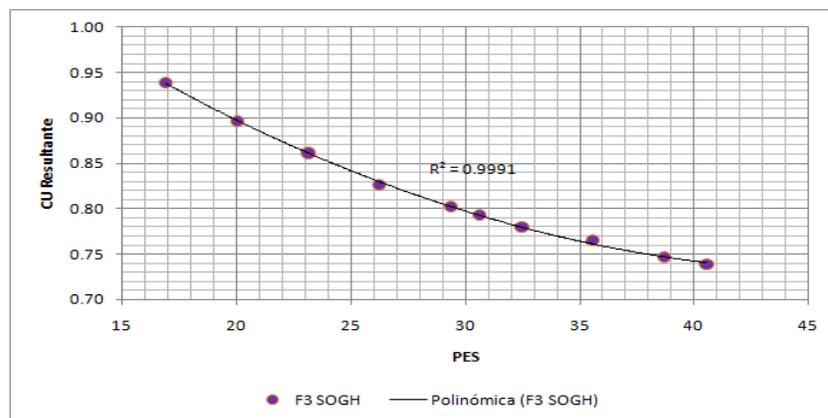
Para comenzar este proceso, vale la pena recordar que el diseño de submódulos de riego comienza determinando la tolerancia de caudales y la tolerancia de presiones. A partir de estos cálculos se determina, la presión mínima y la presión máxima que se puede presentar en los submódulos. El problema que presentaba esta metodología es que el cálculo de la presión máxima se obtiene mediante la Ecuación 2.11.

$$h_{max} = \Delta H + h_{mp} \quad \text{Ecuación 2.33}$$

donde

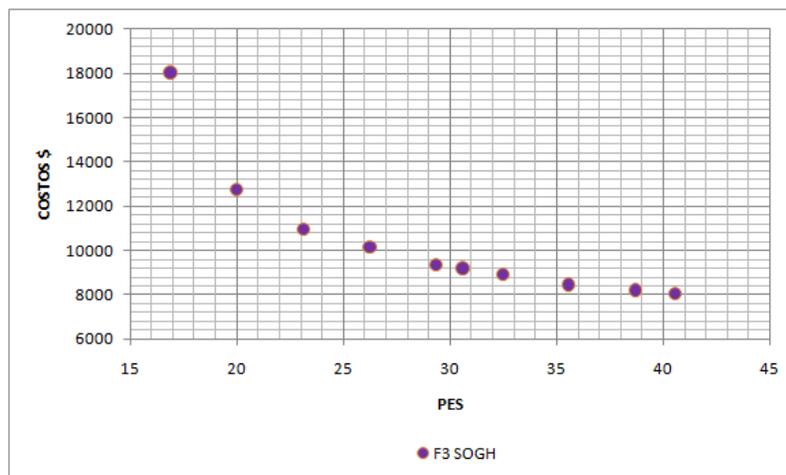
$$\Delta H = M(h_m - h_{mp}) \quad \text{Ecuación 2.34}$$

y M, es un valor que se no se conoce de antemano y se sugiere usar un valor de 2.5. De esta manera, el primer paso en el trabajo de Bermúdez consistió en observar la manera en que variaban los resultados de coeficiente de uniformidad (CU) y costos, si este valor M cambiaba. Para esto, se varió el valor de M entre 0.5 y 4.3. Una vez hecho esto, Bermúdez encontró los siguientes resultados:



Gráfica 2-1. Coeficiente de uniformidad resultante vs. Presión de entrada al submódulo. Tomado de Bermúdez (2011).

En la Gráfica 2-1 se observa que el coeficiente de uniformidad resultante y la presión de entrada al submódulo, presentan una relación cuadrática. En la medida en que la presión de entrada disminuye (valores de M pequeños) el coeficiente de uniformidad resultante es mayor; por otro lado, para valores muy altos (superiores a 2.5) el coeficiente de uniformidad es inferior al deseado por el diseño agronómico. Respecto a este resultado de Bermúdez, vale la pena decir que los resultados son consistentes con lo que se esperaría. Resulta claro que si se mantiene la presión mínima fija y se varía la presión de entrada únicamente, a medida que el rango de presiones dentro del submódulo se reduce, la variación entre los caudales de salida de los emisores que componen el submódulo, será menor. Por otro lado, aunque un menor rango entre las presiones, resulta en un coeficiente de uniformidad más alto, también conlleva a una red más costosa (ver Gráfica 2-2).



Gráfica 2-2. Costo total de la red vs. Presión a la entrada del submódulo. Tomado de Bermúdez (2011).

Como se observa en la Gráfica 2-2 al tener una menor presión de entrada al submódulo, se tienen mayores costos. Esto se debe a que, al tener un menor rango entre la presión mínima y la presión máxima, se tiene menos energía para perder a lo largo del submódulo. El hecho de tener menos energía disponible para perder a lo largo del sistema, implica mayores diámetros de tuberías con el objetivo de reducir velocidades y lograr disminuir las pérdidas por fricción y pérdidas menores.

A partir de estos resultados, Bermúdez decidió establecer de qué depende esta curva. Para esto empezó a variar diferentes variables tales como el exponente de los emisores, el coeficiente de los emisores, la topología de la red, el coeficiente de variación (CV), la presión media, el coeficiente de uniformidad del diseño agronómico y el número de emisores por planta. A partir de los resultados obtenidos, Bermúdez planteó una metodología de diseño que es la que se resume a continuación.

2.2.3.1. Descripción de la metodología de diseño de propuesta por Bermúdez.

La metodología propuesta por Bermúdez consta de 5 pasos que se describen a continuación. Vale aclarar, que antes de comenzar con el proceso es necesario contar con los parámetros de diseño, topología de la red, la uniformidad de riego, las características del emisor a emplear y los diámetros comerciales disponibles. Una vez se tiene esto se procede así:

1. Cálculo de tolerancia de caudales y presiones.

Este procedimiento se hace de forma exacta a como se describió en la Sección 2.1.2.1 y Sección 2.1.2.2. Este procedimiento para determinar el caudal de mínima presión, la presión mínima, la tolerancia de presiones, resulta exactamente igual a como se hace el diseño actualmente. En este paso lo único que cambia es el cálculo de la presión de entrada al submódulo de riego. Esta presión se calcula como se muestra en el siguiente paso.

2. Cálculo de la presión de entrada del submódulo.

La presión a la entrada del submódulo corresponde a la energía necesaria, inmediatamente después de la válvula reguladora de presión para cumplir con la uniformidad de riego. Como se mencionó anteriormente, Bermúdez determinó que la relación entre la presión de entrada al submódulo y el coeficiente de uniformidad resultante es una ecuación cuadrática de la siguiente forma:

$$CU_R = \alpha(PES)^2 + \beta(PES) + \gamma_T \quad \text{Ecuación 2.35}$$

donde CU_R es el coeficiente de uniformidad resultante, PES es la presión de entrada del submódulo; y α , β y γ_T son coeficientes que describen la forma y ubicación de la curva. El valor de γ_T se calculó como se muestra en la Ecuación 2.36.

$$\gamma_T = \gamma + \gamma_{[CU]} + \gamma_{[CV]} \quad \text{Ecuación 2.36}$$

donde

$$\gamma_{[CU]} = 0.03 \cdot \left[\frac{CU_I - 0.8}{0.05} \right] \quad \text{Ecuación 2.37}$$

y

$$\gamma_{[CV]} = 0.004 \cdot \left[\frac{CV - 0.04}{0.01} \right]$$

Ecuación 2.38

Los valores de α , β y γ se calculan como se muestra en la Tabla 4. En esta tabla resulta claro que estos tres parámetros dependen de la presión nominal de trabajo y del exponente del emisor.

Tabla 4. Ecuaciones para la determinación de los coeficientes α , β y γ . Tomado de Bermúdez (2011).

Tipo de Emisor	Caudal Nominal [L/h]	Presión Nominal [mca]	α	β	γ
Bajo Caudal	2 – 16	1	[0.2112x – 0.032810]	[–0.7953x + 0.0602]	[0.5667x + 0.8676]
		5	[0.0107x – 0.002007]	[–0.1645x + 0.01631]	[0.5541x + 0.8638]
Alto Caudal	16 – 150	10	[0.0019x – 0.000212]	[–0.0807x + 0.00343]	[0.6196x + 0.8752]
		15	[0.0010x – 0.000137]	[–0.0565x + 0.0029]	[0.6224x + 0.8748]
		20	[0.0005x – 0.000054]	[–0.0413x + 0.00206]	[0.6065x + 0.8753]

Conociendo los valores de α , β y γ_T se procede a conformar la Ecuación 2.35 y determinar la presión de entrada al submódulo, que llevará a tener el coeficiente de uniformidad resultante deseado.

3. Aplicar la metodología de Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico (SOGH).

Esta metodología fue desarrollada para redes de distribución de agua potable; por esta razón, según Bermúdez, fue necesario realizar algunas modificaciones en ciertas etapas para poder hacer uso de la metodología. Primero es necesario definir la altura del tanque o fuente de abastecimiento, ya no corresponde a un parámetro de diseño o dato de entrada; este valor será tomado del paso anterior; es decir, la LGH del tanque es igual a la PES calculada más la cota topográfica correspondiente.

Bermúdez recomienda realizar algunos cambios en el cálculo de la flecha óptima. El cambio que se requeriría hacer en la metodología SOGH, corresponde a la etapa 2, en el cálculo del centroide de demandas. Bermúdez propone calcular este centroide de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$\bar{x} = \frac{\left(\frac{q_m \cdot n_e \sum_{i=0}^{NN} d_{topológica i}}{Q_{total}} \right)}{d_{topológica máxima}}$$

Ecuación 2.39

donde q_m es el caudal medio de operación del emisor, n_e el número de emisores por planta, NN corresponde al número de nudos que representan un punto de emisión en la red, $d_{topológica i}$ es la distancia topológica del nudo i con respecto a la válvula reguladora de presión, Q_{total} corresponde al caudal total demandado en la red y $d_{topológica máxima}$ es la distancia topológica

máxima (i.e. la distancia topológica del punto de emisión más alejado de la válvula reguladora de presión).

Finalmente, Bermúdez propone que el mejor proceso de aproximación de diámetros continuos a discretos, corresponde a un redondeo al diámetro comercial más cercano.

4. Cálculo del coeficiente de uniformidad resultante del submódulo diseñado.

El coeficiente de uniformidad resultante corresponde al calculado con los datos finales de la red. Para esto se debe conocer el caudal de mínima presión resultante y el caudal medio resultante. A partir de estos resultados se puede calcular el CU_R de la siguiente manera:

$$CU = 100 \left(1 - \frac{1.27CV}{\sqrt{n_e}} \right) \frac{Q_{mp}}{Q_m}$$

Ecuación 2.3

5. Si CU_R es menor que CU impuesto por el diseño agronómico volver al paso 2.

Si el Coeficiente de Uniformidad Resultante CU_R del submódulo diseñado es menor al Coeficiente de Uniformidad CU_i impuesto por el diseño agronómico se debe rediseñar. Lo anterior se puede presentar porque el valor calculado de la Presión a la Entrada del Submódulo corresponde a una aproximación.

Si se presenta lo anterior, es necesario volver al paso 2 de la metodología de diseño SOGH ajustada y reducir la Presión a la Entrada del Submódulo, de lo contrario finaliza el proceso.

Estos son los 5 pasos que conforman la metodología propuesta por Bermúdez y la cual será analizada en secciones siguientes de este trabajo. Esta metodología puede resumirse en el diagrama de flujo presentado en la Figura 8.

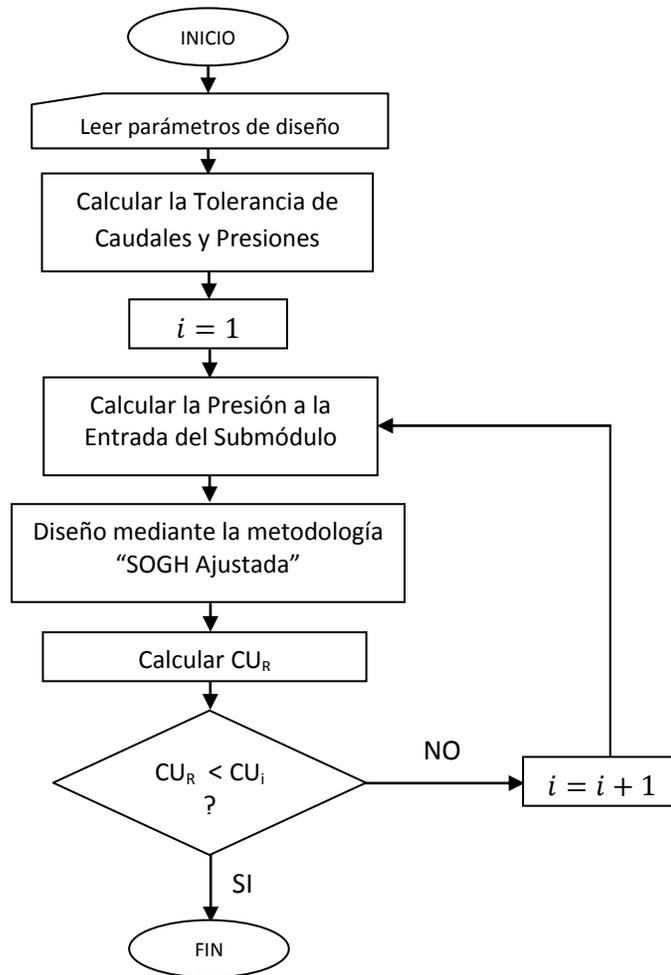
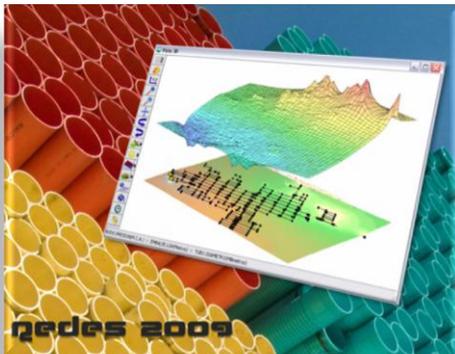


Figura 8. Diagrama de flujo de la metodología SOGH ajustada propuesta por Bermúdez (2011).

2.3. Programas.

Para el desarrollo de este trabajo se hizo uso de varios programas que permitieron diseñar diferentes submódulos de riego y calcular las características hidráulicas resultantes. Los programas que permitieron la realización de este trabajo fueron el programa REDES (desarrollado en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, CIACUA), EPANET (desarrollado por la Environmental Protection Agency, EPA) y el optimizador Xpress (desarrollado por Dash Associates Ltda.). A continuación se presenta una breve descripción del programa REDES y el optimizador Xpress.

2.3.1. Programa REDES.



El programa REDES, desarrollado en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados CIACUA de la Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, es una herramienta de simulación de sistemas de tuberías con flujo a presión.

El desarrollo del programa REDES está basado en criterios de optimización de Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP) a los que se ha llegado a través de investigaciones en diferentes universidades de Estados Unidos y Europa. Entre los criterios más importantes se encuentran los de optimización económica de diámetros de tuberías en redes cerradas de distribución de agua, desarrollados por Ronald Featherstone y Karim El-Jumaily (basados en el criterio de Wu), el método del gradiente para el cálculo de redes cerradas de distribución de agua, desarrollado por Ezio Todini y Enda O'Connell y el método de Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico, desarrollado por Susana Ochoa como tesis de magíster. Este último, corresponde a la metodología que se aplicará para el diseño de submódulos de RLAF.

A diferencia de otros programas comerciales, el programa REDES permite el diseño optimizado de redes de distribución de agua, tanto de redes nuevas como de ampliaciones de redes existentes. En su módulo de diseño incluye las opciones para diseñar con diferentes métodos: Algoritmos Genéticos aplicados al diseño de redes, Superficie Óptima de Presiones (SOP), Programación por Restricciones y Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico (SOGH).

2.3.1.1. Características del Programa.

La interfaz gráfica de REDES consiste en un mapa de la red en la cual es posible visualizar los valores de diferentes variables de los elementos; de igual forma se pueden apreciar a través de curvas de nivel y de superficies, de manera que el usuario pueda tener una idea global de lo que ocurre en la red.

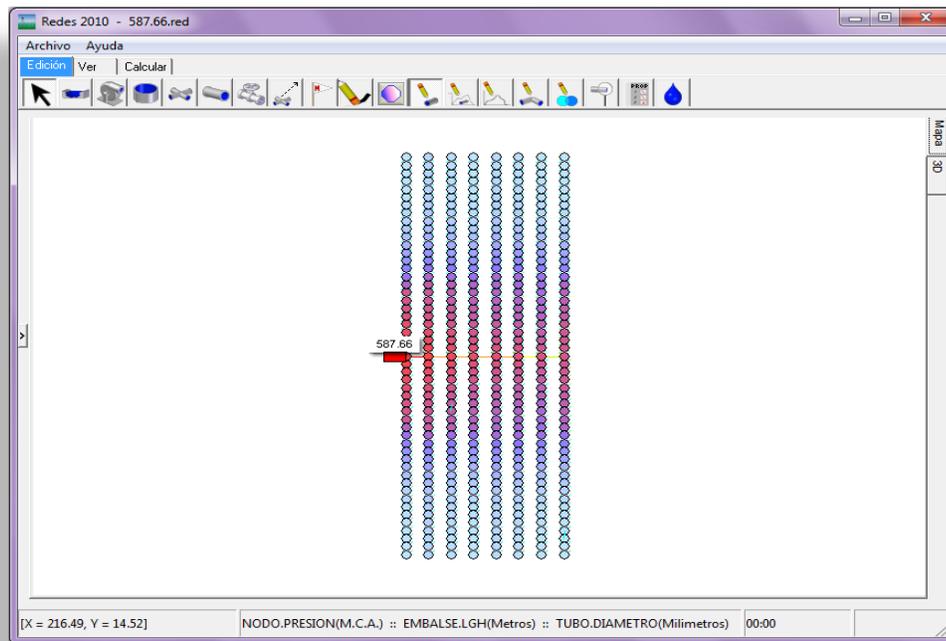


Figura 9. Mapa de un submódulo de RLAF en el programa REDES con altura piezométrica en los nudos de acuerdo con una escala de colores.

2.3.1.2. Elementos.

Hasta la red más simple está compuesta por al menos una fuente de agua, un tubo y un nudo de demanda; sin embargo, redes más complejas pueden tener diferentes accesorios, como emisores, válvulas o bombas hidráulicas. El programa REDES maneja siete tipos de elementos diferentes, presentados a continuación:

- **Embalses;** son fuentes de agua cuya altura piezométrica es fija.
- **Tanques;** fuente de agua cuya altura piezométrica es variable, ya que pueden tener un caudal de entrada y alimentar la red o pueden ser alimentados por la red y tener un caudal de salida.
- **Nudos;** puntos donde hay demanda de caudal.



- **Tuberías;** tuberías de la red.
- **Emisores;** elementos hidráulicos de los nudos que permiten simular fugas y emisores en sistemas de riego.
- **Válvulas;** accesorios de las tuberías que combinan la relación entre altura piezométrica y el caudal, se pueden modelar válvulas reductoras de presión, válvulas reguladoras de presión, válvulas de control de caudal, válvulas de propósito general, válvulas de regulación de cierre y válvulas de cheque.
- **Bombas;** accesorios de las tuberías que proporcionan energía a la red.

2.3.1.3. Capacidades del Programa.

El programa REDES ofrece múltiples opciones de cálculos al usuario; entre estas se encuentra el cálculo hidráulico estático (cálculo de alturas piezométricas y presiones), cálculo hidráulico en periodo extendido (cálculo hidráulico a diferentes horas del día), cálculo de la calidad de agua (concentraciones, edad, trazadores y porcentaje de procedencia), diseño de RDAP con métodos modernos, calibración de redes y cálculo del índice de resiliencia.

2.3.2. Optimizador Xpress.

El programa Xpress es un optimizador que cuenta con sofisticados subprocesos y múltiples algoritmos con capacidad de resolver con rapidez y precisión diferentes problemas de optimización. Los algoritmos de optimización de Xpress tienen la capacidad de resolver problemas lineales (LP), problemas lineales usando variables enteras, problemas cuadráticos (QP), problemas cuadráticos usando variables enteras y problemas lineales convexos, entre otros.

Este optimizador proporciona implementaciones rápidas y fiables de los métodos simplex primal y dual para resolver problemas de programación lineal e integra algoritmos de solución previa para reducir el tamaño y el tiempo del problema. Realiza ajustes automáticos para un mejor rendimiento y tiene una amplia gama de parámetros configurables para un control avanzado del proceso de optimización. El programa cuenta también con el optimizador MIP que hace uso del algoritmo Branch and Bound para resolver problemas que utilizan variables enteras; este algoritmo elimina de forma efectiva las soluciones no factibles y reduce considerablemente el espacio y tiempo de solución en busca de la solución óptima.

En secciones siguientes de este documento se mostrará el uso que se le dio al programa Xpress para realizar diseños de submódulos. Para este trabajo se formuló el problema de diseño como un problema de optimización lineal y la formulación se implementó en Xpress dejando claro la función objetivo del problema y sus diferentes restricciones.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS PRIMERA FASE

Este proyecto, tiene como objetivo principal, determinar la forma óptima de realizar el diseño de submódulos de sistemas de riego localizado de alta frecuencia. Para cumplir con este objetivo se diseñó una metodología basada en programación lineal, la cual fue evaluada respecto a la metodología de Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico. Los Numerales 3.1 y 3.2 hacen un análisis de la metodología SOGH y los resultados obtenidos en su aplicación para el diseño de submódulos de RLAF. En el Numeral 3.3 se hace un análisis de la metodología propuesta por Bermúdez para determinar la presión de entrada al submódulo de riego. Finalmente a partir de la página 79 el Capítulo 3.4 explica la metodología final propuesta para el diseño de submódulos de riego.

3.1. Análisis metodología SOGH.

Sobre esta metodología propuesta en el año 2009, hay que decir que es una metodología bastante adecuada a la hora de hacer diseños rápidos y económicos de redes de distribución de agua potable (RDAP). Los pasos propuestos por la metodología SOGH que fueron resumidos en la Figura 7, parecen en principio simples de aplicar al diseño de submódulos de sistemas de riego; sin embargo, esta metodología no puede ser aplicada de forma directa ya que presenta algunas restricciones que deben ser tenidas en cuenta.

3.1.1. Análisis etapa 2, metodología SOGH.

En la etapa 2 de la metodología SOGH Ochoa y Saldarriaga proponen encontrar la flecha óptima de diseño. La flecha óptima para el diseño de RDAP es función de varios parámetros y variables, tales como el caudal total demandado por el sistema, la longitud total del sistema, el exponente de función de costos, el centroide de demandas (\bar{x}) y el coeficiente de uniformidad 7 (CU_7). El primer problema que se tiene en sistemas de RLAF, con respecto a la estimación de la flecha óptima, consiste en que para un submódulo de riego no se conocen a priori los caudales de los emisores.

Cuando se está diseñando un submódulo de riego, el diseñador no conoce los caudales que saldrán por cada uno de los emisores. En una RDAP, por ejemplo, los caudales demandados son conocidos en cada uno de los nudos y a partir de estos, el diseñador puede estimar el caudal total demandado en la red, el centroide de demandas y el coeficiente de uniformidad 7 (CU_7). Por el contrario en el diseño de los sistemas de RLAF, la demanda de cada uno de los nudos va a depender de la presión. Esta presión a su vez, es definida por el diseñador y hace referencia a la línea de gradiente hidráulico (LGH) objetivo, que el mismo diseñador asigna.

Teniendo en cuenta lo mencionado en el párrafo anterior, no es posible establecer una flecha óptima de diseño sin antes conocer la presión en cada uno de los nudos. Esto se debe, a que la LGH objetivo depende de la flecha escogida. De esta manera, como primer paso vale la pena variar la flecha de diseño para cada una de las redes de caso de estudio, y determinar el comportamiento de los costos en relación con la flecha. Antes de proceder a mostrar los resultados de la variación de la flecha, se presenta otra de las restricciones presentes en la metodología SOGH.

3.1.2. Flecha mínima y máxima para el diseño de sistemas de riego.

Como bien lo estableció I-pai Wu (1975) y posteriormente Ochoa y Saldarriaga (2009), la red de mínimo costo puede corresponder a aquel diseño que se desarrolla a partir de una línea de gradiente hidráulico parabólica. En el caso del diseño de submódulos de riego, el punto correspondiente a la LGH máxima, será la cota de entrada al submódulo más la presión de entrada (ver Ecuación 3.1).

$$LGH_{max} = Cota_{entrada} + PES$$

Ecuación 3.1

El punto correspondiente al gradiente hidráulico mínimo, corresponde al sumidero que presente las condiciones más adversas topográficamente y que se encuentre más alejado de la válvula reguladora de presión. La presión mínima, es la correspondiente al caudal de mínima presión obtenido en el cálculo de tolerancia de caudales. Finalmente, para poder describir una parábola, se requiere de un tercer punto. Este tercer punto, corresponde al lugar donde se presenta la máxima curvatura en la LGH; y se puede determinar mediante la flecha.

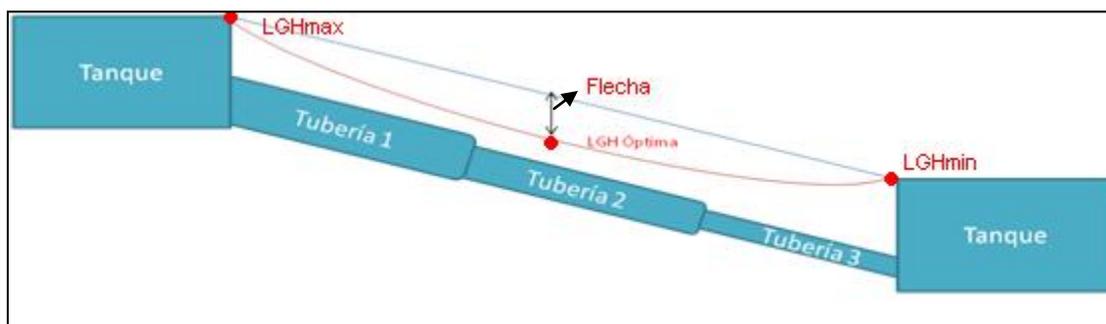


Figura 10. LGH objetivo, basada en tres puntos conocidos.

La Figura 10, muestra un esquema de los tres puntos requeridos para determinar la LGH objetivo cuando se va a diseñar un sistema de tuberías. A partir de esta figura, se puede establecer la ecuación propuesta por la metodología SOGH para determinar la línea de gradiente hidráulico.

$$LGH(x) = \alpha d^2 + \beta d + \gamma$$

Ecuación 2.32

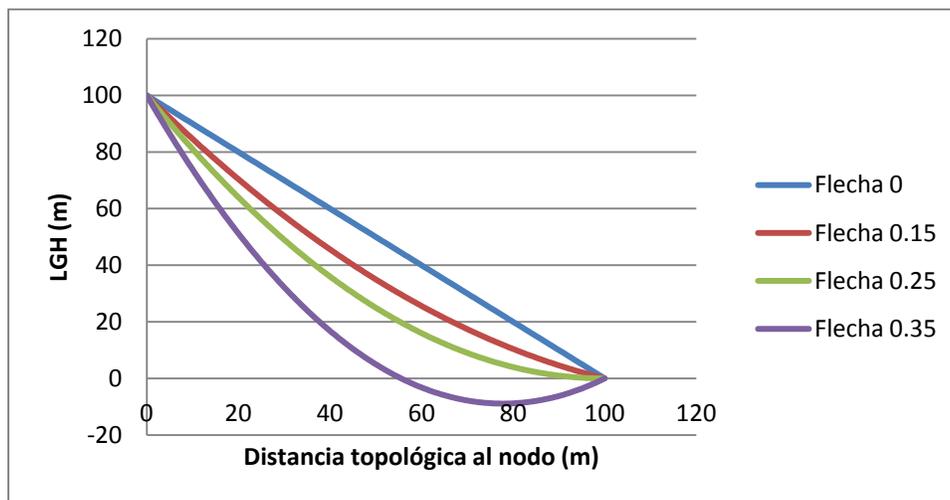
donde:

$$\alpha = 4F \frac{(LGH_{m\acute{a}x} - LGH_{m\acute{i}n})}{L_{total}^2}$$

$$\beta = - (1 + 4F) \frac{(LGH_{m\acute{a}x} - LGH_{m\acute{i}n})}{L_{total}}$$

$$\gamma = LGH_{m\acute{a}x}$$

Como puede observarse claramente, la línea de gradiente hidráulico en cada uno de los puntos del sistema de tuberías, depende de la flecha seleccionada (F) y de su distancia topológica al punto de alimentación del sistema. Teniendo en cuenta esta ecuación y la Figura 10, surgió la pregunta sobre cuál es el rango en que es físicamente válida la flecha de diseño. Para responder esta pregunta, se creó un sistema de tuberías en serie y se varió la flecha de diseño, observando los siguientes resultados.



Gráfica 3-1. LGH objetivo vs. Distancia topológica, para diferentes flechas de diseño.

Aunque se probaron diferentes flechas, la Gráfica 3-1 se concentra en solo 4 de estas. Los resultados que se obtuvieron de esta gráfica, muestran que a pesar de que Ochoa (2009) permitía variar el rango de la flecha entre -0.5 y 0.5, existen valores de flecha para los cuales esta pierde su sentido físico. Antes de entrar en detalle a analizar la Gráfica 3-1, vale la pena decir que un diseño



óptimo nunca va a corresponder a flechas entre -0.5 y 0; esto debido a que este tipo de flechas conlleva a un menor gasto de energía objetivo por tubería e implicarían mayores costos. De esta manera, el estudio se concentra en flechas entre 0 y 0.5. Dicho esto, y observando la Gráfica 3-1, resulta claro que para flechas como la de 0.35, existe un punto a partir del cual, el sistema estaría creando energía. Si se tiene en cuenta que para producir unas pérdidas objetivo de cero, en un tramo de tubería, se requeriría de un diámetro infinito, no tendría ningún sentido físico hablar de diseñar un sistema de tuberías en el cual se requiere la creación de energía a partir de cierto punto.

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, el siguiente paso consistió en determinar la flecha máxima de diseño. Esta flecha corresponde a aquella en la cual, en el último tramo de tubería, la curva de la LGH tenga una pendiente cero. Esto último quiere decir, que en esta curva se presentarán pérdidas objetivo en toda la trayectoria, excepto en el último punto del sistema. Para lograr esto, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

Partiendo de la ecuación planteada por Ochoa y Saldarriaga (2009):

$$LGH = \alpha \cdot (x^2) + \beta \cdot x + \gamma$$

Ecuación 2.32

donde

$$\alpha = 4 \cdot F \cdot \frac{(LGH_{max} - LGH_{min})}{L_{total}^2}$$

$$\beta = -(1 + 4F) \cdot \frac{(LGH_{max} - LGH_{min})}{L_{total}}$$

$$\gamma = LGH_{max}$$

Se obtiene la siguiente expresión para determinar la LGH objetivo en cada uno de los nudos que componen el sistema de tuberías.

$$LGH = 4 \cdot F \cdot \frac{(LGH_{max} - LGH_{min})}{L_{total}^2} \cdot (x^2) + -(1 + 4F) \cdot \frac{(LGH_{max} - LGH_{min})}{L_{total}} \cdot x + LGH_{max}$$

Si esta ecuación se deriva con respecto a x, donde x corresponde a la distancia topológica de cada nudo al punto de alimentación del sistema, se tiene:

$$\frac{dLGH}{dx} = 2 \cdot \alpha \cdot x - \beta$$

$$\frac{dLGH}{dx} = 8 \cdot F \cdot \frac{(LGH_{max} - LGH_{min})}{L_{total}^2} \cdot (x) + -(1 + 4F) \cdot \frac{(LGH_{max} - LGH_{min})}{L_{total}}$$

Si esta última ecuación, se iguala a cero y la variable x se reemplaza por la longitud total (L_{total}) del sistema, se obtiene una expresión para determinar el valor de la flecha (F) que implica tener unas pérdidas de energía iguales a cero en el último punto del sistema.

$$0 = 8 \cdot F \cdot \frac{(LGH_{max} - LGH_{min})}{L_{total}^2} \cdot (L_{total}) + -(1 + 4F) \cdot \frac{(LGH_{max} - LGH_{min})}{L_{total}}$$

$$0 = \frac{(LGH_{max} - LGH_{min})}{L_{total}} \cdot \left[8 \cdot F \cdot \frac{(L_{total})}{L_{total}} + -(1 + 4F) \right]$$

$$\left[8 \cdot F \cdot \frac{(L_{total})}{L_{total}} + -(1 + 4F) \right] = 0$$

$$[8 \cdot F - 1 - 4F] = 0$$

$$F(8 - 4) - 1 = 0$$

$$F = 0.25$$

Como se puede observar en este resultado, la flecha máxima teórica, corresponde a una flecha de 0.25. Con la flecha de 0.25, ocurrirá que en el último punto del sistema se requieran unas pérdidas objetivo de cero. Si se hace uso de flechas mayores a esta, se estaría pidiendo realizar un diseño en el cual se cree energía en ciertos puntos. Ahora bien, este resultado de una flecha máxima de 0.25 corresponde al caso en que la última tubería del sistema es de longitud infinitesimal, cosa que no sucede nunca. Por esta razón, resultaba de interés determinar cuál es la flecha máxima en los casos en que la última tubería del sistema tenga una longitud considerable. Esta pregunta fue respondida por Páez (2011) y su ecuación final para la flecha máxima es la que se muestra a continuación:

$$F = \frac{L_{Tot}}{4(L_{tot}-l_{fin})}$$

Ecuación 3.2

donde L_{Tot} es la longitud total del sistema, l_{fin} es la longitud de la última tubería y F es el es la flecha máxima.

3.2. Casos de estudio metodología SOGH.

Para poner a prueba la metodología SOGH en el diseño de sistemas de riego localizado de alta frecuencia, se tomaron tres casos de estudio, que han mostrado algunos resultados que se consideran importantes para entender la hidráulica resultante del diseño con SOGH. Las redes de análisis, son las que se muestran a continuación:

1. Red Asimétrica 1

El primer submódulo de análisis se presenta en la Figura 11. Este cuenta con una tubería múltiple, que alimenta 8 tuberías laterales; cada una de ellas con 25 nudos. Cada uno de los nudos corresponde a una planta a la que es necesario suministrarle agua. Para cada planta se requieren dos emisores, pero dado que en el programa REDES no es posible colocar dos emisores en el mismo punto, fue necesario modelar esto, multiplicando el coeficiente del emisor por 2.

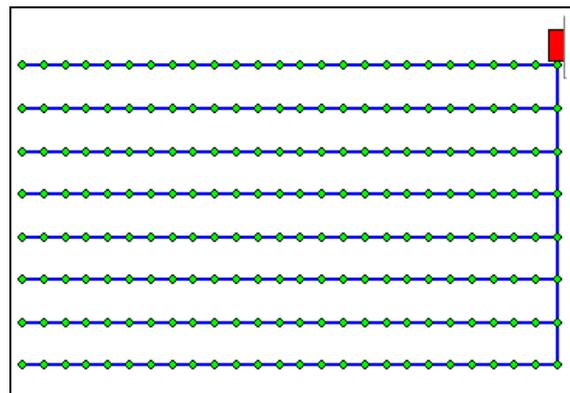


Figura 11. Red Asimétrica 1. Modelo de REDES.

Como todo submódulo de riego, éste se compone de un punto de entrada regulado donde la presión cambiará de acuerdo con las especificaciones del problema. Por su parte, la distancia entre los laterales es de 10 metros y la distancia entre cada planta es de 5 metros. De esta manera el submódulo se compone de 200 plantas (400 emisores) y 208 tuberías. La topografía de la red es totalmente plana.

2. Red Simétrica

El segundo submódulo de riego, consta del doble de laterales y emisores que el primer submódulo. Como puede observarse en la Figura 12, esta red es similar a la asimétrica 1 solo que el múltiple alimenta laterales por ambos lados. Este submódulo cuenta con 408 tuberías, 400 plantas (800 emisores) y un punto de entrada.

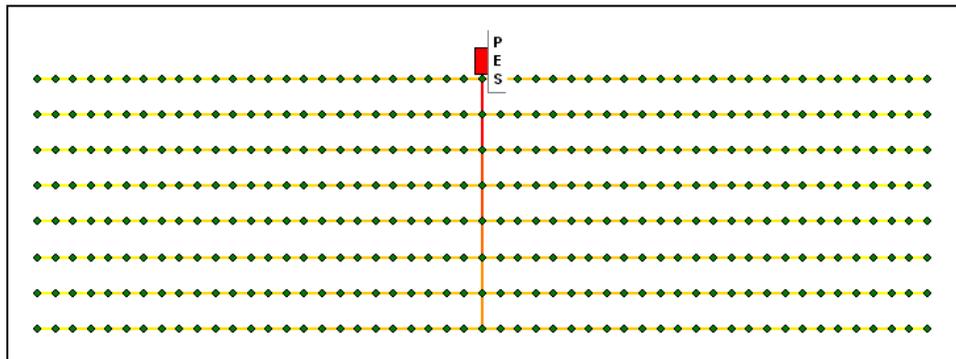


Figura 12. Red Simétrica. Modelo de REDES.

En este submódulo de análisis, la distancia entre laterales también es de 10 metros y la distancia entre las plantas es de 5 metros. Al igual que el primer submódulo de análisis, la topografía en esa red, también es plana.

3. Red Asimétrica 2

Esta última red presenta las mismas características de las anteriores (distancia entre laterales de 10 metros y distancia entre nudos de 5 metros), la principal diferencia es que la tubería múltiple, entrega agua a un mayor número de nudos al lado izquierdo, que al lado derecho. El submódulo consta de 312 tuberías y 304 plantas (608 emisores).

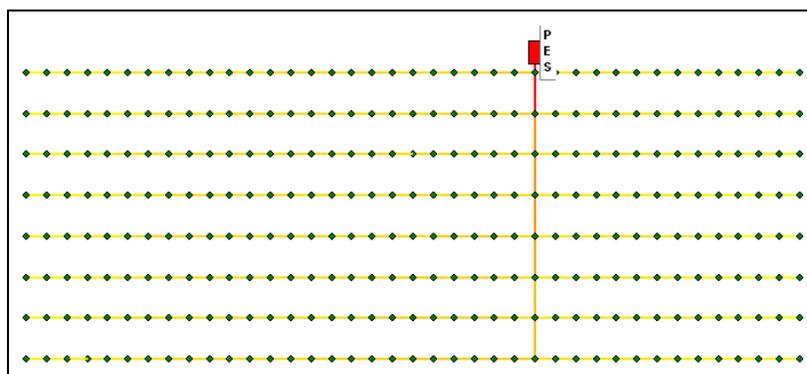


Figura 13. Red Asimétrica 2. Modelo de REDES.

Para estas tres redes se realizaron diseños variando el exponente del emisor. Para esto, primero se determinó la ecuación de costos de las tuberías disponibles, ofrecidas por PAVCO. Los diámetros de tubos ofrecidos por PAVCO para sistemas de riego se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5. Diámetros comerciales y su costo, ofrecidos por PAVCO.

Diámetro		Costo tramo de 6 m
(in)	(mm)	(COP)
0.5	12.7	9394
0.75	19.05	11637
1	25.4	16332
1.25	31.75	29418
1.5	38.1	38412
2	50.8	58902
2.5	63.5	95460
3	76.2	127452
4	101.6	217392
6	152.4	448128

A partir de esta lista de diámetros se pudo obtener la ecuación de costos mediante una regresión como la que se muestra a continuación, donde la curva azul representa los valores de costo correspondientes a los diámetros ofrecidos por PAVCO y la curva negra la línea de tendencia.

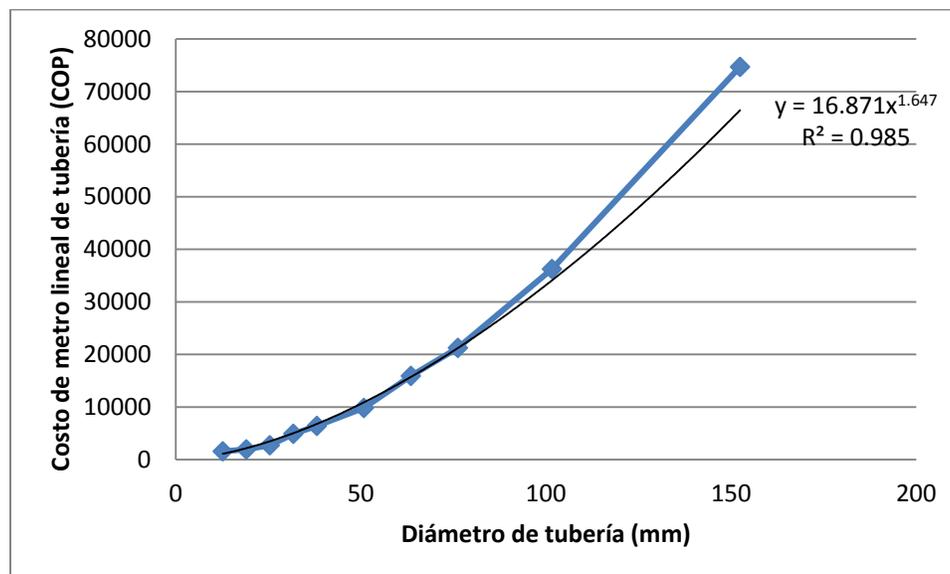


Figura 14. Curva Costo vs. Diámetro de tubería.

$$C = \sum_{i=1}^{NT} 16.871 * L_i * (D_i^{1.647})$$

Ecuación 3.3

La Ecuación 3.3, representa la curva final de costos. En esta ecuación se observa que cada una de las tuberías, presentará un costo igual a la longitud de la tubería, multiplicado por 16.871 y el diámetro que tenga el tubo elevado a un exponente de 1.647. Si se suman los costos de todas las tuberías, el resultado final será el costo de la red.

3.2.1. Diseño de los submódulos de riego.

Una vez se tiene la curva de costos y se ha definido la topología de cada uno de los submódulos de riego que se van a analizar, se procede a realizar los diseños. Como se mencionó anteriormente, para cada una de las redes, se realizaron varios diseños. Para cada red se varió el exponente del emisor buscando que el caudal medio requerido por emisor no variara. El caudal medio por emisor deseado, fue un caudal de 120 litros por hora (l/h) y adicional a esto se utilizó una presión media de 18 mca.

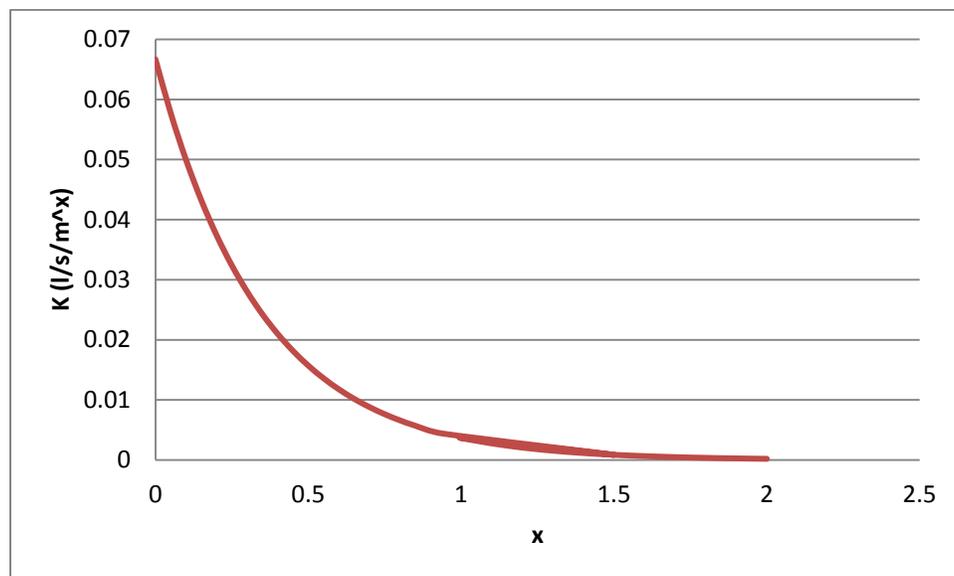


Figura 15. Curva exponente del emisor vs. Coeficiente, para un caudal de 120 l/h.

En la Figura 15 se observa el coeficiente del emisor que se debe utilizar si se varía el exponente del emisor. La curva mostrada corresponde a la relación exponente-coeficiente del emisor, que mantiene un caudal de 120 l/h y a su vez corresponde a una presión media de 18 mca. Como se mencionó en la Sección 2.1.1.1 lo deseable es que el exponente del emisor corresponda a emisores de régimen turbulento. Un emisor de exponente 1 corresponderá a un emisor de

régimen de flujo laminar. Teniendo en cuenta esto, los diseños para los tres submódulos de riego se concentraron en los exponentes de 0.3, 0.5 y 1.0. Para cada uno de estos exponentes corresponde el coeficiente del emisor mostrado en la siguiente tabla:

Tabla 6. Coeficiente del emisor para los exponentes de diseño.

Coeficiente	Coeficiente	Exponente
l/s/m	l/h/m	
0.014005448	50.420	0.3
0.007856742	28.284	0.5
0.001851852	6.667	1

El programa REDES no puede modelar dos emisores en un solo punto; por esta razón, para modelar dos emisores por nudo, es necesario multiplicar el coeficiente que se tiene por dos. Dicho esto y teniendo los diferentes emisores que se van a utilizar, se puede proceder a realizar los diseños. Para esto, el primer paso es el cálculo de la tolerancia de presiones y tolerancia de caudales. Los datos de entrada para los tres submódulos son los que se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Datos de entrada para el diseño de los submódulos de estudio.

Uniformidad del Riego		
Coeficiente de Uniformidad (CU)	0.8	
Coeficiente de Variación (CV)	0.04	
Número de Emisores por Planta (n_e)	2	Emisores
Temperatura	15	°C
Características del Emisor		
Caudal Promedio del Emisor (Q_m)	120	Litros/hora
Presión Media de Operación (H_m)	18	mca.

A partir de estos datos, se calcularon la tolerancia de caudales y de presiones como se muestra a continuación.

3.2.1.1. Cálculo tolerancia de caudales y presiones, exponente del emisor de 0.3.

Determinación del caudal de mínima presión:

$$CU = \left[1 - \frac{1.27 * CV}{\sqrt{n_e}} \right] \frac{Q_{mp}}{Q_m}$$

$$Q_{mp} = \frac{CU * Q_m}{1 - \frac{1.27 * CV}{\sqrt{n_e}}} = \frac{0.8 * 120}{1 - \frac{1.27 * 0.04}{\sqrt{2}}} = 99.5769 \text{ l/h}$$

Determinación de la presión mínima:

$$Q_{mp} = 50.420 * (h_{mp})^{0.3}$$

$$h_{mp} = \left(\frac{99.5769}{50.420} \right)^{1/0.3} = 9.6646 \text{ mca}$$

Determinación de la presión media:

$$Q_m = 50.420 * (h_m)^{0.3}$$

$$h_m = \left(\frac{Q_m}{50.420} \right)^{1/0.3} = \left(\frac{120}{50.420} \right)^{1/0.3} = 18 \text{ mca}$$

Cálculo de la tolerancia de presiones:

$$\Delta H = 2.5[h_m - h_{mp}] = 2.5[18 - 9.6646] = 20.838 \text{ mca}$$

$$h_{max} = 30.503 \text{ mca}$$

3.2.1.2. Cálculo tolerancia de caudales y presiones, exponente del emisor de 0.5.

Determinación del caudal de mínima presión:

$$CU = \left[1 - \frac{1.27 * CV}{\sqrt{n_e}} \right] \frac{Q_{mp}}{Q_m}$$

$$Q_{mp} = \frac{CU * Q_m}{1 - \frac{1.27 * CV}{\sqrt{n_e}}} = \frac{0.8 * 120}{1 - \frac{1.27 * 0.04}{\sqrt{2}}} = 99.5769 \text{ l/h}$$

Determinación de la presión mínima:

$$Q_{mp} = 28.284 * (h_{mp})^{0.5}$$

$$h_{mp} = \left(\frac{99.5769}{28.284} \right)^{1/0.5} = 12.394 \text{ mca}$$

Determinación de la presión media:

$$Q_m = 28.284 * (h_m)^{0.5}$$

$$h_m = \left(\frac{Q_m}{28.284} \right)^{1/0.5} = \left(\frac{120}{28.284} \right)^{1/0.5} = 18 \text{ mca}$$

Cálculo de la tolerancia de presiones:

$$\Delta H = 2.5[h_m - h_{mp}] = 2.5[18 - 12.3945] = 14.0138 \text{ mca}$$

$$h_{max} = 26.408 \text{ mca}$$

3.2.1.3. Cálculo tolerancia de caudales y presiones, exponente del emisor de 1.0.

Determinación del caudal de mínima presión:

$$CU = \left[1 - \frac{1.27 * CV}{\sqrt{n_e}} \right] \frac{Q_{mp}}{Q_m}$$

$$Q_{mp} = \frac{CU * Q_m}{1 - \frac{1.27 * CV}{\sqrt{n_e}}} = \frac{0.8 * 120}{1 - \frac{1.27 * 0.04}{\sqrt{2}}} = 99.5769 \text{ l/h}$$

Determinación de la presión mínima:

$$Q_{mp} = 6.667 * (h_{mp})^1$$

$$h_{mp} = \left(\frac{99.5769}{6.667}\right)^{1/1} = 14.9358 \text{ mca}$$

Determinación de la presión media:

$$Q_m = 6.667 * (h_m)^1$$

$$h_m = \left(\frac{Q_m}{6.667}\right)^{1/1} = \left(\frac{120}{6.667}\right)^{1/1} = 18 \text{ mca}$$

Cálculo de la tolerancia de presiones:

$$\Delta H = 2.5[h_m - h_{mp}] = 2.5[18 - 14.9358] = 7.660 \text{ mca}$$

$$h_{max} = 22.5963 \text{ mca}$$

A partir de los resultados de tolerancia de caudales y presiones para cada uno de los emisores, se puede observar que a medida que aumenta el exponente del emisor, el diseño se vuelve más exigente. Esto quiere decir, que entre un diseño con exponente de 0.3 y un diseño con exponente del emisor de 1.0, el diseño de 1.0 presentará un mayor costo debido a que la tolerancia de presiones es menor. Al tenerse una tolerancia de presiones menor, el sistema cuenta con menor energía disponible para gastar y por esta razón, los diámetros de las tuberías tienen que ser mayores con el objetivo de reducir la velocidad del flujo y reducir las pérdidas por fricción.

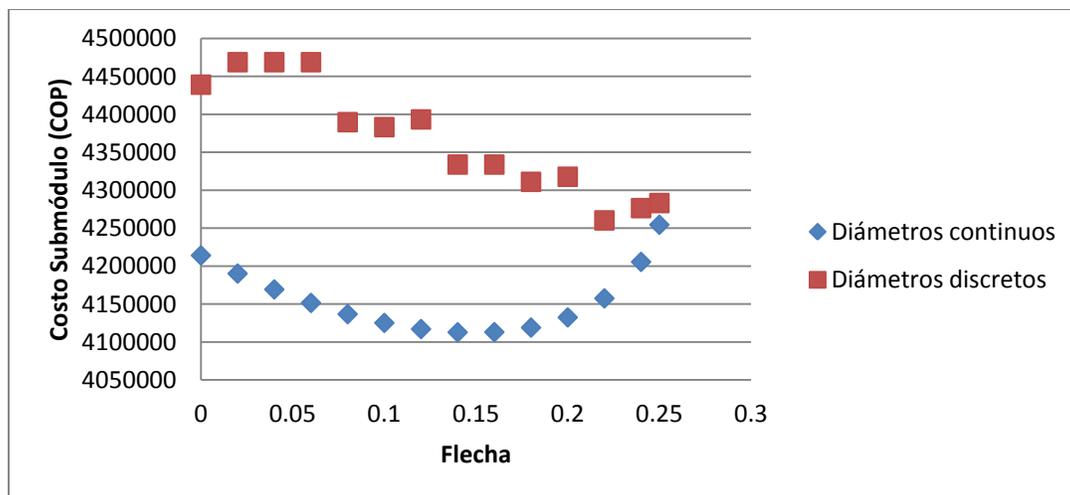
Al tener la tolerancia de presiones, presión máxima (correspondiente a la presión de entrada al submódulo) y la presión mínima, se puede proceder a hacer uso del programa REDES y la metodología SOGH para realizar los diseños finales de los tres casos de estudio.

3.2.2. Resultados diseños.

Una vez se ingresaron en el programa REDES cada uno de los submódulos de estudio, se procedió a diseñar cada uno de ellos variando el exponente del emisor como se mencionó anteriormente. Para cada grupo submódulo-exponente del emisor, se realizaron diferentes diseños, variando la flecha de diseño. Las flechas que se probaron correspondían a números entre 0 (LGH completamente recta) y 0.25; utilizando intervalos de 0.02 para probar un alto número de flechas de diseño.

3.2.2.1. Resultados Red Asimétrica 1.

Como se mostró en la Figura 11, este submódulo cuenta con 8 laterales, que se componen cada uno de ellos de 25 puntos de alimentación a plantas (cada punto con 2 emisores de riego). Habiendo establecido la tolerancia de presiones y caudales, se realizaron los diseños para diámetros continuos y discretos, con criterio de aproximación al diámetro comercial más cercano. Los resultados obtenidos se presentan en las siguientes gráficas.



Gráfica 3-2. Costos vs. Flecha, Red Asimétrica 1. Emisores con exponente 0.3.

En la Gráfica 3-2 se observa el costo del submódulo de riego, para diferentes flechas. Este caso corresponde a la Red Asimétrica 1 usando emisores con exponente 0.3. Como se puede observar en la gráfica, al realizar el diseño con diámetros continuos, existe un patrón. Es claro que la flecha de mínimo costo es la flecha de 0.14 y que las flechas de máximo costo son las flechas 0 y de 0.25. Por otro lado, se observa que al discretizar los diámetros este comportamiento Costo-Flecha se ve totalmente afectado y no existe un patrón claro. Para analizar estos resultados y el

comportamiento de la curva para diámetros continuos, se muestran a continuación los resultados de las presiones en los nudos de la red. Los resultados que se mostrarán corresponden únicamente a las flechas 0, 0.14 y 0.25. Para hacer esto de forma clara, se van a definir 8 rutas que puede tomar el agua; cada una de ellas correspondiente a cada lateral (Ver Figura 16).

En la Figura 16 se puede ver que existen ocho rutas posibles que puede tomar el agua, cada una de ellas correspondiente a cada lateral. Como puede observarse en la figura, la ruta 8 corresponde a la ruta crítica. La ruta crítica se define como la ruta 8, debido a que es el camino más largo que debe tomar el agua (distancia topológica máxima).

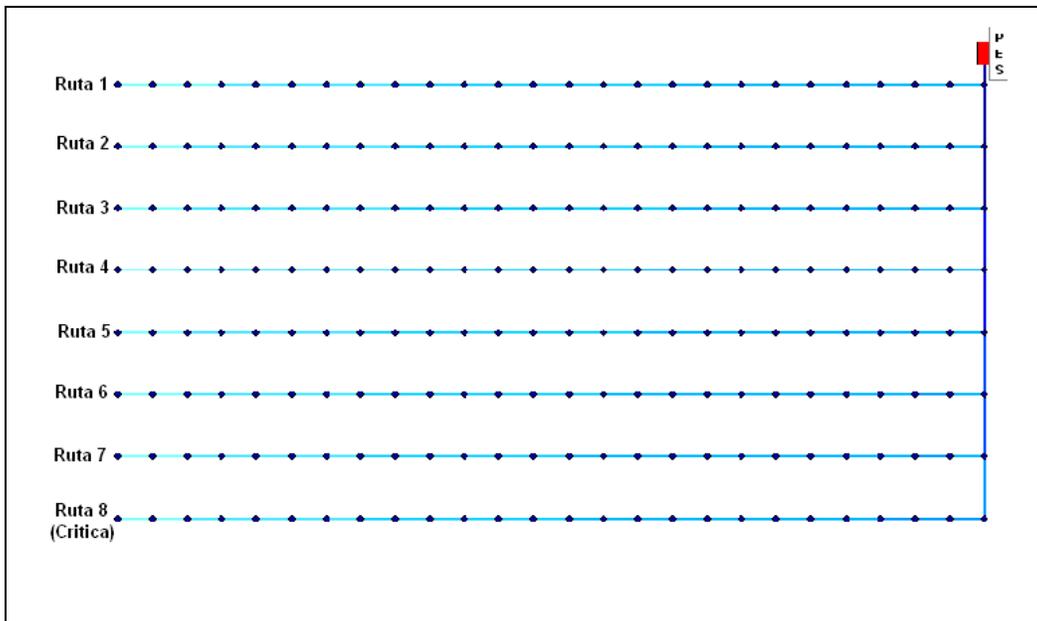
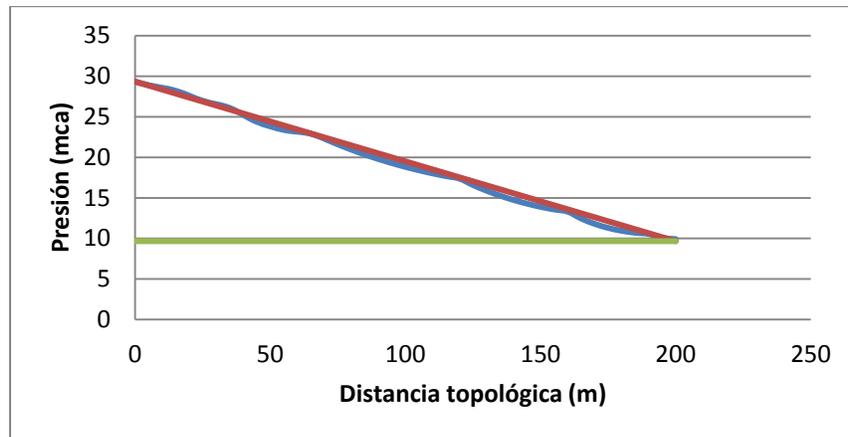


Figura 16. Rutas posibles para la Red Asimétrica 1.

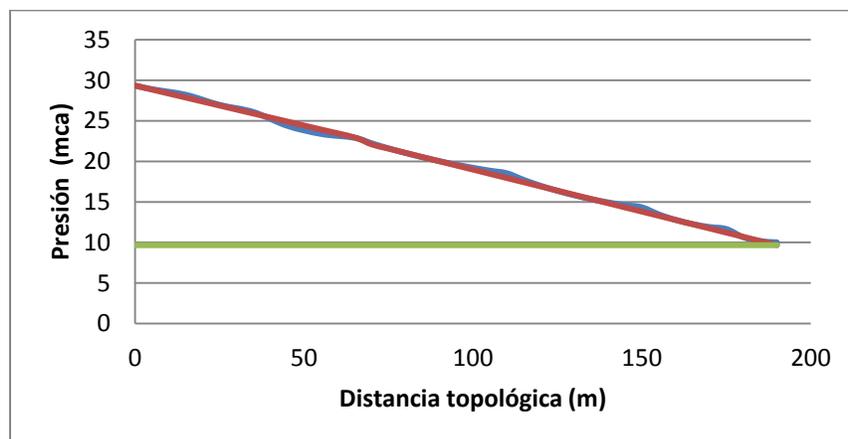
Una vez se han definido las rutas, a continuación se presentan las presiones en cada uno de los puntos de cada ruta, para diámetros discretos y continuos. En cada gráfica se mantienen las siguientes convenciones:

	Presión Diámetros Continuos
	Presión Diámetros Discretos
	Presión Mínima

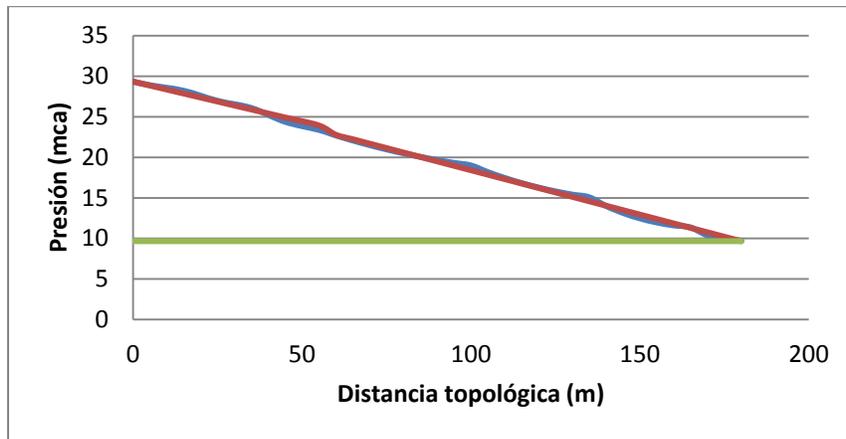


Gráfica 3-3. Presión en los nudos correspondientes a la ruta crítica (Ruta 8), Flecha 0.

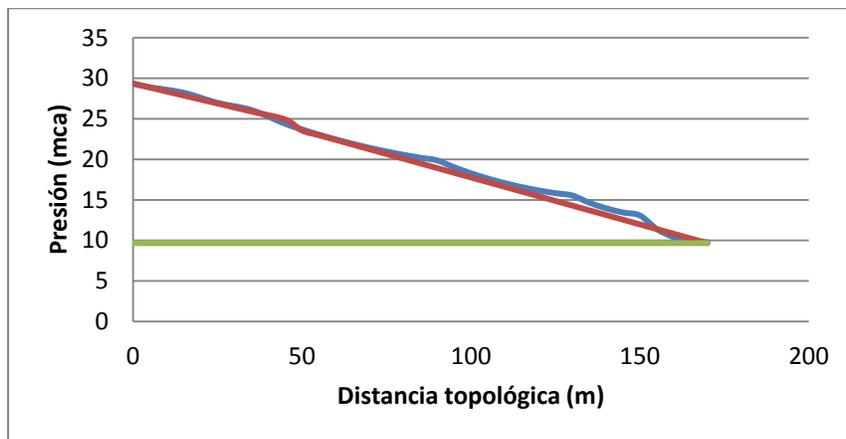
En la Gráfica 3-3, se observa la presión en cada uno de los nudos que corresponden a la ruta crítica, al haber diseñado con una flecha de 0. La gráfica muestra los resultados para diámetros continuos (correspondientes a la LGH objetivo), diámetros discretos y la presión mínima (calculada en la tolerancia de presiones). Como puede observarse la línea correspondiente a la presión en diámetros continuos es una línea recta perfecta. Esta línea se traza desde su punto inicial en la abscisa 0 (correspondiente a la entrada al submódulo), donde la presión es la presión máxima; hasta llegar al punto más alejado topológicamente, donde la presión deseada es la presión mínima. La pregunta que surge es cómo se ve la línea de presiones para las otras rutas. A continuación se presentan las líneas de presiones correspondientes a las otras rutas posibles:



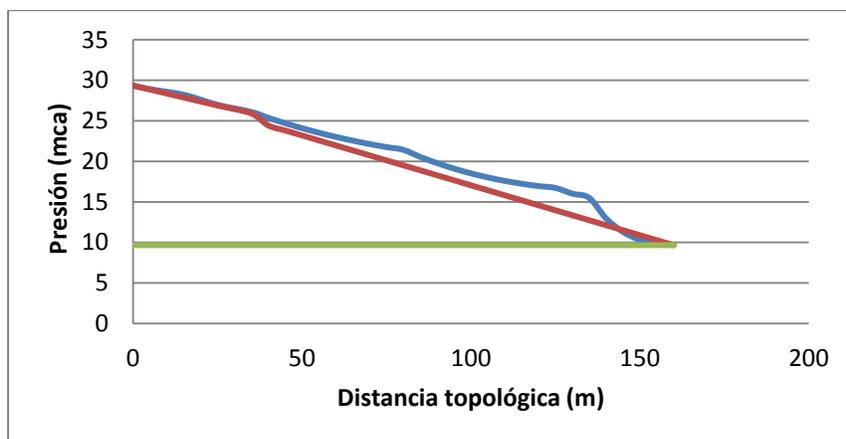
Gráfica 3-4. Presión en los nudos correspondientes a la Ruta 7, Flecha 0.



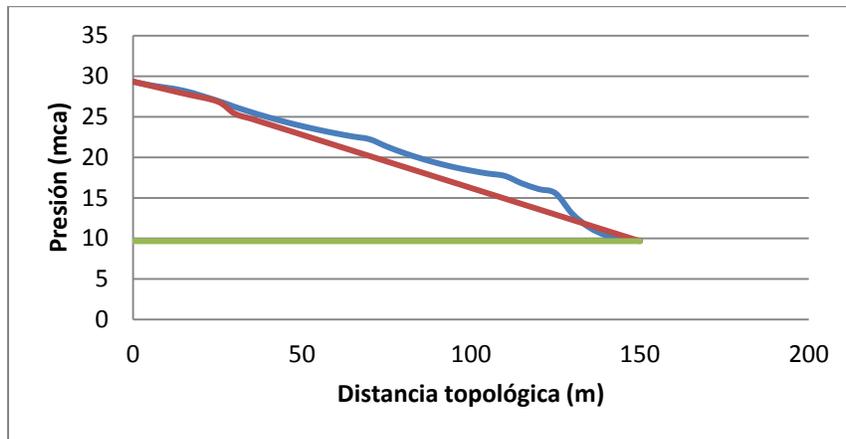
Gráfica 3-5. Presión en los nudos correspondientes a la Ruta 6, Flecha 0.



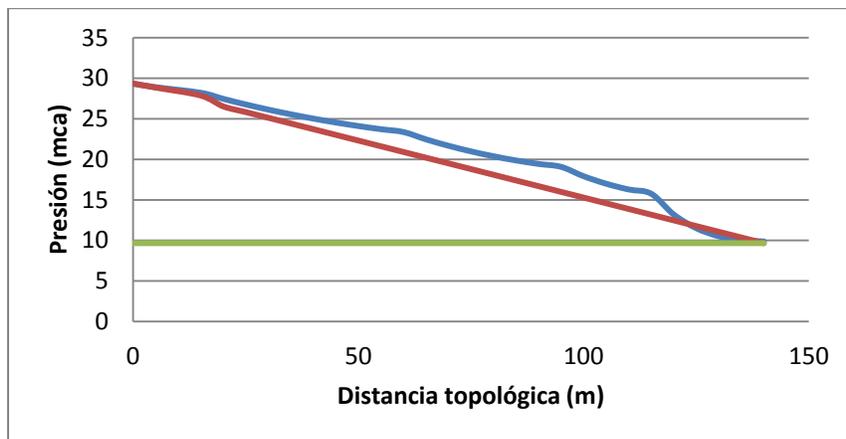
Gráfica 3-6. Presión en los nudos correspondientes a la Ruta 5, Flecha 0.



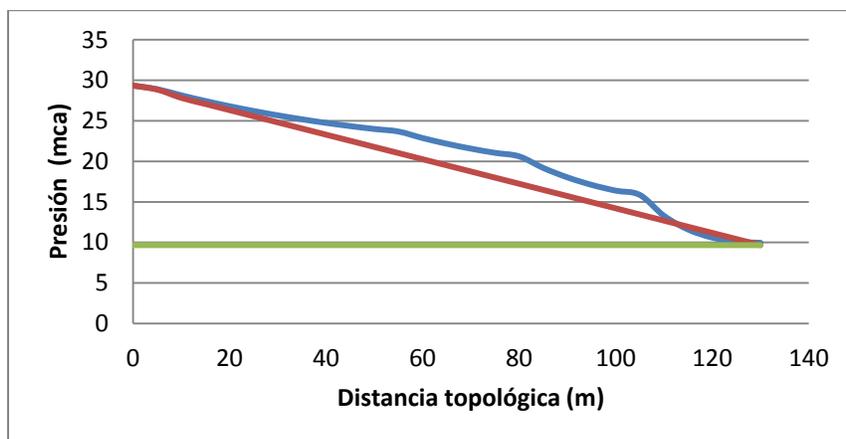
Gráfica 3-7. Presión en los nudos correspondientes a la Ruta 4, Flecha 0.



Gráfica 3-8. Presión en los nudos correspondientes a la Ruta 3, Flecha 0.

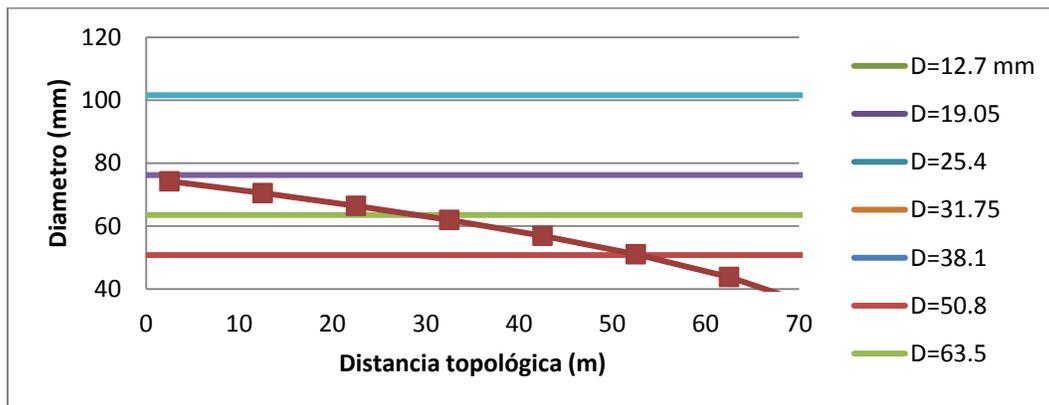


Gráfica 3-9. Presión en los nudos correspondientes a la Ruta 2, Flecha 0.



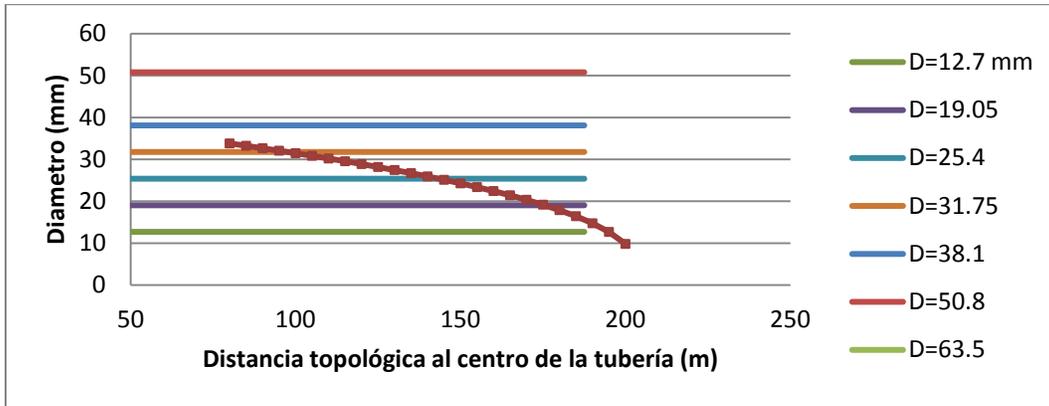
Gráfica 3-10. Presión en los nudos correspondientes a la Ruta 1, Flecha 0.

Las gráficas comprendidas entre la Gráfica 3-4 y la Gráfica 3-10 corresponden a las líneas de presión de cada una de las rutas. Sobre estas gráficas hay que anotar, que a medida que el lateral está más cerca del punto de entrada al submódulo, la deformación de la LGH objetivo es mayor cuando se hace el redondeo. Adicionalmente se observa que a partir de la ruta 7 hasta la ruta 1, la línea de presiones en los nudos se compone de dos líneas rectas. La primera de ellas corresponde a los nudos ubicados sobre la tubería múltiple y la segunda línea recta corresponde al lateral. Si se observa, por ejemplo la ruta 6, se observará que en una distancia topológica de 45 metros del punto de entrada, existe un salto en la línea de presiones. Este salto ocurre porque la tubería múltiple presenta unas presiones que permiten llevar el agua hasta el punto más distante del lateral más lejano; de esta manera, la presión que tiene la tubería múltiple a una distancia de 45 metros del punto de entrada, son más que suficientes para poder llevar el agua al punto más alejado del lateral 6 (en este caso). Si se analizan los diámetros continuos de diseño, en cada una de las rutas se observa el siguiente comportamiento que explicaría lo que hace la metodología SOGH. De esta manera, se grafica la distancia topológica al centro de cada una de las tuberías vs el diámetro correspondiente. Para la tubería múltiple se obtiene el siguiente resultado:

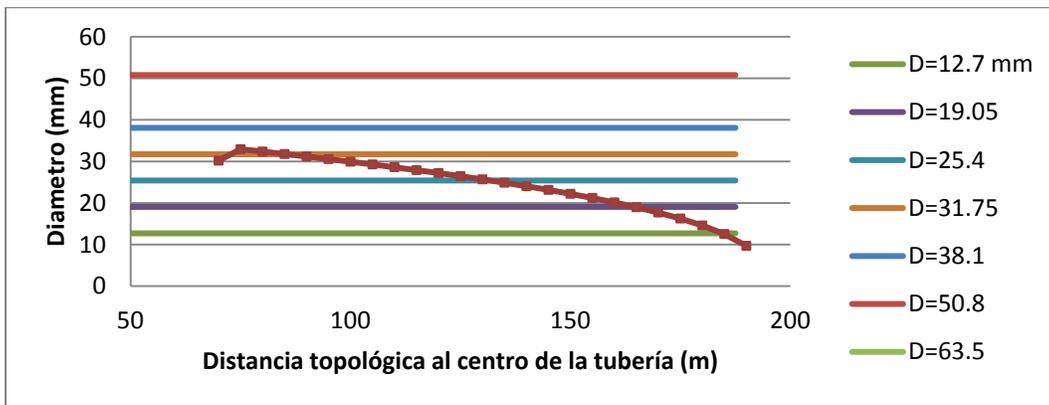


Gráfica 3-11. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Tubería múltiple, Flecha 0.

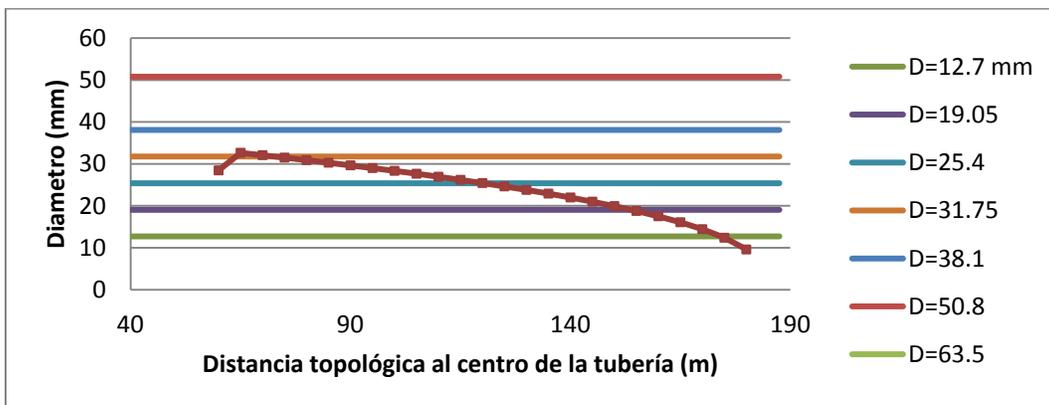
En la Gráfica 3-11, se observan una serie de líneas horizontales, correspondientes a los diámetros discretos ofrecidos por PAVCO; adicional a esto, se observa que existe una relación cuadrática entre el diámetro de cada una de las tuberías y la distancia topológica del centro del tubo al punto de entrada al submódulo. Esta misma gráfica se puede hacer para cada uno de los laterales de riego, tal como se observa a continuación:



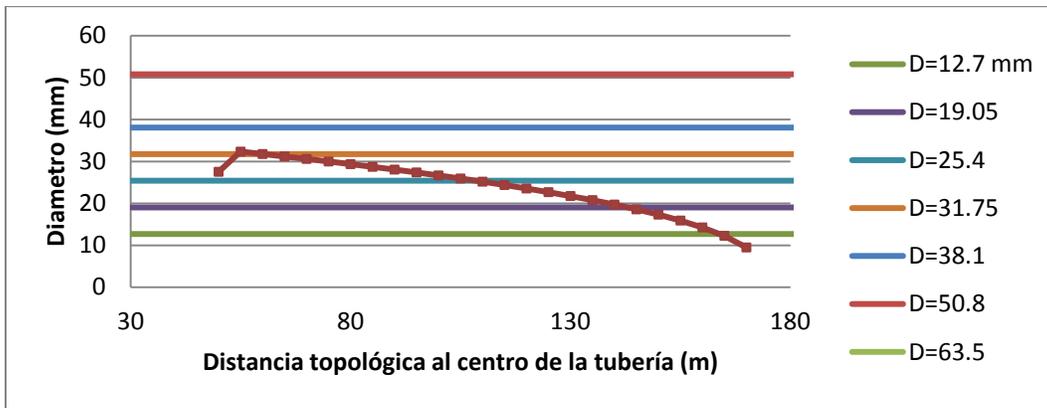
Gráfica 3-12. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Lateral ruta 8 (crítica), Flecha 0.



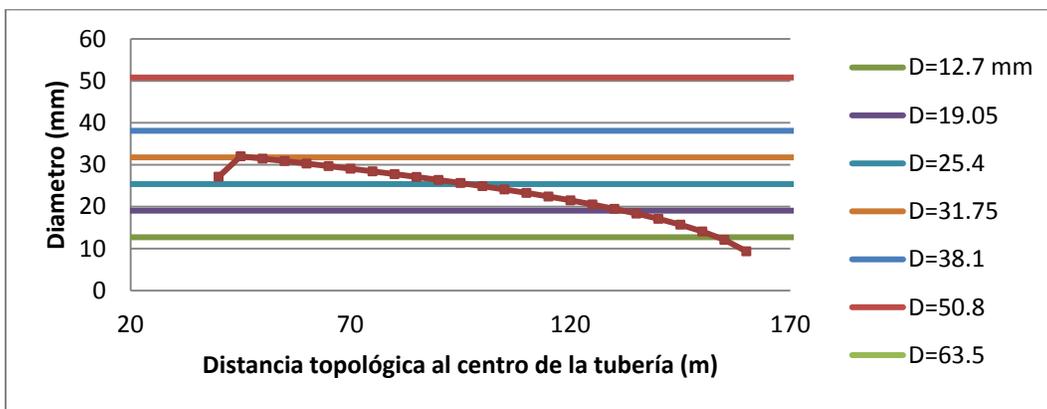
Gráfica 3-13. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Lateral ruta 7, Flecha 0.



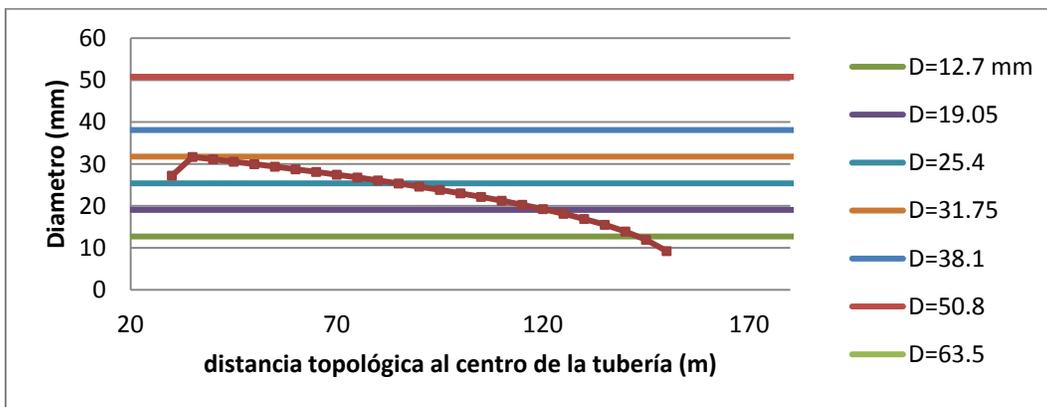
Gráfica 3-14. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Lateral ruta 6, Flecha 0.



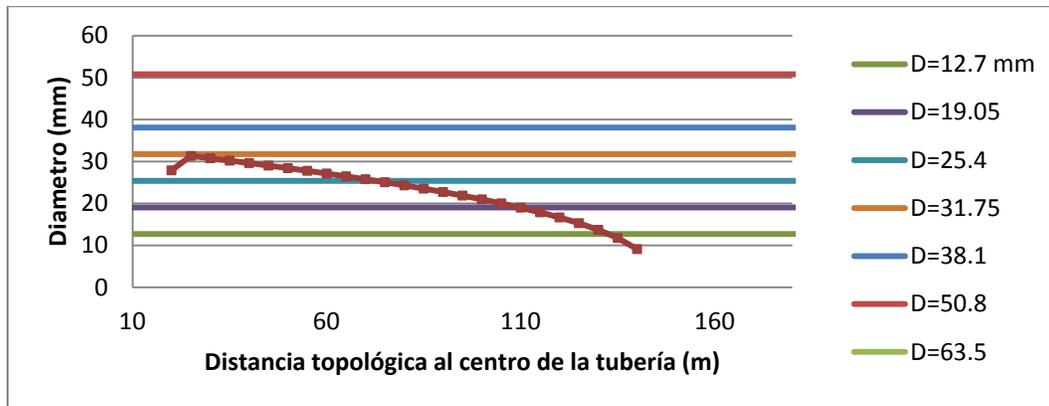
Gráfica 3-15. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Lateral ruta 5, Flecha 0.



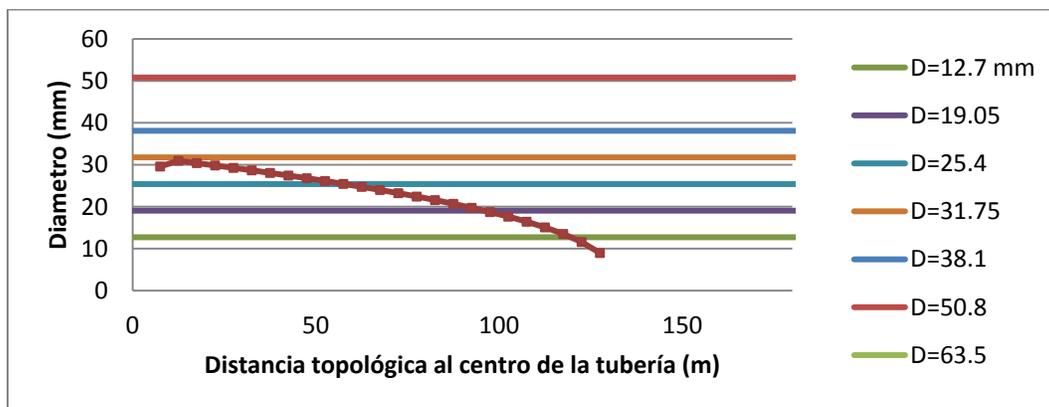
Gráfica 3-16. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Lateral ruta 4, Flecha 0.



Gráfica 3-17. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Lateral ruta 3, Flecha 0.



Gráfica 3-18. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Lateral ruta 2, Flecha 0.



Gráfica 3-19. Curva Distancia topológica al centro de la tubería vs. Diámetro continuo de la tubería, Lateral ruta 1, Flecha 0.

Como puede observarse en las gráficas comprendidas entre la Gráfica 3-12 y la Gráfica 3-19, todos los laterales de riego también presentan una relación cuadrática entre la distancia topológica al centro de cada tubería y su diámetro. A partir de estas gráficas es posible explicar el salto que se presenta en las líneas de presión presentadas anteriormente para cada una de las rutas. Si se observa, por ejemplo la Gráfica 3-19 se observará que la curva se comporta como una cuadrática, excepto por el primer punto. Este primer punto corresponde al diámetro de la primera tubería que comprende el lateral. Si se observan todas las gráficas de diámetros de laterales, se aprecia que este primer punto se presenta en todas ellas, menos en la correspondiente al lateral de la ruta crítica.

La razón para que se presente el comportamiento descrito en el párrafo anterior, es que, como ya se mencionó, para todos los laterales excepto el lateral crítico, antes de que el agua entre al lateral, ésta presenta una energía más que suficiente para llevar el agua al punto final del lateral.



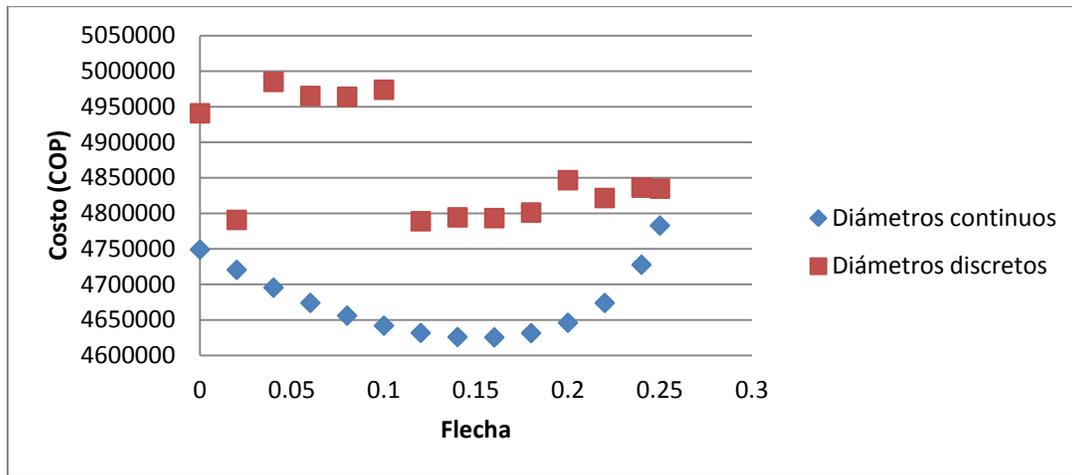
Lo anterior implica que la metodología SOGH reduzca drásticamente el diámetro de la tubería inicial del lateral buscando que la presión en el último punto sea la mínima. Por esta razón se tiene que en diámetros continuos, la primera tubería de los laterales 1 al 7 tenga un diámetro inferior al del segundo tubo. Si se observa la Gráfica 3-12 (correspondiente a la ruta crítica), en esta no se presenta la reducción del diámetro del primer tubo. Esto se debe a que el lateral 8 es el crítico.

Este comportamiento presentado para la flecha 0 sucede en todas las flechas. Esto quiere decir, que en todas las líneas de presión para todas las flechas que se probaron, se presenta una relación cuadrática entre los diámetros de las tuberías y la distancia topológica al centro de las tuberías. Adicionalmente, en todas las flechas ocurre el salto que se mostró para las diferentes rutas entre la 1 y la 7. También vale la pena decir que este comportamiento se mantiene inclusive para diferentes exponentes de emisor.

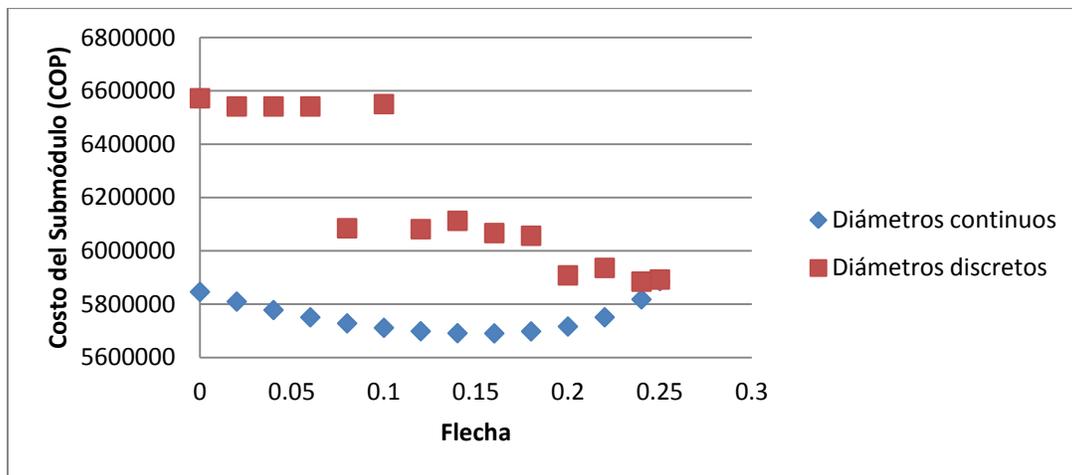
Sobre lo anterior se puede decir que sí existe una curva cuadrática que relaciona el diámetro de las tuberías con su distancia topológica, y adicionalmente se tienen unas ecuaciones lineales que definen los diámetros comerciales suministrados por PAVCO, es posible que exista una manera de hacer uso de estos resultados para realizar un proceso de redondeo que mantenga un comportamiento como el que se presenta para la curva Costo-Flecha mostrado para diámetros continuos.

Ahora bien, una vez se inicia el análisis de cómo se comportan las líneas de presión en los nudos y la relación de los diámetros por tuberías en cada una de las rutas, vale la pena observar qué sucede con el coeficiente de uniformidad en cada uno de los diseños y qué sucede con la curva Costo-Flecha para los diferentes exponentes de emisor y para los otros casos de estudio.

En este punto vale la pena retomar la Gráfica 3-2, y recordar que para un exponente de los emisores de 0.3 en la Red Asimétrica 1, se tenía que la flecha de diseño de mínimo costo (para diámetros continuos) era la flecha de 0.14. Tal como se observará en las siguientes gráficas, esta flecha se mantiene para el caso de emisores con exponente 0.5 y 1.0.

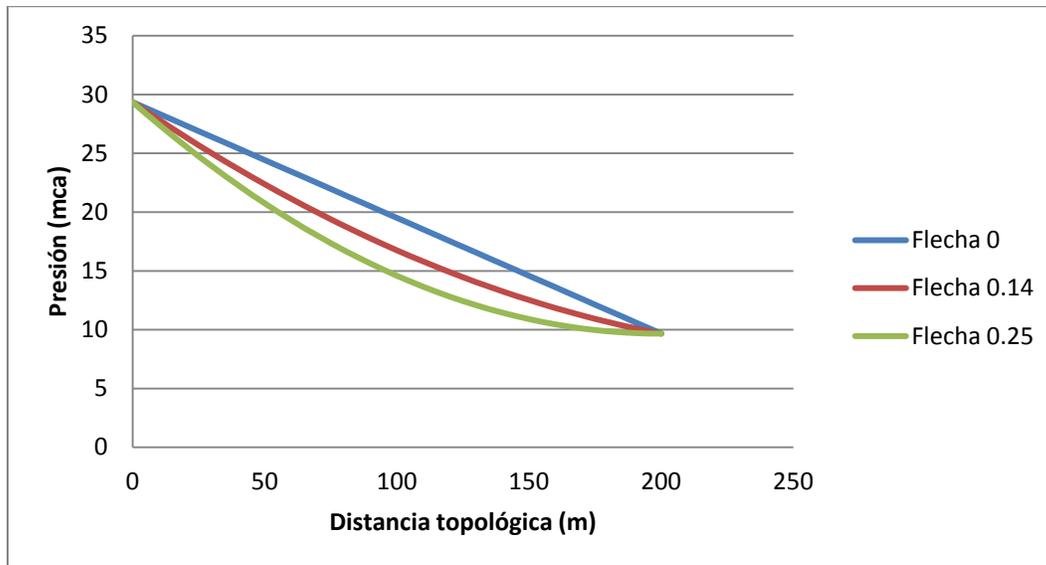


Gráfica 3-20. Costos vs. Flecha, Red Asimétrica 1. Emisores con exponente 0.5.



Gráfica 3-21. Costos vs. Flecha, Red Asimétrica 1. Emisores con exponente 1.0.

Como se observa en la Gráfica 3-20 y la Gráfica 3-21, la flecha de mínimo costo correspondiente para éste submódulo, independientemente del exponente de los emisores, es una flecha de 0.14. Este resultado aunque no resulta claro si permite plantear la hipótesis de que la flecha de mínimo costo corresponderá a una flecha intermedia. Para entender, el por qué de esta hipótesis, se debe observar la siguiente gráfica:



Gráfica 3-22. Línea de presiones para diferentes flechas, Flecha 0, 0.14, 0.25.

En la gráfica anterior se puede ver que la pendiente de la línea de presiones no es igual para ninguna de las flechas. Se puede observar, que la flecha 0 mantiene una pendiente constante y que las líneas de presión de las flechas 0.14 y 0.25 tienen una pendiente variable a lo largo de la curva. De esta manera, la pregunta que surge es cómo se comportan las pendientes de fricción objetivo. Estas son las que determinarán el diámetro final de las tuberías.

Si se tiene una alta pendiente en la línea de presiones, esto implicará que el sistema está en capacidad de gastar mayor energía y por lo tanto puede hacer uso de diámetros menores. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó el siguiente procedimiento para observar cómo se comportan las pendientes de las líneas de presión a lo largo de la ruta crítica, en el que se hizo uso de la derivada de la ecuación de la LGH objetivo para cada una de las flechas que se están analizando (Flechas 0, 0.14 y 0.25).

Para el caso de la flecha 0 se parte de:

$$\frac{dLGH}{dx}_{Flecha\ 0} = 8 \cdot F \cdot \frac{(LGH_{max} - LGH_{min})}{L_{total}^2} \cdot (x) + -(1 + 4F) \cdot \frac{(LGH_{max} - LGH_{min})}{L_{total}}$$

$$\frac{dLGH}{dx}_{Flecha\ 0} = 8 \cdot 0 \cdot k1 \cdot (x) + -(1 + 4(0)) \cdot k2$$

$$\frac{dLGH}{dx}_{\text{Flecha } 0} = 0 - 1 \cdot 0.098395$$

$$\frac{dLGH}{dx}_{\text{Flecha } 0} = -0.098395$$

Obteniendo, que para el caso de la Red Asimétrica 1 con emisores de exponente 0.3, la pendiente de la línea de presiones es de 0.098395. Esto quiere decir que para la flecha de 0, se está teniendo como objetivo, una pérdida de energía de 9.83 centímetros por cada metro que se recorre en la ruta crítica. Este mismo procedimiento se puede realizar para las flechas de 0.14 y 0.25, tal como se muestra a continuación. Para la flecha de 0.14 se tiene:

$$\frac{dLGH}{dx}_{\text{Flecha } 0.14} = 8 \cdot F \cdot \frac{(LGH_{max} - LGH_{min})}{L_{total}^2} \cdot (x) + -(1 + 4F) \cdot \frac{(LGH_{max} - LGH_{min})}{L_{total}}$$

$$\frac{dLGH}{dx}_{\text{Flecha } 0.14} = 8 \cdot 0.14 \cdot k1 \cdot (x) - (1 + 4(0.14)) \cdot k2$$

$$\frac{dLGH}{dx}_{\text{Flecha } 0.14} = 8 \cdot 0.14 \cdot 0.000492 \cdot (x) - (1 + 4(0.14)) \cdot 0.098395$$

$$\frac{dLGH}{dx}_{\text{Flecha } 0.14} = 0.000551 \cdot (x) - 0.153496$$

Y para la flecha de 0.25:

$$\frac{dLGH}{dx} = 8 \cdot F \cdot \frac{(LGH_{max} - LGH_{min})}{L_{total}^2} \cdot (x) + -(1 + 4F) \cdot \frac{(LGH_{max} - LGH_{min})}{L_{total}}$$

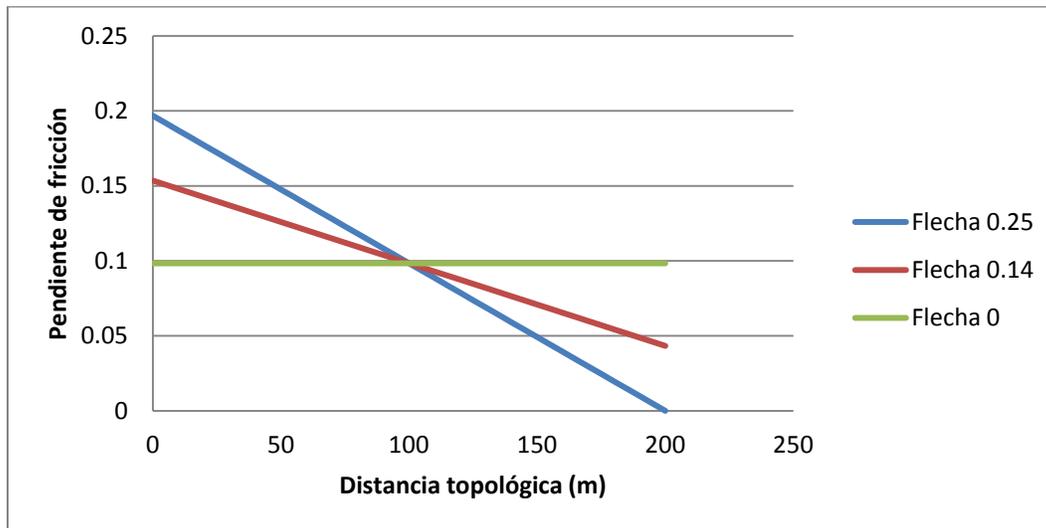
$$\frac{dLGH}{dx}_{\text{Flecha } 0.25} = 8 \cdot F \cdot k1 \cdot (x) + -(1 + 4F) \cdot k2$$

$$\frac{dLGH}{dx}_{\text{Flecha } 0.25} = 8 \cdot 0.25 \cdot 0.000492 \cdot (x) + -(1 + 4(0.25)) \cdot 0.098395$$

$$\frac{dLGH}{dx}_{\text{Flecha } 0.25} = 0.000984 \cdot (x) - 0.19679$$

Como se puede observar en los anteriores procedimientos, y como es de esperarse, la pendiente de la línea de presiones (igual a la pendiente de la LGH objetivo para el caso de topografías

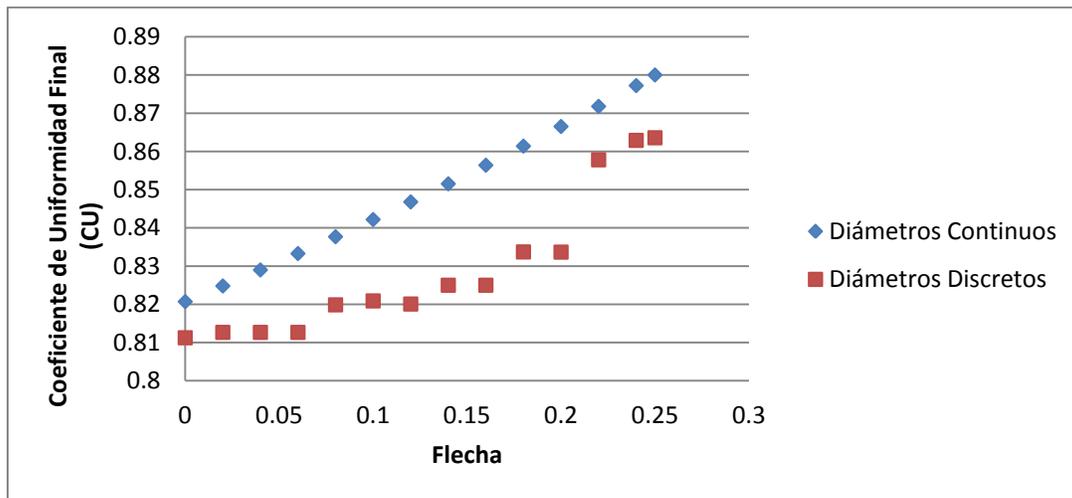
planas), corresponde a una ecuación lineal para los casos de las flechas de 0.14 y 0.25. Si se realiza la gráfica de cada una de las ecuaciones obtenidas para estas tres flechas de análisis, se observan los siguientes resultados:



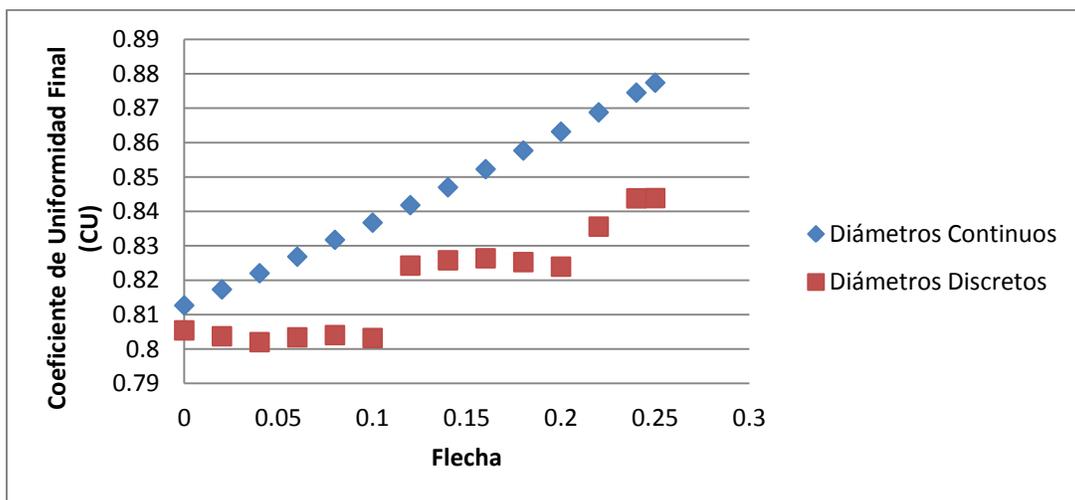
Gráfica 3-23. Pendiente de fricción vs distancia topológica, Red Asimétrica 1, exponente del emisor 0.3.

Los resultados presentados en la Gráfica 3-23 resultan claves para entender el comportamiento de la curva Costo-Flecha. La hipótesis planteada anteriormente hacía referencia a que las redes de mínimo costo corresponderán a las flechas intermedias. Lo que se puede deducir de la Gráfica 3-23, es que a medida que la flecha de diseño crece, los diámetros de las tuberías iniciales irán reduciéndose; contrario a esto, las tuberías finales irán aumentando su diámetro. Si se comparan las tres pendientes de fricción de las tres flechas, se observa que entre la abscisa 0 y la abscisa 100, la flecha de 0.25 tiene una mayor pendiente de fricción y por lo tanto conllevará a diámetros menores que las flechas 0 y 0.14. Por el contrario, entre la abscisa 100 y la abscisa 200, la flecha de 0.25 pasa a ser la que tiene una menor pendiente de fricción y por lo tanto será la que lleve a tener mayores diámetros en las tuberías ubicadas entre estas dos últimas abscisas. En la gráfica puede verse que la flecha intermedia (la de 0.14) siempre se encuentra en un punto medio; esto quiere decir que, a diferencia de las flechas de 0 y 0.25, esta flecha no representa los mayores costos en ninguno de los tramos de la ruta crítica. De esta manera, queda demostrado que aunque una flecha extrema como la de 0 o la 0.25 conlleven a tener diámetros menores en ciertos puntos del sistema, solo una flecha intermedia es capaz de llevar a tener los costos globales del sistema en un mínimo. Es posible que la flecha intermedia no sea exactamente el promedio entre la flecha 0 y 0.25, pero sí es claro que se encuentra en un rango intermedio entre estos dos valores.

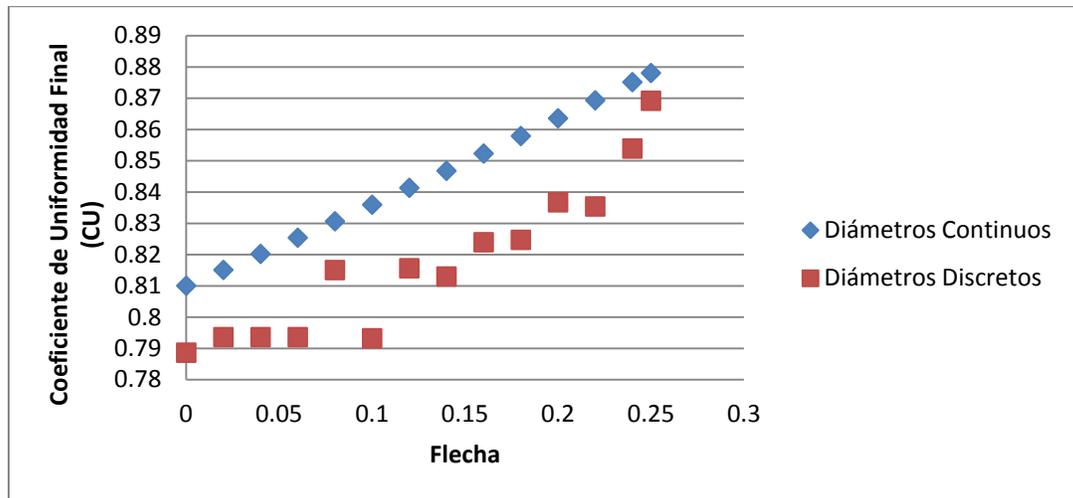
Por último y para concluir el análisis y obtención de resultados de la Red Asimétrica 1, se puede decir que todos los diseños condujeron a un coeficiente de uniformidad superior al establecido por el diseño agronómico. En las siguientes figuras se observan los resultados para el coeficiente de uniformidad final de la Red Asimétrica 1, variando el exponente del emisor. En las figuras se puede observar el coeficiente de uniformidad resultante después de realizar los diseños variando las flechas y usando diámetros continuos y discretos.



Gráfica 3-24. Flecha vs. Coeficiente de uniformidad resultante. Red Asimétrica 1, exponente del emisor 0.3.



Gráfica 3-25. Flecha vs. Coeficiente de uniformidad resultante. Red Asimétrica 1, exponente del emisor 0.5.



Gráfica 3-26. Flecha vs. Coeficiente de uniformidad resultante. Red Asimétrica 1, exponente del emisor 1.0.

Respecto a los resultados correspondientes al coeficiente de uniformidad final, se puede observar que en diámetros continuos, todos los diseños para los diferentes exponentes de emisor, cumplen con el coeficiente de uniformidad del diseño agronómico. Por otro lado, de los 84 diseños presentados en las gráficas de coeficiente de uniformidad, solo 5 de ellos no cumplen con éste. Corresponden a los diseños con emisores de exponente 1.0.

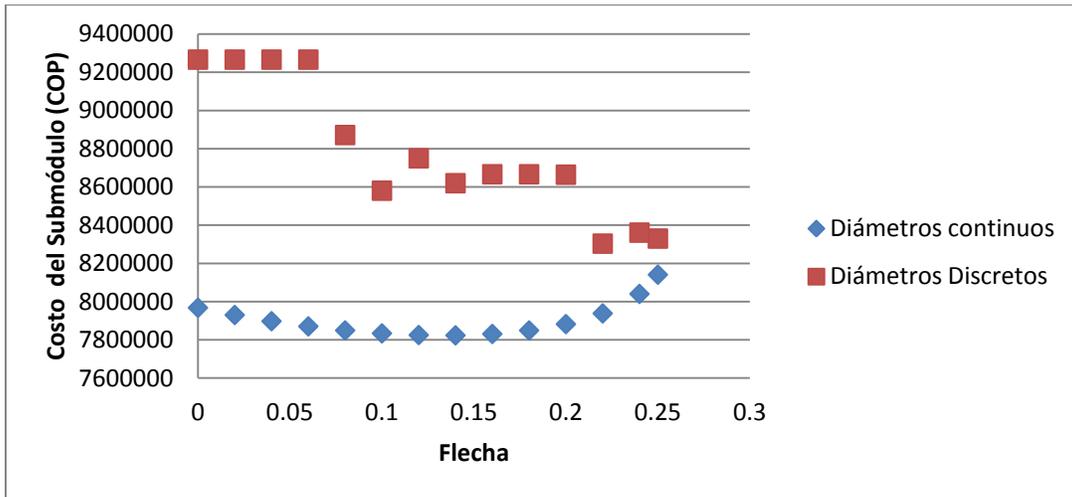
3.2.2.2. Resultados Red Simétrica .

Para la Red Simétrica, se realizaron los mismos análisis que se hicieron para la Red Asimétrica 1. Los resultados encontrados fueron básicamente los mismos. Esto quiere decir:

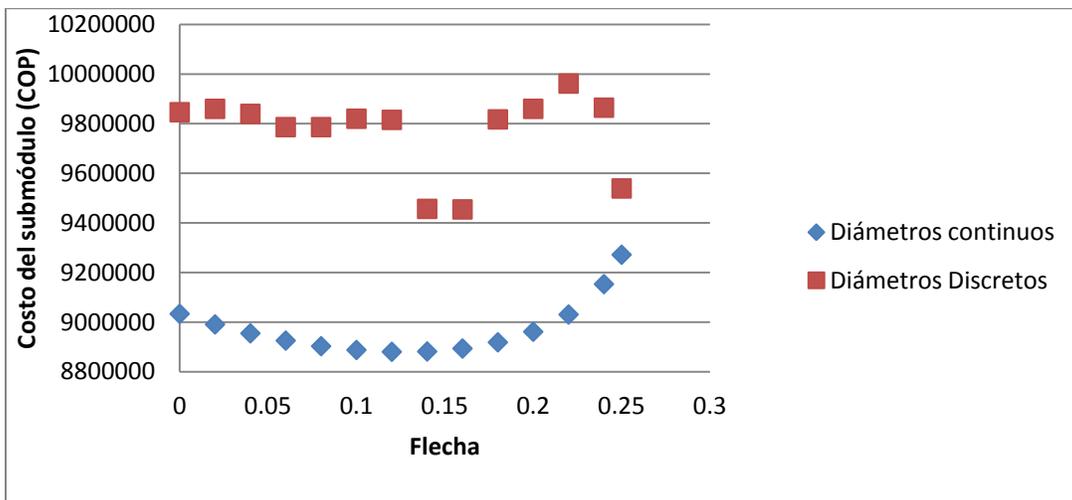
- Existe una relación cuadrática entre el diámetro de diseño continuo de cada una de las tuberías y su distancia topológica al punto de entrada.
- La primera tubería de cada uno de los laterales, a excepción del lateral crítico, presenta un diámetro inferior al del segundo tubo, con el objeto de reducir la energía disponible en el lateral y llegar al último nudo con la presión mínima.
- La discretización de diámetros, al diámetro comercial más cercano, no presenta ningún tipo de patrón y adicionalmente, deteriora completamente la línea de gradiente hidráulico objetivo del diseño.
- Todos los diseños realizados con diámetros continuos cumplen con el coeficiente de uniformidad establecido por el diseño agronómico.

Por otro lado, respecto a la curva Costo-Flecha, aunque se mantuvo una forma de la curva muy parecida, la flecha que conlleva el mínimo costo cambió. Los resultados de las curvas Costo-Flecha

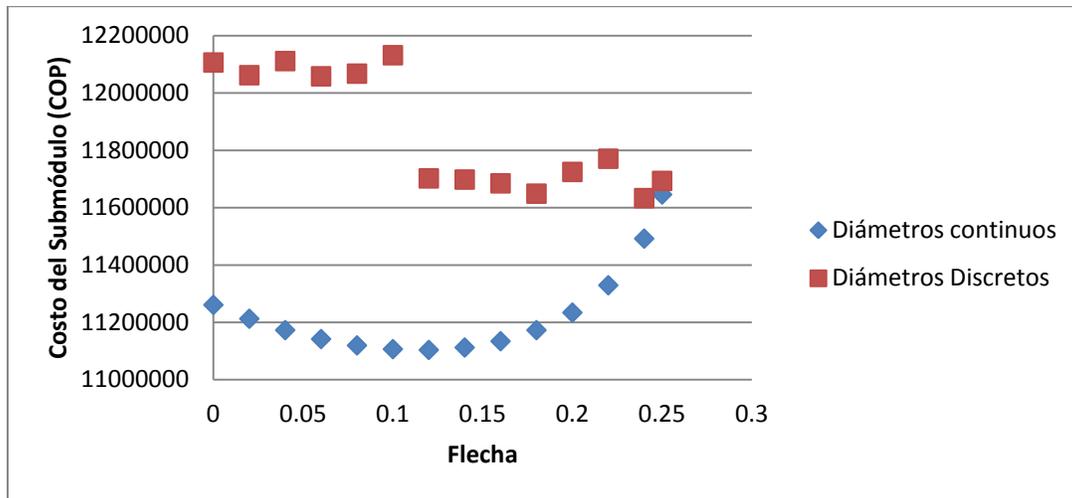
para la red simétrica y los tres tipos de emisores (con exponente 0.3, 0.5 y 1.0) se muestran a continuación:



Gráfica 3-27. Costos vs. Flecha, Red Simétrica. Emisores con exponente 0.3.



Gráfica 3-28. Costos vs. Flecha, Red Simétrica. Emisores con exponente 0.5.

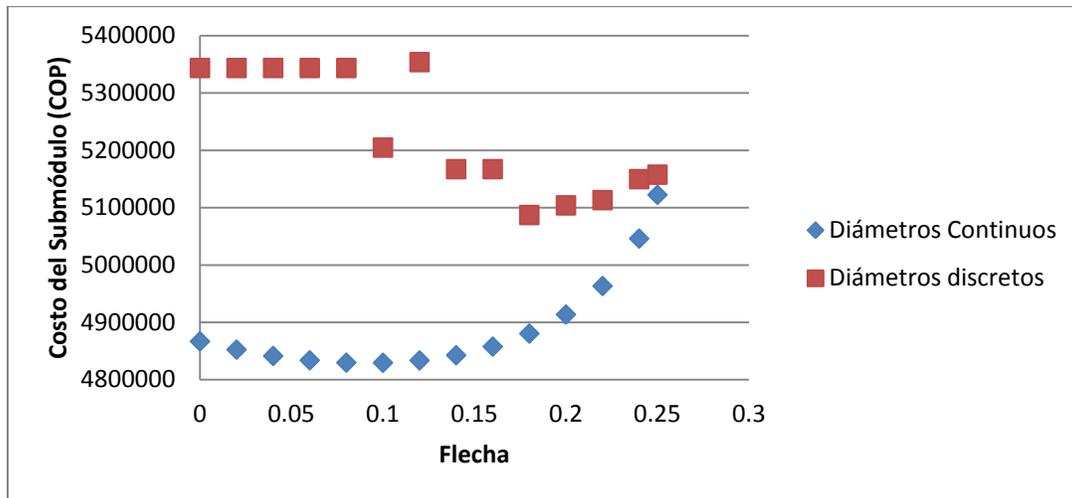


Gráfica 3-29. Costos vs. Flecha, Red Simétrica. Emisores con exponente 1.0.

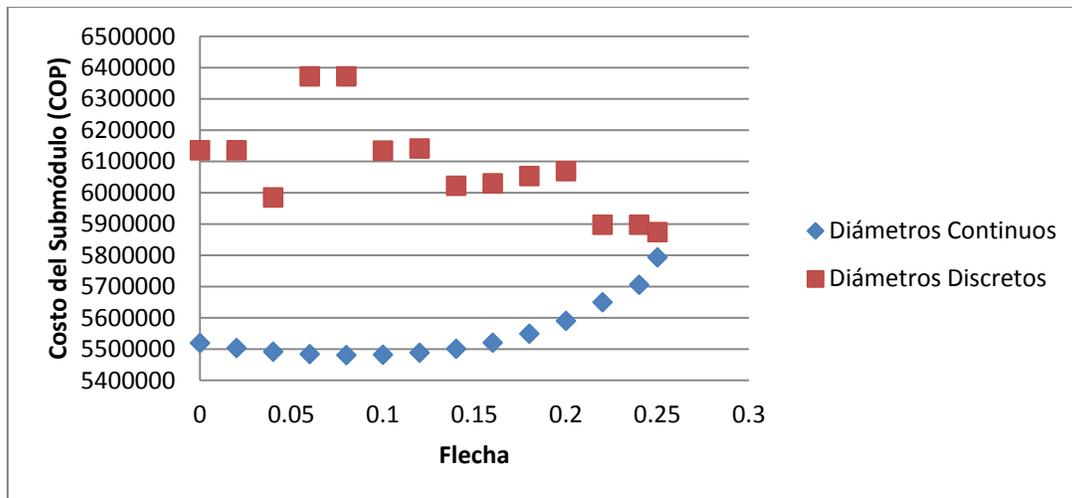
Como es posible observar en las gráficas anteriores, para la Red Simétrica se cumple que la flecha de mínimo costo corresponde a una flecha de 0.12. También se observa que, al igual que sucedió con la Red Asimétrica 1, la discretización de diámetros afecta completamente la curva Costo-Flecha respecto a la que se tiene inicialmente para diámetros continuos. Y adicional a esto, y aunque ya se ha explicado la razón, entre mayor es el exponente de los emisores en el submódulo, mayor es el costo del sistema; esto se debe en principio a que para los mayores exponentes, la tolerancia de presiones es menor y por lo tanto se tiene menor energía disponible para ser gastada.

3.2.2.3. Resultados Red Asimétrica 2.

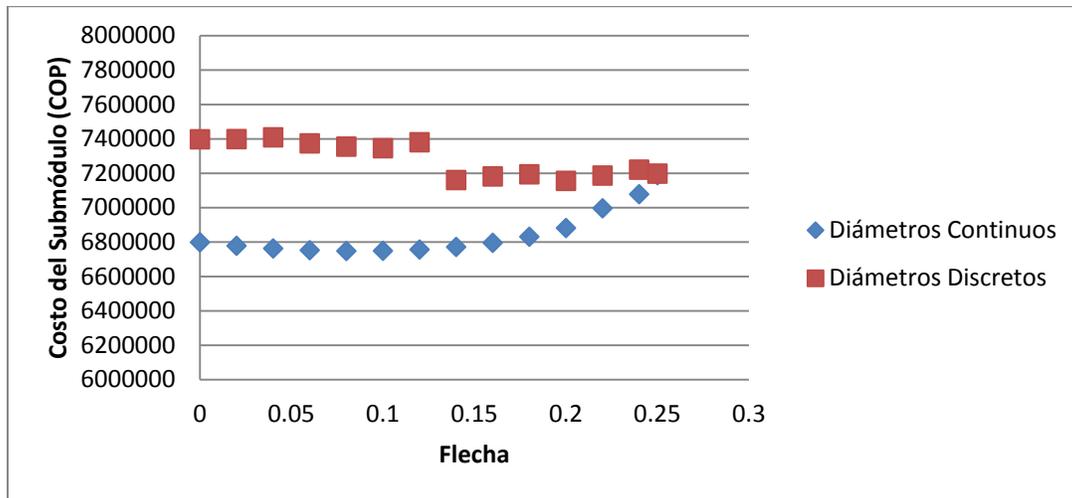
Finalmente, y para concluir con la parte de resultados que deja una serie de preguntas abiertas para la segunda fase de este trabajo, se presentan los resultados obtenidos para la Red Asimétrica 2. A continuación se pueden apreciar los resultados para las curvas Costo-Flecha de este submódulo usando los tres tipos de emisores analizados para los otros casos.



Gráfica 3-30. Costos vs. Flecha, Red Asimétrica 2. Emisores con exponente 0.3



Gráfica 3-31. Costos vs. Flecha, Red Asimétrica 2. Emisores con exponente 0.5.



Gráfica 3-32. Costos vs. Flecha, Red Asimétrica 2. Emisores con exponente 1.0.

En los resultados mostrados en las gráficas anteriores se observa que para esta red, la flecha de mínimo costo no se encuentra dentro de las flechas intermedias. La flecha de mínimo costo para esta red es la flecha de 0.08. De esta manera se aprecia, que la topología de la red tiene alguna implicación sobre la flecha de mínimo costo. Esto se puede afirmar debido a que las tres redes analizadas presentan exactamente las mismas características topográficas (redes planas), mismos exponentes de emisor, mismo coeficiente de uniformidad (CU) y misma tolerancia de presiones y caudales.

3.3. Análisis de la metodología propuesta por Bermúdez.

Para llevar a cabo un análisis de la metodología propuesta por Bermúdez (2011), se decidió hacer una prueba para la Red Asimétrica 1 y el emisor del exponente de 0.3. El procedimiento para llevar a cabo esto se presenta a continuación.

3.3.1. Red Asimétrica 1, con emisores de exponente 0.3.

Teniendo en cuenta el procedimiento propuesto por Bermúdez, se realizó el siguiente proceso con el objetivo de determinar la presión de entrada óptima al submódulo de riego:

1. Determinación de los coeficientes α , β y γ de la ecuación cuadrática ajustada.

Para determinar los parámetros α , β y γ correspondientes a una presión media (Hm) de 18 mca y un exponente del emisor de 0.3, se hacen uso de las ecuaciones planteadas por Bermúdez y mediante interpolación lineal, se obtienen estos parámetros. Según se explica a continuación:

Para determinar α se tiene que:

$$\text{Para } hm = 15 \text{ mca} \quad \alpha = 0.001x - 0.000137 = 1.63E - 4$$

$$\text{Para } hm = 20 \text{ mca} \quad \alpha = 0.0005x - 0.000054 = 9.6E - 5$$

$$f(x|x_1; x_2) = f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

$$f(18|15; 20) = 1.63E - 4 + \frac{9.6E - 5 - 1.63E - 4}{20 - 15} (18 - 15) = 1.228E - 4$$

Para determinar β :

$$\text{Para } hm = 15 \text{ mca} \quad \beta = -0.0565x + 0.0029 = -0.01405$$

$$\text{Para } hm = 20 \text{ mca} \quad \beta = -0.0413x + 0.00206 = -0.01033$$

$$f(x|x_1; x_2) = f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

$$f(18|15; 20) = -0.01405 + \frac{(-0.01033) - (-0.01405)}{20 - 15}(18 - 15) = -0.011818$$

Para determinar γ :

$$\text{Para } hm = 15 \text{ mca} \quad \gamma = 0.6224x + 0.8748 = 1.06152$$

$$\text{Para } hm = 20 \text{ mca} \quad \gamma = 0.6065x + 0.8753 = 1.05725$$

$$f(x|x_1; x_2) = f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1}(x - x_1)$$

$$f(18|15; 20) = 1.06152 + \frac{(1.05725) - (1.06152)}{20 - 15}(18 - 15) = 1.058958$$

2. Determinación de coeficiente de variación total γ_T .

Para la determinación de este coeficiente se hace uso de la Ecuación 2.36.

$$\gamma_T = \gamma + \gamma_{[CU]} + \gamma_{[CV]} \quad \text{Ecuación 2.36}$$

donde $\gamma_{[CU]}$ corresponde al coeficiente de variación debido al Coeficiente de Uniformidad impuesto por el diseño agronómico (CU_I), que calcula se de la siguiente forma:

$$\gamma_{[CU]} = 0.03 \cdot \left[\frac{CU_I - 0.8}{0.05} \right]$$

$$\gamma_{[CU]} = 0.03 \cdot \left[\frac{0.8 - 0.8}{0.05} \right] = 0$$

y $\gamma_{[CV]}$ corresponde al coeficiente de variación debido al Coeficiente de Variación de Fabricación del emisor. Se calcula de la siguiente forma:

$$\gamma_{[CV]} = 0.004 \cdot \left[\frac{CV - 0.04}{0.01} \right]$$

$$\gamma_{[CV]} = 0.004 \cdot \left[\frac{0.04 - 0.04}{0.01} \right] = 0$$

De esta forma, se obtiene que el coeficiente de variación total es:

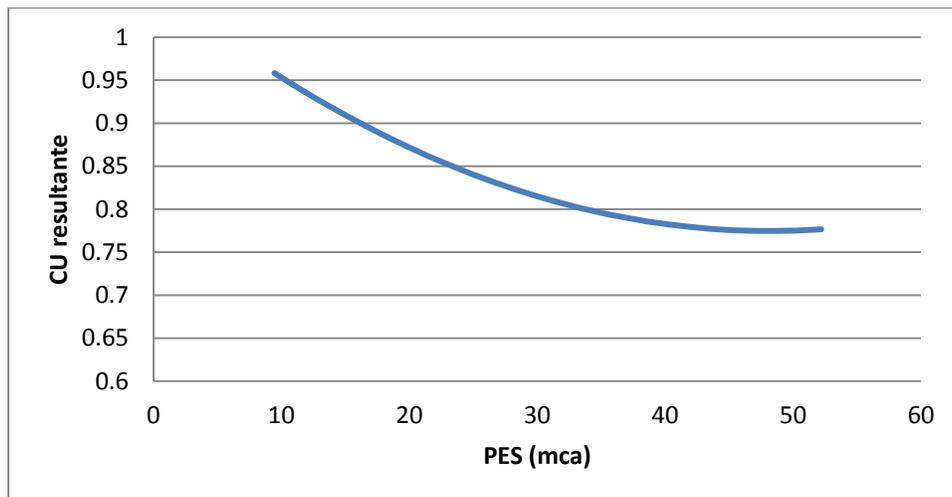
$$\gamma_T = 1.058958 + 0 + 0 = 1.058958$$

3. Determinación de la curva CU_R vs. PES .

Para la determinación de la curva CU_R vs. PES se debe tener como dato de entrada la presión mínima de operación del submódulo (h_{mp}), determinada mediante la tolerancia de caudales y presiones (Numeral 3.2.1.1). Con estos resultados, se obtiene la Ecuación 2.35 y mediante la cual se obtiene la Gráfica 3-33.

$$CU_R = \alpha(PES)^2 + \beta(PES) + \gamma_T$$

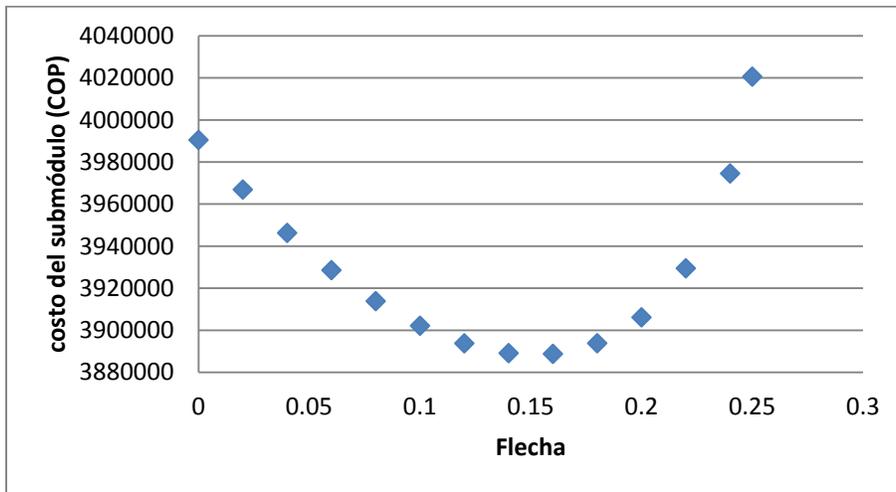
Ecuación 2.35



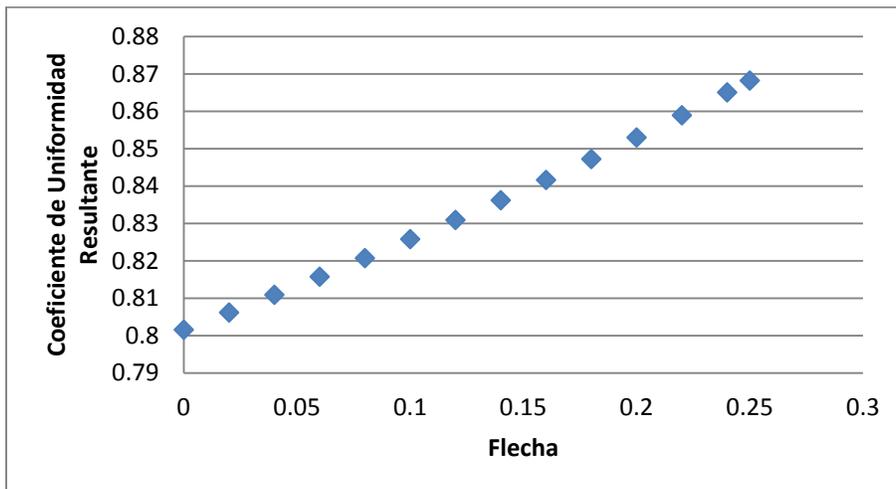
Gráfica 3-33. Curva PES vs. Coeficiente de uniformidad resultante, Red Asimétrica 1, exponente 0.3.

De acuerdo con los resultados obtenidos por Bermúdez, en este caso se debe escoger una presión de entrada al submódulo igual a 33.74 mca. Esta presión corresponde a un valor del parámetro M de 2.88. Como se puede observar este valor de M es superior al que se utilizó en la Sección 3.2.1.1 en la página 50 de este documento, donde el valor utilizado es de 2.5. Antes de mostrar los

resultados obtenidos, es claro que al haber aumentado la presión de entrada y haber mantenido la presión mínima, se tendrá mayor energía disponible para gastar y por lo tanto el diseño obtenido, de acuerdo con la metodología de Bermúdez, será más económico. Para hacer un análisis más detallado es necesario analizar cómo se comporta la curva Costo-Flecha y el coeficiente de uniformidad resultantes. Estos resultados se muestran en las siguientes dos gráficas.



Gráfica 3-34. Curva Costo-Flecha, Red Asimétrica 1, exponente del emisor 0.3. Metodología de Bermúdez.



Gráfica 3-35. Coeficiente de Uniformidad resultante vs. Flecha, Red Asimétrica 1, exponente del emisor 0.3. Metodología de Bermúdez.

En las gráficas anteriores se puede observar que los diseños son más económicos para este caso en que se utilizó una mayor presión de entrada, dada una mayor tolerancia de presiones. Por otro lado se puede ver que el diseño con la flecha de 0 lleva a un coeficiente de uniformidad igual al



deseado por el diseño agronómico, pero este no es el diseño más económico de todas las flechas posibles. La flecha más económica es la flecha de 0.16 y este diseño representa un coeficiente de uniformidad muy superior (de 0.84) sobre el deseado por el diseño agronómico. De esta manera, se puede decir que hacer uso de la metodología de Bermúdez no resulta muy adecuado para la selección de un diseño óptimo, ya que ésta determina una presión de entrada al submódulo que, claramente, entre mayor sea llevará a menores costos del sistema, pero no es determinante ya que el diseño de mínimo costo estará determinado por la línea de gradiente hidráulico objetivo que se trace. Lo que sí permite establecer esta metodología, y que resulta importante, es que ayuda al diseñador a determinar una presión máxima de entrada al submódulo que logre mantener el coeficiente de uniformidad impuesto por el diseño agronómico. Esto se puede evidenciar en la Gráfica 3-33, donde se observa que para presiones de entrada muy altas, el coeficiente de uniformidad resultante, no cumplirá con el establecido por el diseño agronómico. Esta metodología propuesta por Bermúdez será la que se utilizará para determinar la PES en la metodología que se propone en este trabajo para el diseño de submódulos de riego. En la siguiente sección se presenta la metodología planteada que hace uso de programación lineal.

3.4. Diseño de submódulos de riego usando programación lineal.

En esta sección se hace una descripción detallada de la metodología propuesta para el diseño de submódulos de sistemas RLAF. La primera parte de esta sección presenta la formulación matemática del problema para un sistema de tuberías que tiene demanda constante en sus nudos de consumo. Una vez se haya establecido la formulación matemática se procede a explicar y hacer un análisis de las variaciones necesarias para su aplicación en submódulos de riego, donde la demanda en los nudos es función de la presión. Como paso siguiente se presenta el algoritmo propuesto para obtener un diseño óptimo de submódulos de riego; y finalmente mediante diferentes casos de estudio, se presentará una comparación entre los resultados obtenidos con la metodología propuesta y la metodología SOGH.

3.4.1. Formulación matemática del problema de diseño de redes abiertas.

Antes de presentar la formulación matemática, es importante mencionar que la formulación propuesta únicamente funciona para sistemas de tuberías abiertas con demanda constante en sus nudos de consumo. La razón por la cual la formulación únicamente funciona para este tipo de sistemas es que existen algunas variables que se pueden parametrizar y de esta manera el problema se puede linealizar. La parametrización de algunas variables se logra porque en una red abierta con demanda constante en sus nudos, se conoce la trayectoria del fluido y los caudales que pasan por cada una de las tuberías.

Para poder formular el problema lineal se tiene en cuenta que el diseño de un sistema de tuberías ramificadas consiste en determinar los diámetros de cada una de las tuberías que componen la red, de manera que no se violen presiones mínimas en los nudos de consumo del sistema. Para esto, el diseñador cuenta con un conjunto D de diámetros comerciales disponibles que pueden ser asignados a cada tubería. Existen diferentes diseños que pueden cumplir con la restricción de presiones mínimas, de manera que el diseñador también debe buscar que el costo de su diseño sea mínimo.

La presión en la entrada de la red es un dato conocido por el diseñador y cada diámetro tiene asociadas unas pérdidas de energía, que implican que la altura piezométrica en el nudo al que entrega el agua es menor a la altura piezométrica del nudo del que sale el agua. Dichas pérdidas de presión son conocidas para cada combinación de Tubo-Diámetro. Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación se presenta un ejemplo simple que permite explicar la formulación matemática utilizada.

3.4.1.1. Ejemplo.

En la siguiente figura se muestra una red compuesta por 4 tramos (T_1 , T_2 , T_3 y T_4) y 5 nudos (4 nudos de consumo y el nudo correspondiente a la fuente de agua).

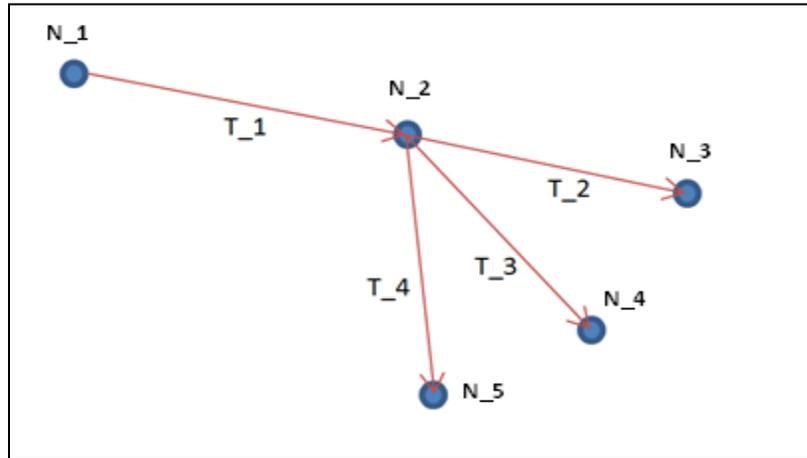


Figura 17. Red abierta de ejemplo para establecer la formulación matemática del problema de optimización lineal.

Suponiendo que se tienen 3 diámetros comerciales disponibles que pertenecen al conjunto D , y teniendo en cuenta que se conoce la rugosidad absoluta de cada uno de los materiales que se utilizarán en cada tubería y que por ser una red abierta se conocen los caudales, se pueden determinar las pérdidas totales para cada combinación Tramo-Diámetro, haciendo uso de la ecuación de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook-White, las cuales son función del caudal en la tubería, la rugosidad absoluta, la longitud de la tubería (que se conoce a priori) y el diámetro de la tubería.

En la Figura 18 se presenta el caso en que en cada uno de los tramos del sistema se utiliza una tubería de diámetro d_1 . En la figura se observa que la presión a la entrada es de 100 metros de columna de agua, y que las pérdidas correspondientes a la combinación (T_1, d_1) son de 20 mca, para la combinación (T_2, d_1) son de 10 mca, en la combinación (T_3, d_1) son de 5 mca y para la combinación (T_4, d_1) son de 10 mca. Es importante mencionar que para cada tramo se conoce la longitud, rugosidad y coeficiente de pérdidas menores. En la Figura 19 se presentan las pérdidas correspondientes para las combinaciones (T_i, d_2) y en la Figura 20 para las combinaciones (T_i, d_3) .

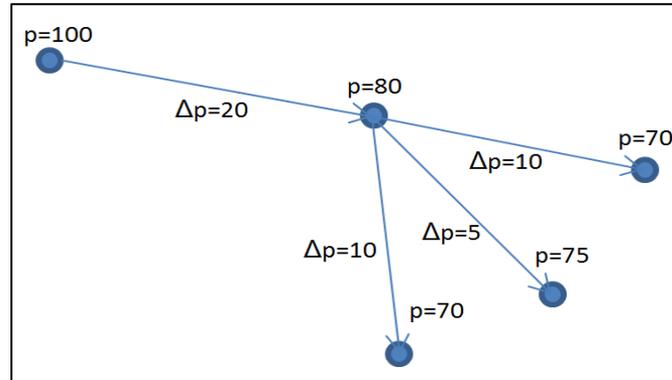


Figura 18. Pérdidas de altura piezométrica que se presentarían en la red ejemplo si se utiliza el Diámetro d_1 en cada tubería, unidades de presión en metros de columna de agua.

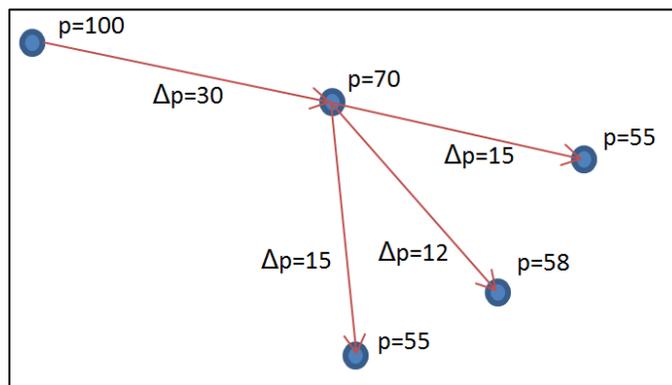


Figura 19. Pérdidas de altura piezométrica que se presentarían en la red ejemplo si se utiliza el Diámetro d_2 en cada tubería, unidades de presión en metros de columna de agua.

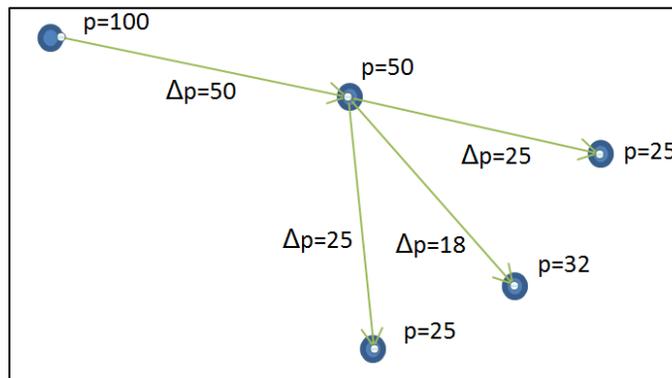


Figura 20. Pérdidas de altura piezométrica que se presentarían en la red ejemplo si se utiliza el Diámetro d_3 en cada tubería, unidades de presión en metros de columna de agua.

Los resultados de las figuras anteriores se pueden resumir en la siguiente tabla.

Tabla 8. Matriz (dp) de pérdidas totales para las diferentes combinaciones Tramo-Diámetro, Red Conceptual.

Pérdidas Totales (mca)		Diámetro		
		d ₁	d ₂	d ₃
Tramo	N_1,N_2	20	30	50
	N_2,N_3	10	15	25
	N_2,N_4	5	12	18
	N_2,N_5	10	15	25

Una vez que se obtiene la matriz de pérdidas totales, se desea encontrar el diseño (combinación de diámetros en todo el sistema) que conlleve al mínimo costo y cumpla con que la presión en todos los nudos sea mayor a 50 mca. De esta manera el siguiente paso consiste en determinar los costos asociados con cada combinación Tramo-Diámetro. Para esto se tiene en cuenta que la función para calcular el costo de una tubería de determinado diámetro es la siguiente

$$C = K * L * (D^x) \quad \text{Ecuación 3.4}$$

donde C corresponde al costo de la tubería, L a la longitud del tramo donde se colocará la tubería, D es el diámetro que se utilizará y K y x son el coeficiente y el exponente asociado con la curva de costos. Haciendo uso de la Ecuación 3.4 y conociendo la longitud de cada tramo, el coeficiente y el exponente de la ecuación, se pueden determinar los costos asociados con cada combinación Tramo-Diámetro. En la Tabla 9 se presenta la matriz de costos asociada con cada combinación Tramo-Diámetro.

Tabla 9. Matriz (c) de Costos para las diferentes combinaciones Tramo-Diámetro, Red Conceptual.

Costos (USD)	Tramo			
	N_1,N_2	N_2,N_3	N_2,N_4	N_2,N_5
Diámetro d ₁	360	320	300	332
Diámetro d ₂	270	250	220	255
Diámetro d ₃	200	175	150	180

Teniendo la matriz de costo y la matriz de pérdidas totales, el siguiente paso consiste en definir una matriz de conectividad que permita conocer qué nudos están conectados con que nudos. La matriz de conectividad para este ejemplo conceptual quedaría de la siguiente manera:

Tabla 10. Matriz (w) de conectividad entre nudos, Red Conceptual.

N_1	N_2	1
N_2	N_3	1
N_2	N_4	1
N_2	N_5	1

En la Tabla 10 se puede observar que la matriz de conectividad entre nudos contiene 3 columnas. En la primera se ubican los nudos aguas arriba de cada tramo existente, en la segunda columna se ubican los nudos aguas abajo de cada tramo y en la tercera se asigna el valor de 1 a los tramos existentes.

Una vez que se tiene la matriz de conectividad, y conociendo la presión mínima deseada (50 mca) en cada uno de los nudos del sistema, se puede establecer la LGH mínima en cada nudo. Para este ejemplo y suponiendo una elevación en los nudos como la que se muestra en la siguiente tabla (Tabla 11) se puede obtener la matriz de LGH mínimas (ver Tabla 12).

Tabla 11. Elevación de los nudos, Red Conceptual.

Nudo	Elevación (m)
N_1	10
N_2	9
N_3	8
N_4	7
N_5	6

Tabla 12. Matriz (LGH_{min}) de LGH mínimas en los nudos, Red Conceptual.

Nudo	LGH _{mínima} (m)
N_1	60
N_2	59
N_3	58
N_4	57
N_5	56

En la Tabla 12 se observa que a diferencia de la presión mínima deseada, la LGH mínima es diferente para cada uno de los nudos; lo anterior se debe a que cada nudo tiene una elevación



diferente. De esta manera se obtienen para este problema las 4 matrices que se necesitarán para implementar el modelo en Xpress, estas matrices son:

- Matriz de Costos (c)
- Matriz de pérdidas totales (dp)
- Matriz de Conectividad (w)
- Matriz de LGH mínimas (LGH_{min})

Además de tener las matrices es necesario estructurar su formulación matemática. Que teniendo en cuenta el ejemplo conceptual, se plantea a continuación

3.4.1.1.1. Formulación matemática del modelo de optimización para el diseño de redes abiertas.

El primer paso dentro de una formulación matemática de un modelo de optimización lineal consiste en definir los conjuntos que componen el problema. Una vez se han definido éstos, se definen las variables de decisión, las restricciones del problema y la función objetivo. De esta manera, para el problema de diseño de una red abierta la formulación matemática quedaría:

Conjuntos

N: Conjunto que contiene todos los nudos del submódulo.

D: Conjunto que contiene todos los diámetros comerciales disponibles.

Variables de decisión

X_{ijd} Variable binaria

$$X_{ijd} = \begin{cases} 1 & \text{si el tramo entre el nudo } i \in N \text{ y } j \in N \text{ utiliza el diámetro } d \in D \\ 0 & \text{De lo Contrario} \end{cases}$$

Como puede observarse la variable de decisión X_{ijd} solo puede tomar valores de 1 o 0. Y tendrá un valor igual a 1 si el modelo asigna para el tramo comprendido entre el nudo i y el nudo j un diámetro igual a d . Adicional a la variable de decisión binaria X_{ijd} es necesario definir una variable auxiliar que contenga la altura piezométrica en cada nudo del sistema.

p_i variable de decisión auxiliar que define la altura piezométrica en el nudo i .

Restricciones del problema

Restricción de LGH_{min} : Restricción que se asegura que para todos los nudos se tenga una LGH superior a la LGH mínima correspondiente al nudo.

$$LGH_i > LGH_{min_i} \quad \forall i \in N$$

Restricción de LGH en nudos aguas abajo: Restricción que se asegura que la LGH en el nudo $j \in N$ aguas abajo de un nudo $i \in N$ sea igual a la LGH aguas arriba menos las pérdidas (dp) ocasionadas en el tramo de tubería que comprenden el nudo $i \in N$ y el nudo $j \in N$ siempre que exista una conexión entre el nudo i y el nudo j .

$$LGH_j = LGH_i - \sum_{d \in D} dp_{ij,d} \cdot X_{ij,d} \quad \forall i \in N, \forall j \in N \mid w(i,j) = 1$$

donde LGH_j corresponde a la línea de gradiente hidráulico o altura piezométrica en el nudo $j \in N$ aguas abajo del nudo $i \in N$. Por otro lado $dp_{ij,d}$ corresponderá a las pérdidas totales de altura piezométrica que se presentarán en el tramo entre los nudos i y j si se utiliza una tubería de diámetro d . Por su parte $X_{ij,d}$ corresponde a la variable de decisión. Es importante anotar que los valores de $dp_{ij,d}$ corresponden a las pérdidas totales de altura piezométrica obtenidas como parámetros del problema, en la matriz de pérdidas totales.

Restricción de único diámetro en cada tramo: Esta restricción se encarga de asegurar que en cada tramo se asigne un solo diámetro.

$$\sum_{d \in D} X_{ij,d} = 1 \quad \forall i \in N, \forall j \in N \mid w(i,j) = 1$$

Función Objetivo

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{d \in D} C_{ij,d} \cdot X_{ij,d} \quad w(i,j) = 1$$

donde $C_{ij,d}$ es el Costo de utilizar un diámetro $d \in D$ en el tramo comprendido entre el nudo $i \in N$ y el nudo $j \in N$. $X_{ij,d}$ corresponde a la variable de decisión. El objetivo es minimizar esta función objetivo. Las restricciones presentadas anteriormente se encargarán de cumplir con los requisitos

hidráulicos de presión mínima. Es importante notar que los valores de C_{ijd} corresponden a parámetros de la función objetivo que se obtienen de la matriz de costos.

3.4.2. Aplicación de programación lineal al diseño de submódulos de riego.

En la sección anterior se construyó la formulación matemática para realizar el diseño de redes abiertas, utilizando programación lineal. Para realizar la formulación se hizo uso de un ejemplo conceptual de una red abierta con demanda constante en sus nudos de consumo. Esta metodología permite obtener el diseño óptimo global en el diseño de redes abiertas con nudos de demanda constante, pero a la hora de utilizarlo para realizar diseños de submódulos de riego se encontraron algunos problemas que fue necesario solucionar para poder obtener un diseño óptimo. Estos problemas son dos:

- Uso de Emisores: Como se ha mencionado durante este trabajo, los sistemas de riego utilizan emisores en sus nudos de demanda. Lo anterior implica que el caudal que se consume en cada planta depende de la presión que se tenga en ese punto. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede afirmar que el caudal que se emitirá a cada planta no se conocerá a priori. Por esta razón para realizar el diseño de un submódulo de riego la primera idea que se viene a la cabeza es definir una superficie de gradiente hidráulico, para de esta manera conocer una presión en cada emisor y finalmente determinar el caudal correspondiente a la presión establecida en el nudo. De esta manera, se puede suponer que se tiene el siguiente submódulo de riego que se muestra en la Figura 21.

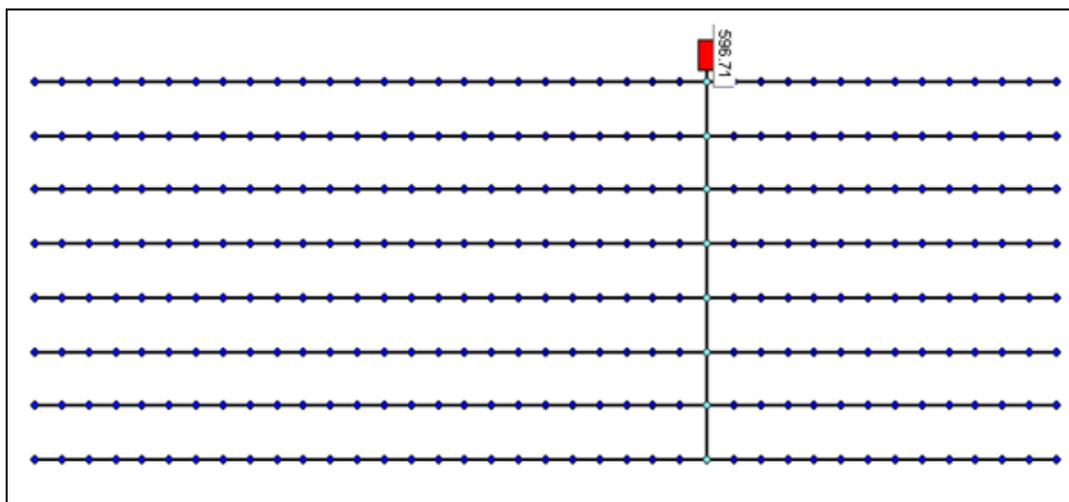


Figura 21. Submódulo Asimétrico 2.

El submódulo mostrado en la Figura 21 se desea diseñar usando programación lineal. Antes de realiza el diseño es necesario establecer la presión de entrada al submódulo (PES)

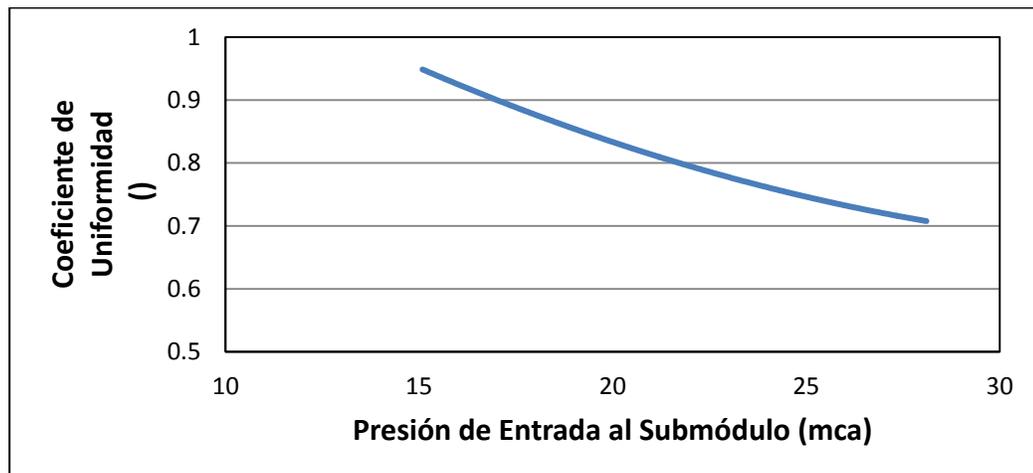
y la presión mínima. Lo anterior se obtiene haciendo uso de la metodología de Bermúdez (2011) y en las siguientes tablas se presentan los datos de entrada del problema y los resultados que arroja la metodología propuesta en el 2011.

Tabla 13. Datos de entrada para el diseño del Submódulo Asimétrico 2.

DATOS AGRONÓMICOS			
Coefficiente de uniformidad (CU)	Número de emisores por planta (n_e)	Presión media de operación (h_m)	Caudal medio por emisor (Q_m)
()	()	(mca)	(l/h)
0.8	2	18.00	120

Coefficiente de variación del emisor (CV)	0.04
Exponente del emisor	1.0
Coefficiente del emisor (l/s)/(m ^x)	0.00185185

En la Tabla 13 se observa que el coeficiente de uniformidad (CU) deseado por el diseño agronómico es de 0.8, el número de emisores por planta será de 2, el caudal medio por emisor es de 120 litros por hora, la presión media de operación es de 18 mca, el exponente del emisor es 1.0, el coeficiente de los emisores es 0.00185185 (l/s/m^x) y el coeficiente de variación (CV) es de 0.04. A partir de estos valores y haciendo uso de la metodología propuesta por Bermúdez se obtienen los siguientes resultados (Ver Gráfica 3-36):



Gráfica 3-36. Curva Coeficiente de Uniformidad vs. PES, Submódulo Asimétrico 2.

A partir de la Gráfica 3-36 y sabiendo que el CU deseado es de 0.8, se obtiene que la PES es 21.71 mca.

Tabla 14. Resultados de presión mínima y PES, para ejemplo de Submódulo Asimétrico 2.

Presión mínima en el Submódulo (mca)	14.94
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (mca)	21.71

Conociendo la PES y la presión mínima se puede proceder a buscar el conjunto de tuberías que representarían el diseño final. Para comenzar este proceso es necesario definir una superficie de gradiente hidráulico tal como se muestra en la siguiente figura:

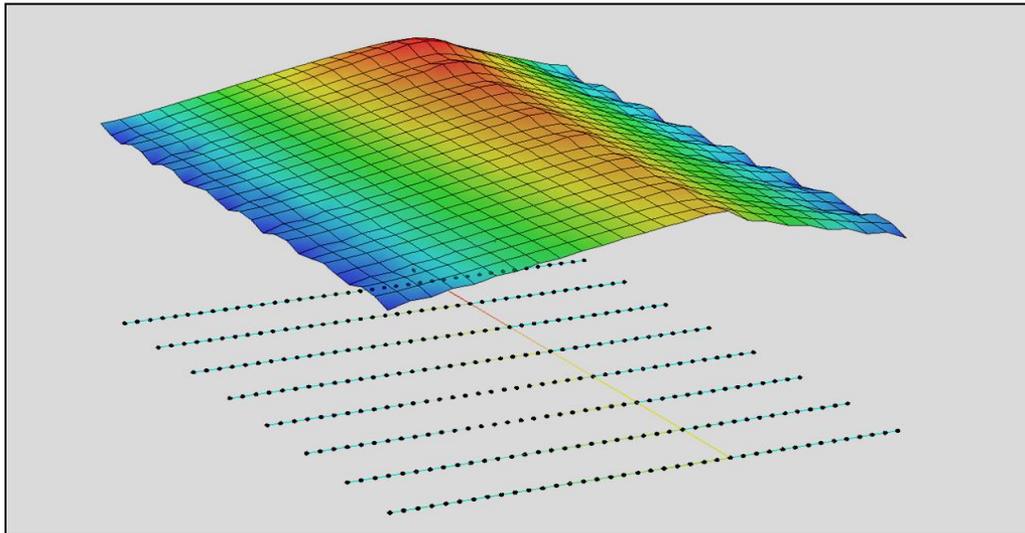


Figura 22. Superficie de gradiente hidráulico definida a partir de metodología SOGH, Submódulo Asimétrico 2.

La superficie mostrada en la Figura 22 corresponde a una superficie de gradiente hidráulico obtenida a partir de una flecha 0. Una vez se ha definido la superficie de gradiente hidráulico y conociendo la altura topográfica de cada uno de los nudos que se modelarán con emisores, se puede determinar la presión correspondiente en cada nudo. La presión se determina simplemente como la diferencia entre la altura piezométrica en cada nudo y la altura topográfica. De esta manera, conociendo la presión en cada punto del submódulo se puede determinar el caudal que se emitirá en el emisor correspondiente, para esto se hace uso de la ecuación del emisor. Finalmente, conociendo el caudal correspondiente a la superficie de gradiente planteada, se puede asignar este caudal como constante en los nudos que componen el submódulo y modelarse como caudales constantes.

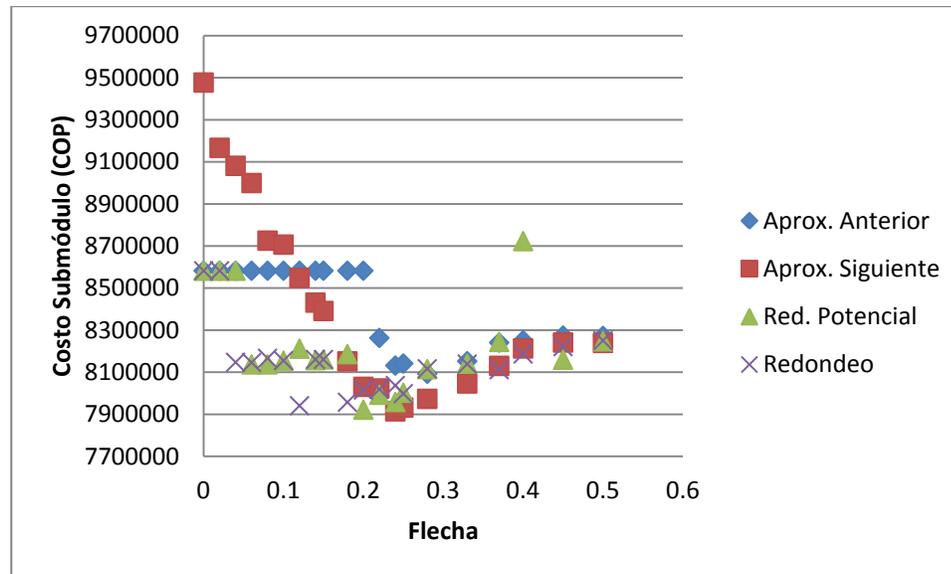
Teniendo en cuenta lo anterior, en este punto del problema se tiene un submódulo de riego con una presión de entrada ($PES=21.71$ mca), una presión mínima deseada ($P_{min}=14.94$ mca) y un caudal constante en cada nudo obtenido a partir de la superficie de gradiente y la ecuación de los emisores; de esta manera, y aprovechando que un submódulo de riego es una red abierta, es posible hacer uso de la formulación lineal planteada en la Sección 3.4.1.1.1 y diseñar. Para diseñar es necesario crear las 4 matrices (Matriz de costos, pérdidas totales, conectividad y LGH mínimas) necesarias que se ingresarán en el programa Xpress. Para crear las matrices de forma automática se hizo uso de un programa creado para este trabajo, que permite obtener a partir del archivo *.INP el archivo *.DAT que lee Xpress².

Una vez se obtuvieron las matrices, y se realizó el diseño mediante programación lineal (usando Xpress) es necesario que el diseño obtenido se modele con emisores para verificar que se cumpla con las restricciones de presión mínima y coeficiente de uniformidad deseado. Para este caso se obtuvo como presión mínima en el submódulo una presión de 15.04 mca y un coeficiente de uniformidad de 0.84, que como puede observarse cumplen con los requerimientos. Dado que el diseño cumple con los requerimientos hidráulicos y agronómicos, el siguiente paso consiste en determinar que tan buenos resultan los costos de esta metodología. Para esto se realizó el diseño del mismo submódulo mediante la metodología SOGH, variando el valor de la flecha de diseño y utilizando cuatro criterios de redondeo de diámetros. Los cuatro criterios de redondeo fueron:

- Aproximación al anterior diámetro.
- Aproximación al siguiente diámetro.
- Redondeo Potencial.
- Redondeo al diámetro comercial más cercano.

Los resultados obtenidos utilizando la metodología SOGH se observan en Gráfica 3-37. En esta gráfica se observa en el eje de las abscisas, el valor de la flecha utilizada para obtener la superficie óptima de gradiente hidráulico y en el eje de las ordenadas se observa el costo que se obtiene después del diseño. Aunque en secciones anteriores a este documento se demostró que la flecha máxima de diseño (con valides física) es la flecha de 0.25, en la gráfica se presentan los resultados para flechas superiores a la flecha máxima.

² El archivo *.DATA para este ejemplo del Submódulo Asimétrico 2, resulta en un archivo de 7499 líneas que por razón de espacio no es posible anexar al documento de este trabajo. En el CD Anexo, se puede abrir el archivo "Submódulo Asimétrico 2, Flecha 0, X=1.dat" para observar las 4 matrices obtenidas para este ejemplo.

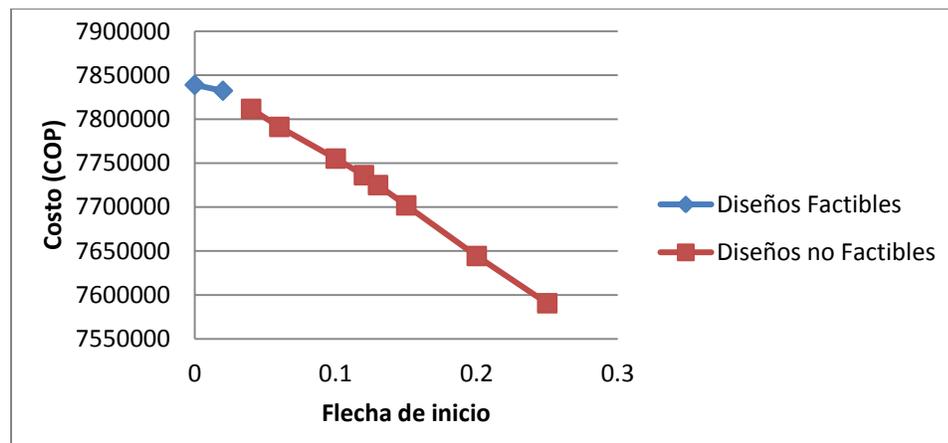


Gráfica 3-37. Relación Costo-Flecha obtenida mediante la metodología SOGH para el diseño del Submódulo Asimétrico 2, variando el valor de la flecha y utilizando 4 criterios de redondeo de diámetros.

De la gráfica mostrada es importante decir que mediante la metodología SOGH, para éste caso de estudio, se obtuvo que el diseño de mínimo costo corresponde a un diseño obtenido mediante la Flecha 0.24 y el criterio de redondeo de aproximación al siguiente diámetro para un costo mínimo de \$ 7,913,646. Por otro lado, el costo del diseño obtenido mediante la metodología propuesta es de \$ 7,838,949 (más económico). Lo anterior muestra que la metodología propuesta conlleva, para este caso, a un diseño que cumple con las restricciones hidráulicas y agronómicas y además presenta un costo de 74 mil pesos por debajo del mas económico obtenido mediante la metodología SOGH.

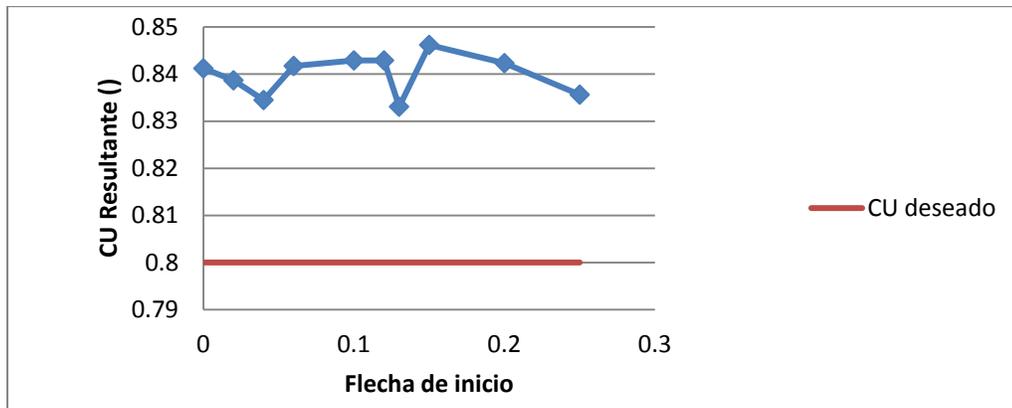
Ahora bien, como se mencionó al inicio de la Sección 3.4.2 existían dos problemas de la formulación lineal aplicada al diseño de submódulo de riego. El primer problema, quedó resuelto al definir una superficie de gradiente hidráulico que permitiera establecer unos caudales constantes en los nudos de consumo y de esta manera poder diseñar. El segundo problema surge de la pregunta ¿Qué pasa con el diseño usando formulación lineal si la superficie de gradiente hidráulico parte de una flecha diferente a la Flecha 0?, esta pregunta se responde a continuación.

- Sensibilidad del diseño a la flecha utilizada: En el ejemplo presentado anteriormente se observó que se puede obtener un diseño más económico mediante el uso programación lineal. Lo que se pretende en esta sección es observar las variaciones que se presentarán en los resultados si se cambia la flecha a partir de la cual se define la superficie de gradiente hidráulico inicial. De esta manera, se realizaron diferentes diseños tal como se mostró en el ejemplo anterior, solo que ahora la superficie de gradiente hidráulico varía. En las siguientes figuras se presentan los resultados obtenidos para diseños partiendo de flechas 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.10, 0.12, 0.13, 0.15, 0.20 y 0.25, que a partir de ahora se denominarán diseño(F0), diseño(F0.02), diseño(F0.04), diseño(F0.06), diseño(F0.10), diseño(F0.12), diseño(F0.13), diseño(F0.15), diseño(F0.20), diseño(F0.25).



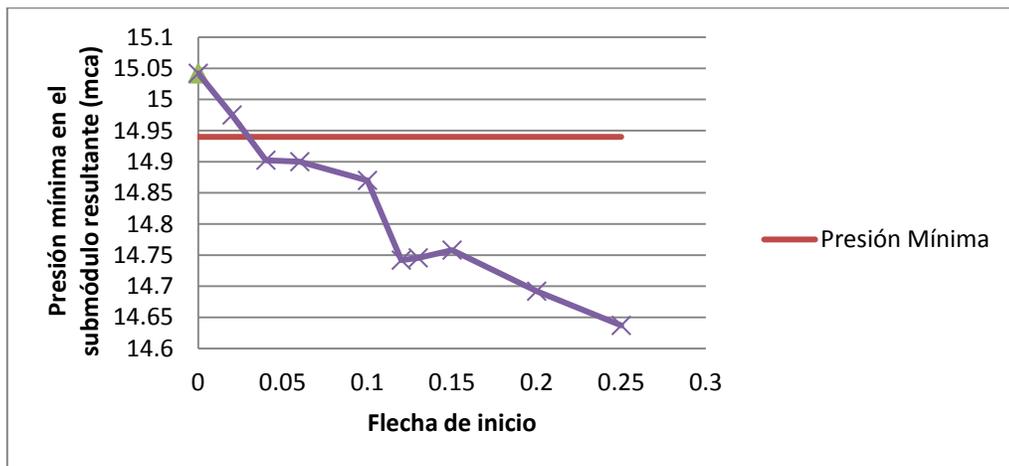
Gráfica 3-38. Costo del diseño del Submódulo Asimétrico 2 partiendo de diferentes flechas iniciales, usando programación lineal.

En la Gráfica 3-38 se observan los costos que se tendrían haciendo uso de programación lineal para el diseño del submódulo Asimétrico 2. En la gráfica se observa que a medida que la flecha para determinar la superficie de gradiente aumenta, el costo final del submódulo se reduce; sin embargo, no todos los diseños obtenidos son factibles, para el caso presentado, únicamente el diseño(F0) y el diseño(F0.02) son factibles. En este caso, un diseño es factible si la presión en todos los nudos es superior a 14.94 mca y adicionalmente se cumple con el coeficiente de uniformidad deseado ($CU = 0.8$). En las siguientes gráficas se presentan los resultados de coeficiente de uniformidad, presión mínima y número de nudos por debajo de la presión mínima en el submódulo.



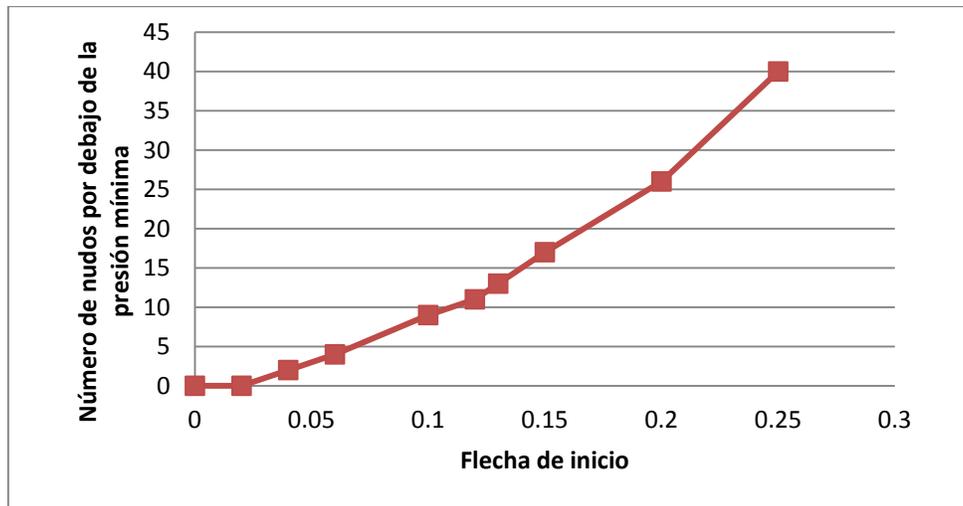
Gráfica 3-39. Coeficientes de uniformidad resultantes, variando flecha de inicio, Submódulo Asimétrico 2.

En la Gráfica 3-39 se observa que todos los diseños cumplen con el coeficiente de uniformidad deseado, esto se debe a que el trabajo realizado por Bermúdez se asegura de cumplir con el coeficiente de uniformidad.



Gráfica 3-40. Presiones mínimas resultantes, variando flecha de inicio, Submódulo Asimétrico 2.

A diferencia del coeficiente de uniformidad y los resultados presentados en la Gráfica 3-39, las presiones mínimas en el submódulo únicamente se cumplen para el diseño(F0) y el diseño(F0.02). En la Gráfica 3-40 se puede observar la razón por la cual algunos diseños se consideran no factibles (presión en 1 o más nudos por debajo de la presión mínima). Al analizar el número de nudos por debajo de la presión mínima se observaron los resultados que se muestran en la siguiente gráfica:



Gráfica 3-41. Número de nudos por debajo de la presión mínima resultantes, variando flecha de inicio, Submódulo Asimétrico 2.

Finalmente, en la Gráfica 3-38 y en la Gráfica 3-41 se podrá notar que a medida que aumenta la flecha inicial de diseño se reducen los costos pero también se corre el riesgo de no cumplir con la restricción hidráulica de presión mínima. Adicional a esto, resulta claro que entre mayor sea la flecha de partida, el número de nudos por debajo de la presión mínima tiende a aumentar. Teniendo en cuenta los resultados anteriores se realizaron diferentes pruebas para establecer un criterio para diseñar submódulos de riego sabiendo que existe una sensibilidad en los resultados respecto a la flecha de inicio. A continuación se presenta el criterio que finalmente se adoptó y los resultados obtenidos para diferentes casos de estudio.

3.4.3. Metodología para el diseño de submódulos de riego usando programación lineal en conjunto con SOGH.

Con base en lo presentado en la Sección 3.4.2 fue necesario plantear una metodología para el diseño de submódulos de riego. Es importante recordar que los dos problemas presentados al usar programación lineal en el diseño de submódulos, se refieren a que estos hacen uso de emisores y que existe una sensibilidad de los resultados respecto a la flecha inicial para establecer la superficie de gradiente. En esta sección se presentará el algoritmo final que se utilizará para el diseño de submódulos de sistemas RLAF. Los pasos a seguir son:

1. **Datos de entrada:** Para iniciar el proceso de diseño es necesario conocer la topología del submódulo de riego, el Coeficiente de Uniformidad (CU), el caudal medio por planta, el número de emisores por planta (n_e), la ecuación de los emisores (su exponente y coeficiente) y el Coeficiente de Variación (CV).
2. **Cálculo de la PES y presión mínima:** Conociendo los valores de entrada establecidos por el diseño agronómico, se debe hacer uso de la metodología planteada por Bermúdez (2011) para determinar la presión de entrada al submódulo (PES) y la presión mínima aceptable en los emisores³.
3. **Cálculo de superficies de gradiente:** Una vez se han determinado la presión de entrada (PES) y la presión mínima deseada, se procede a hacer uso de la metodología SOGH. La metodología SOGH en conjunto con el programa REDES, permite establecer de forma rápida la superficie de gradiente hidráulico deseado. En este caso, el diseñador debe determinar la superficie de gradiente hidráulico correspondiente a la Flecha 0 y Flecha 0.25.
4. **Cálculo de caudales de diseño:** Conociendo la altura piezométrica en cada nudo del sistema (tanto para la Flecha 0 como para la Flecha 0.25) y su altura topográfica, se obtienen las presiones en cada nudo. Al utilizar la ecuación del emisor, se obtienen los caudales correspondientes que recibiría cada planta. El caudal calculado mediante la ecuación del emisor, se asigna como un caudal de demanda base del nudo y se modelará como constante. De esta manera, en este punto se tienen dos submódulos topológicamente iguales pero con caudales en sus nudos diferentes. El primero corresponde al submódulo partiendo de la Flecha 0 y el segundo al submódulo partiendo de la Flecha 0.25.

³ En este trabajo, se hace entrega de un programa en el cual el usuario únicamente ingresa los datos de entrada del paso 1 de la metodología, y de forma automática se calcula la curva CU vs PES para establecer la presión de entrada al submódulo; adicionalmente el programa entrega al usuario la presión mínima que debe existir en el submódulo de riego. Más adelante se mostrará el uso de este programa en la sección de Anexos.

Es importante anotar que en la medida que se aumenta la flecha de inicio la suma de los caudales que se emitirían en todo el sumódulo se reduce. De esta manera, el caudal que saldrá de la fuente de alimentación de un submódulo con caudales en sus nudos correspondientes a una superficie de gradiente de Flecha 0 será mayor al caudal total que se obtiene a partir de una Flecha 0.25. Por esta razón, al usar programación lineal el diseño obtenido a partir de la Flecha 0 resulta más costoso que el diseño obtenido a partir de la Flecha 0.25.

5. **Diseñar usando programación lineal:** Habiendo asignado los caudales emitidos como caudales de demanda constante en los nudos, se procede a calcular las matrices de costo, pérdidas totales, conectividad y $LGH_{\text{mínimas}}$. Teniendo en cuenta que se tienen dos submódulos a diseñar (el que contiene los caudales a partir de la Flecha 0 y el que tiene los caudales a partir de la Flecha 0.25), se obtendrán 2 diseños diferentes. Estos diseños se obtienen usando la formulación lineal implementada en el programa Xpress⁴. De esta manera se obtienen lo que se denominará de ahora en adelante como D_1 y D_2 . D_1 corresponde al diseño más costoso (diseño a partir de Flecha 0) y D_2 (diseño a partir de Flecha 0.25) al diseño más económico.
6. **Modelar diseños con emisores:** Como bien se sabe, los diseños D_1 y D_2 fueron obtenidos a partir de demandas constantes en sus nudos; por esta razón es necesario verificar el comportamiento del sistema cuando se hacen funcionar los diseños con emisores. Respecto al diseño D_1 obtenido en el paso 5 es importante aclarar que este diseño siempre será factible; por otro lado, el diseño D_2 , obtenido en el paso 5, por lo general no será factible. Si en algún caso el diseño D_2 obtenido a partir de la flecha 0.25 resultara factible, entonces el proceso de diseño terminaría y el diseño D_2 sería el definitivo. Al modelar los diseños D_1 y D_2 con emisores se obtendrá para cada nudo i el caudal emitido. De esta manera se conocerá para cada nudo i un caudal que para el caso del diseño D_1 se denominará $CaudalE_{1i}$ y para el caso del diseño D_2 se llamará $CaudalE_{2i}$ ⁵. En este punto el diseñador también debe calcular la suma de caudales emitidos en el submódulo para D_1 y D_2 (ver Ecuación 3.5 y Ecuación 3.6).

$$Q_{total1} = \sum_{\forall i \in N} CaudalE_{1i} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

$$Q_{total2} = \sum_{\forall i \in N} CaudalE_{2i} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

⁴ El programa de Xpress se entregará en el CD anexo a este documento.

⁵ En el término $CaudalE_{ji}$ el primer subíndice corresponde al subíndice del diseño (D_j) y el segundo subíndice corresponde al Id del nudo.

7. **Promedio de Caudales:** Una vez se tienen los caudales $CaudalE_{1i}$ y $CaudalE_{2i}$ estos se promedian en cada nudo i para obtener lo que se denominará $Caudal_{ji}$ que se asignará como un caudal constante en cada uno de los nudos del sistema. De esta manera se tiene un nuevo submódulo, que aunque tiene las mismas características topológicas del original, comprende caudales obtenidos del promedio de caudales de 2 diseños anteriores (D_1 y D_2).
8. **Diseñar promedio usando programación lineal:** Con los caudales en cada nudo ($Caudal_{ji}$) obtenidos en el paso 7 se obtienen las matrices de costo (c), pérdidas totales (dp), conectividad (w) y $LGH_{mínimas}$. Con estas matrices y usando la formulación implementada en Xpress se diseña el submódulo y se obtiene el diseño D_j .
9. **Modelar el nuevo diseño con emisores:** Teniendo el diseño D_j éste debe ser modelado con emisores. De esta manera se conoce el caudal que cada nudo i emite. El resultado de esta etapa es obtener lo que se denominará $CaudalE_{ji}$ (Caudales emitidos en el diseño j en cada nudo i).
10. **Comprobación de suma de caudales, presiones y CU:** Una vez se ha modelado el diseño D_j usando emisores, se puede establecer si este diseño es factible (CU mayor al establecido por el diseño agronómico y todos los nudos con presión mayor a la mínima) o no factible. Adicional a esto el diseñador debe determinar la suma de caudal total emitido en el diseño D_j calculado como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Q_{totalj} = \sum_{\forall i \in N} CaudalE_{ji} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

De esta manera, si el diseño D_j es factible y $(Q_{totalj} - Q_{total2} \leq Diferencia_{deseada})$ el diseño termina y se obtiene como diseño final D_j . Si por otro lado el diseño D_j resulta no factible y/o $(Q_{totalj} - Q_{total2} > Diferencia_{deseada})$ se debe seguir al paso 11.

11. **Restablecer D_1 o D_2 :** Dado que el diseño D_j no resultó factible y/o la diferencia deseada en la suma de caudales fue mayor a la establecida, en este paso el diseñador debe observar el número de nudos por debajo de la presión mínima que se obtuvieron mediante el diseño D_j . De esta manera:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si número de nudos por debajo de } P_{min} > 0 \rightarrow D_2 = D_j \text{ y } CaudalE_{2i} = CaudalE_{ji} \\ \text{Si número de nudos por debajo de } P_{min} = 0 \rightarrow D_1 = D_j \text{ y } CaudalE_{1i} = CaudalE_{ji} \end{array} \right.$$

En el anterior condicional se puede observar que comienza un algoritmo de bisección, en el cual, si el número de nudos que incumplen la presión mínima es mayor a 0 entonces el



diseño denominado D_j pasa a remplazar el diseño D_2 ; y por el contrario, si ningún nudo incumple con la presión mínima el diseño D_j pasa a remplazar D_1 . De igual forma el Caudal E_{1i} o el Caudal E_{2i} será remplazado por el Caudal E_{ji} . Teniendo en cuenta lo anterior el diseñador debe volver al paso 7 y seguir con el proceso hasta que finalmente se cumpla que D_j sea factible y $(Q_{totalj} - Q_{total2} \leq Diferencia_{deseada})$.

Los 11 pasos que comprenden el algoritmo planteado, permiten al diseñador obtener un diseño óptimo de submódulos de riego. En la siguiente página se resume el algoritmo mediante un diagrama de flujo que hace más fácil entender su procedimiento (Ver Figura 23). Respecto al algoritmo hay que decir que como se pudo observar el diseño parte de caudales obtenidos a partir de una Flecha 0 y una Flecha 0.25. La Flecha 0.25 se escogió por ser la flecha máxima teórica, pero es importante dejar abierta la pregunta de qué pasa si se parte de una flecha mayor. Adicionalmente, es posible que exista un proceso de convergencia al diseño óptimo de forma más rápida, aunque como se mostrará en la solución de casos de estudio, el algoritmo de bisección logra finalizar el algoritmo en el quinto o sexto diseño.

En las próximas secciones se presentarán los resultados obtenidos para 5 casos de estudio de submódulos de sistemas RLAF en donde se realizaron variaciones en la topología, topografía, ecuación del emisor y Coeficiente de Uniformidad deseado. Posterior a esto se mostrará el uso de los programas desarrollados para este trabajo. Con los programas que se mostrarán se entregará el manual del usuario para el programa que permite determinar la presión de entrada al submódulo (PES) y crear las matrices necesarias para realizar el diseño en Xpress. También se mostrará la estructura del código en Xpress que contiene toda la formulación matemática del problema.

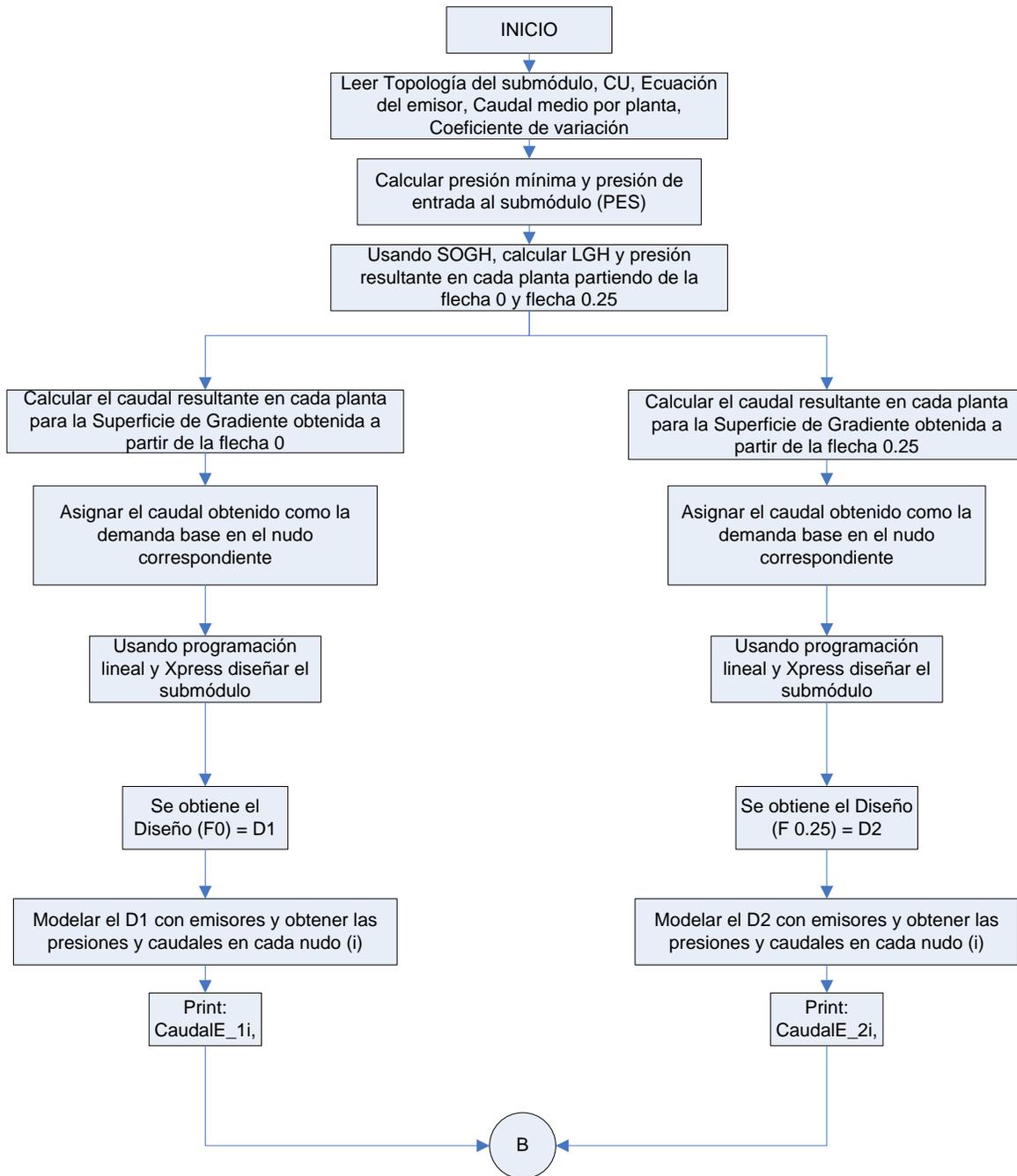


Figura 23A. Diagrama de flujo, metodología para el diseño de submódulos de riego usando programación lineal en conjunto con SOGH. Parte A.

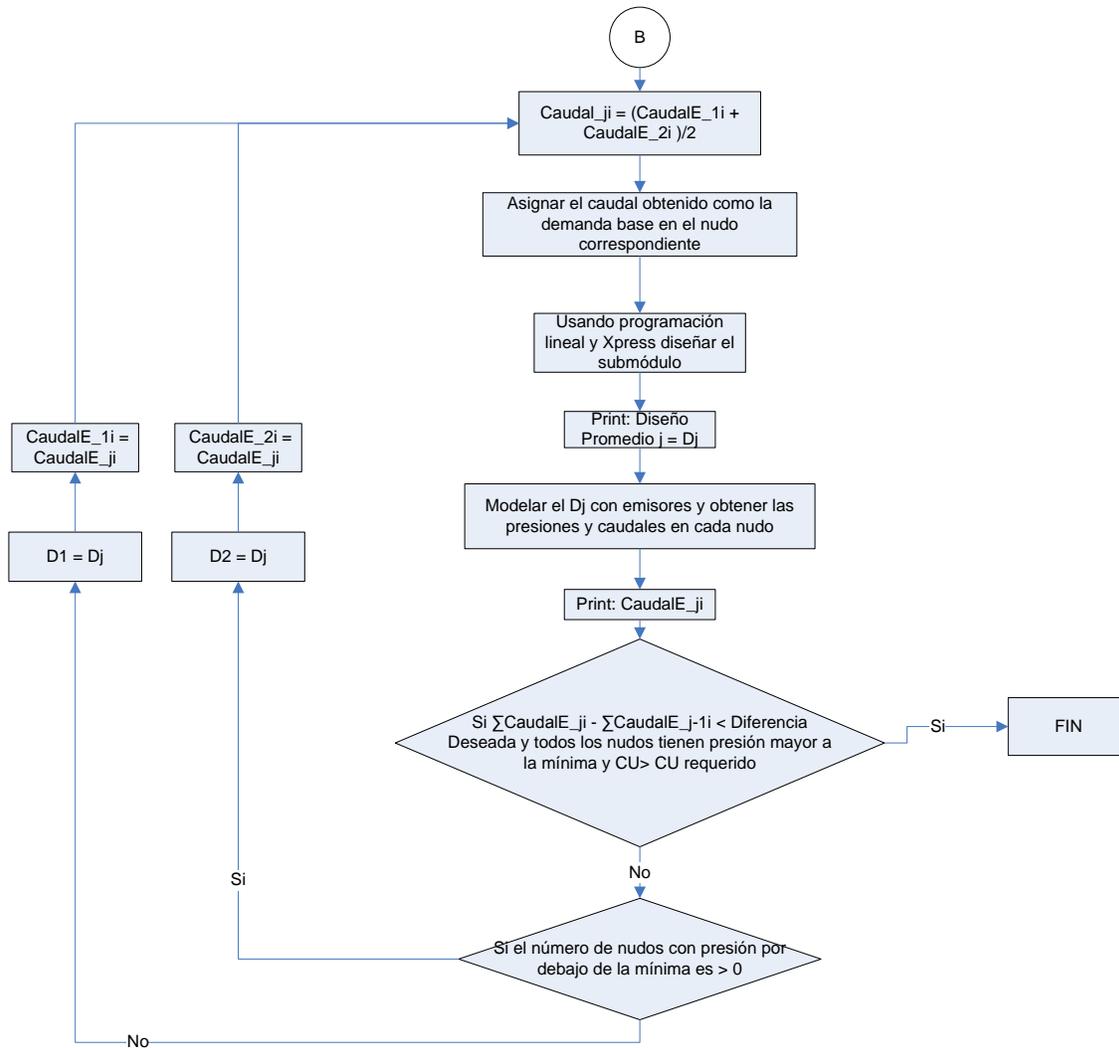


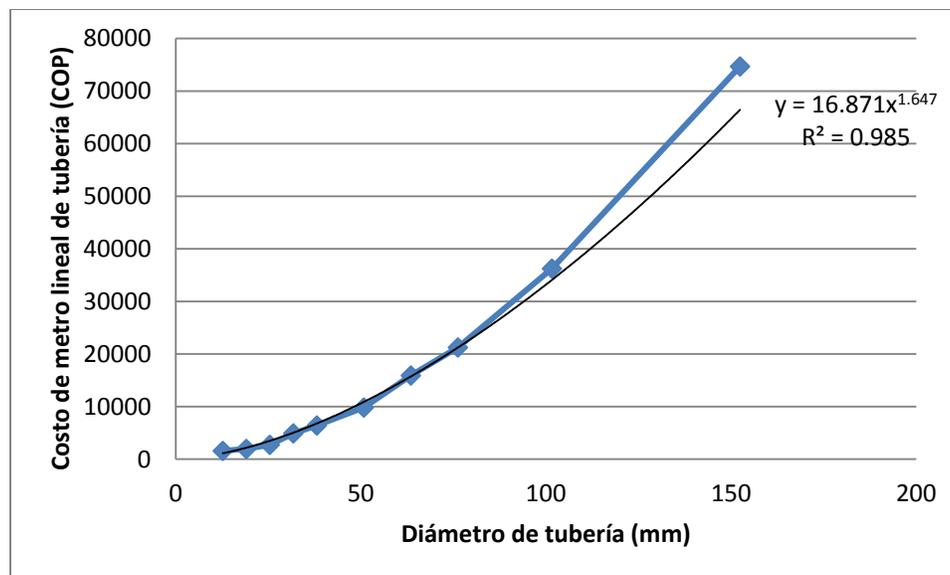
Figura 23B. Diagrama de flujo, metodología para el diseño de submódulos de riego usando programación lineal en conjunto con SOGH. Parte B.

3.4.4. Resultados de la metodología planteada en el diseño de submódulos de sistemas de RLAF.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para 5 casos de estudio de submódulos de riego que se diseñaron usando la metodología basada en programación lineal en conjunto con SOGH. Para evaluar el desempeño de esta metodología se utilizó como punto de comparación la metodología SOGH, planteada por Ochoa y Saldarriaga (2011). De esta manera, para cada uno de los casos de estudio que se presentarán, se realizó el diseño usando la metodología SOGH, partiendo de diferentes flechas de diseño y utilizando los cuatro criterios de redondeo de diámetros que plantea esta metodología, estos son:

- Aproximación al diámetro comercial anterior.
- Aproximación al diámetro comercial siguiente.
- Redondeo Potencial.
- Redondeo al diámetro más cercano.

La curva de costos que se utilizó para el diseño de todos los submódulos de riego fue exactamente la misma y corresponde a la que se muestra a continuación (ver Gráfica 3-42 y Ecuación 3.3):



Gráfica 3-42. Curva Costo vs. Diámetro de tubería.

$$C = \sum_{i=1}^{NT} 16.871 * L_i * (D_i^{1.647})$$

Ecuación 3.8

3.4.4.1. Submódulos de riego planos.

La presente sección muestra los resultados obtenidos para dos submódulos de riego con topografía plana. Los dos submódulos de riego se diseñaron usando la metodología planteada en este trabajo, que hace uso de programación lineal en conjunto con SOGH. Una vez se presenten los resultados de los submódulos de riego planos, se procederá a mostrar los casos de estudio de submódulos de riego con topografía variable.

3.4.4.1.1. Caso de Estudio 1, Submódulo Asimétrico 2 Plano.

Este caso de estudio corresponde al ejemplo mostrado en la Sección 3.4.2. En la siguiente figura se observa la topología correspondiente del submódulo de estudio:

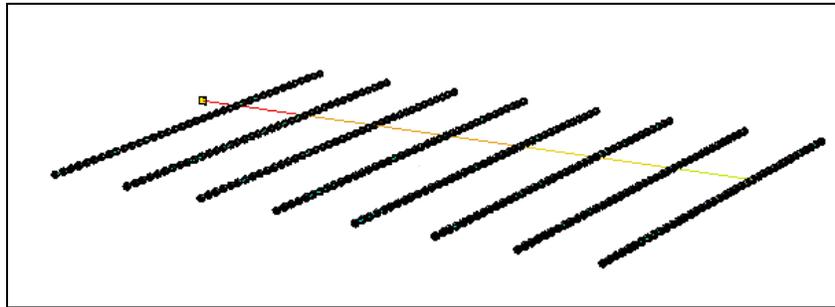


Figura 24. Caso de Estudio 1, Submódulo Asimétrico 2 Plano.

Este submódulo se compone de 1 tubería múltiple, 16 laterales de riego, 312 plantas y tramos y, es un submódulo de topografía plana. A continuación se presentan los datos de entrada para empezar el diseño.

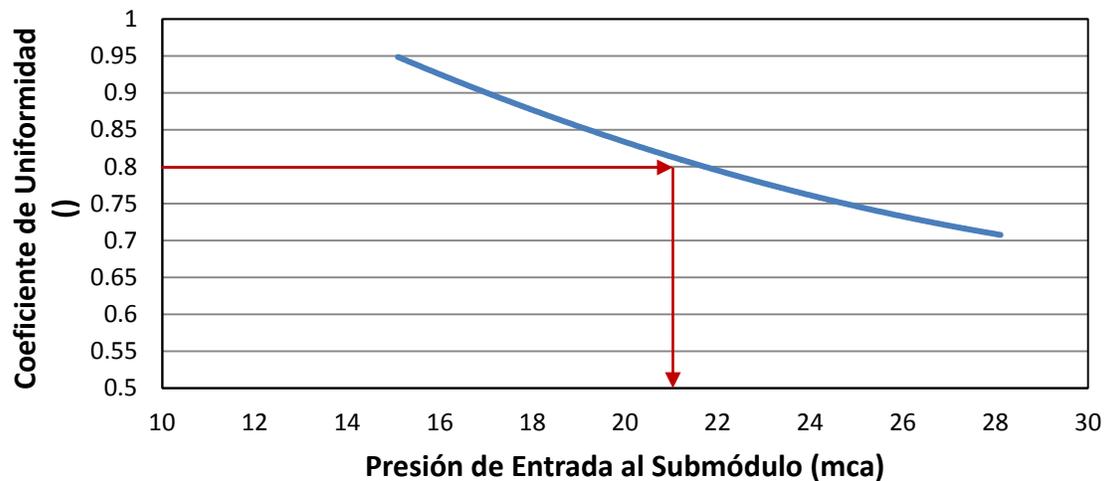
Tabla 15. Datos agronómicos de entrada, Submódulo Asimétrico 2 Plano.

DATOS AGRONÓMICOS			
Coefficiente de uniformidad (CU)	Número de emisores por planta (n_e)	Presión media de operación (h_m)	Caudal medio por emisor (Q_m)
()	()	(mca)	(lph)
0.8	2	18.00	120

Tabla 16. Datos de entrada de los emisores, Submódulo Asimétrico 2 Plano.

Coefficiente de variación del emisor (CV)	0.04
Exponente del emisor	1
Coefficiente del emisor (l/s)/(m^x)	0.00185185

Teniendo en cuenta los datos de entrada presentados en la Tabla 15 y Tabla 16 y haciendo uso de la metodología de Bermúdez (2011), se obtiene la siguiente curva para determinar la presión de entrada al submódulo (PES).


Gráfica 3-43. Curva CU vs PES. Caso de estudio 1, Submódulo Asimétrico 2 Plano.

Por medio de la Gráfica 3-43 y teniendo en cuenta que el Coeficiente de Uniformidad deseado es de 0.8 se tiene que la PES a utilizar en el diseño es de 21.71 mca. Por otro lado y a partir de la tolerancia de presiones se obtiene que la presión mínima en el submódulo debe ser de 14.94 mca. Teniendo estos resultados se procede a realizar el diseño del submódulo usando la metodología planteada en el diagrama de flujo que se presentó en la Figura 23. Para esto, el primer paso es realizar los diseños del submódulo partiendo de la Flecha 0 y la Flecha 0.25. Estos diseños corresponden a lo que se denomina diseño D₁ y diseño D₂. En la siguiente tabla se observan los resultados obtenidos para estos dos primeros diseños:

Tabla 17. Resultados diseños D₁ y D₂, Submódulo Asimétrico 2 Plano.

Diseños	$\sum_{i \in N} \text{Caudal } E_i$ (l/s)	CU ()	Presión Mínima (mca)	Nudos con Presión < P _{min} ⁶ ()	Costo (COP)
D ₁	19.3434	0.8412	14.949	0	7838950
D ₂	18.89113	0.8356	14.637	40	7590520

En la Tabla 17 se puede observar que el diseño D₁ (diseño obtenido a partir de la Flecha 0) es un diseño factible, donde todos sus nudos cumplen con la presión mínima (14.94 mca) y el Coeficiente de Uniformidad resulta mayor al deseado. Por el contrario, el diseño D₂ (diseño obtenido a partir de la Flecha 0.25) aunque cumple con el CU deseado, presenta 40 nudos con presión por debajo de la presión mínima, y por esta razón aunque D₂ sea un diseño más económico que D₁, resulta no factible hidráulicamente. Haciendo uso de estos dos primeros diseños, se pueden obtener los caudales promedio en cada nudo *i* de manera que se pueda proceder a calcular un tercer diseño (D_j)⁷, con el cual se puede obtener un cuarto diseño y así sucesivamente hasta que finalmente se cumpla que D_j sea factible y ($Q_{totalj} - Q_{total2} \leq \text{Diferencia}_{deseada}$). Los resultados obtenidos finalmente se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 18. Resultados de los diseños promedio D_j, Submódulo Asimétrico 2 Plano.

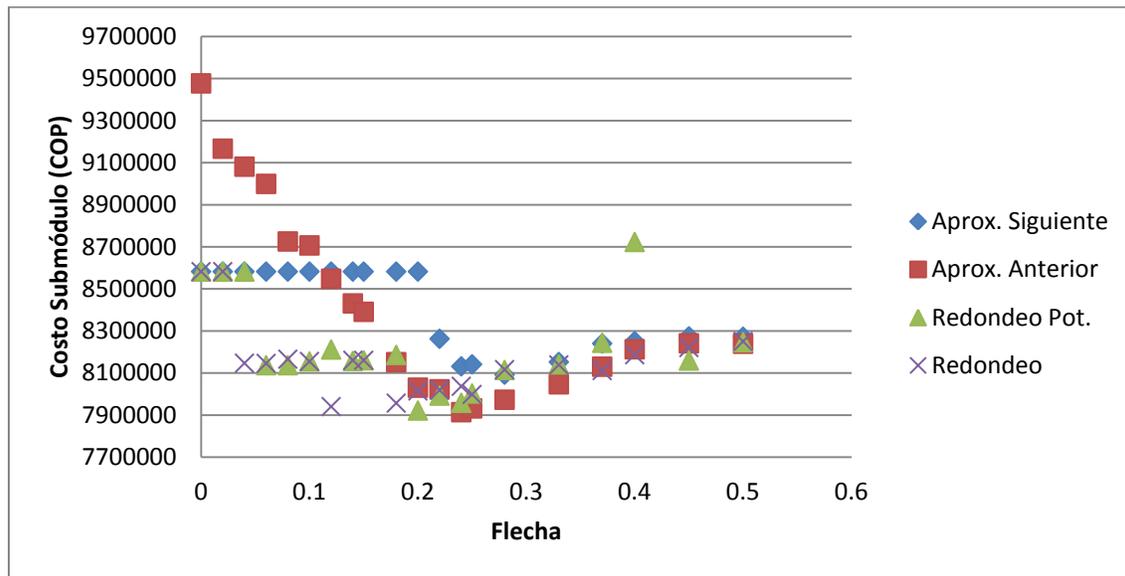
Diseño Promedio (D _j)	$\sum_{i \in N} \text{Caudal } E_{ji}$ (l/s)	CU ()	Presión Mínima (mca)	Nudos con Presión < P _{min} ()	Costo (COP)
1	19.22514969	0.8391	14.862	9	7747716
2	19.28909043	0.8397	14.915	1	7785937
3	19.29083858	0.8412	14.95	0	7787082

Como puede verse en la Tabla 18 fue necesario realizar 3 diseños adicionales para llegar al resultado definitivo. El primer diseño promedio (D_j) sigue siendo no factible pero el número de nudos por debajo de la presión mínima deseada pasó de ser 40 en D₂ a tan solo 9. De esta manera, siguiendo el algoritmo de la Figura 23, el primer diseño D_j pasaría a ser el diseño D₂ y sus caudales se promedian con los del diseño D₁ original; de esta manera se obtuvo el segundo diseño promedio (D_j), el cual no es factible, pero únicamente presenta 1 nudo por debajo de la presión mínima. El proceso continúa, y se realiza un tercer diseño promedio. Como se observa en la Tabla 18 el tercer diseño promedio es un diseño factible (CU mayor a 0.8 y ningún nudo con presión

⁶ P_{min} corresponde a la presión mínima deseada.

⁷ Es importante recordar al lector que el diseño D_j corresponde en cada iteración al diseño obtenido mediante programación lineal, a partir de los caudales promedio de los dos diseños anteriores.

menor a 14.94 mca) y presenta un costo de \$ 7, 787,082. Al comparar este costo final con los obtenidos mediante la metodología SOGH se observa el siguiente resultado:



Gráfica 3-44. Comparación de la relación Costo-Flecha usando SOGH y utilizando 4 criterios de redondeo, con el costo del diseño obtenido mediante la metodología propuesta. Submódulo Asimétrico 2 Plano.

Mediante los resultados obtenidos, que se presentan en la Gráfica 3-44, se puede evaluar el desempeño de la metodología planteada en este trabajo. Se aprecia el costo final del submódulo obtenido a partir de diferentes flechas de diseño y utilizando los 4 criterios de redondeo planteados por Ochoa (2009). Para el caso de la metodología SOGH el diseño más económico corresponde a un diseño obtenido mediante la Flecha 0.24 y el criterio de redondeo de aproximación al siguiente diámetro, para un costo mínimo de \$ 7, 913,646. Por otro lado el costo del diseño obtenido mediante la metodología planteada es de de \$ 7, 787,082, que representa una reducción del 1.6 % (COP\$ 126,563.0) en el costo total del submódulo.

Como se pudo observar, en esta sección, la metodología planteada que hace uso de programación lineal en conjunto con SOGH, permite obtener un diseño factible de forma rápida y conlleva a un diseño más económico que la metodología SOGH planteada por Ochoa (2009). En las siguientes secciones se presentarán los resultados obtenidos para otros casos de estudio.

3.4.4.1.2. Caso de Estudio 2, Submódulo Simétrico Plano.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para un submódulo de riego plano, donde la longitud de los laterales a ambos lados de la tubería múltiple es igual. Los datos de entrada para este submódulo corresponden exactamente a los mismos utilizados para el caso de estudio 1 (ver Tabla 15, Tabla 16 y Gráfica 3-35). En la siguiente figura se presenta un esquema del submódulo:

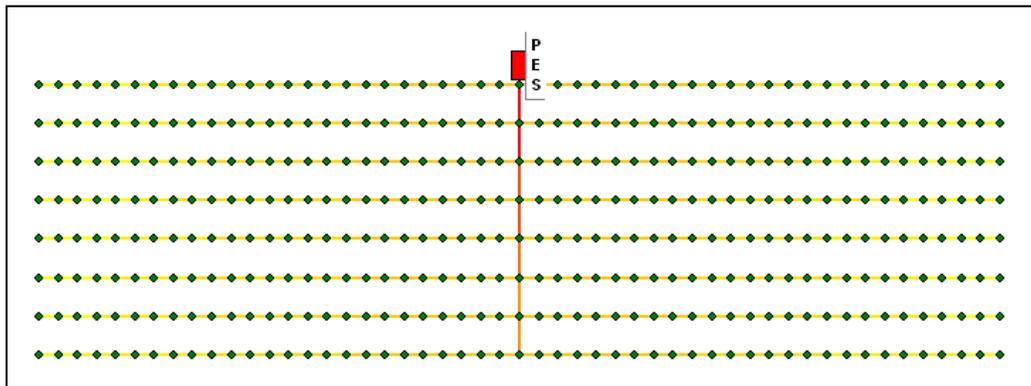
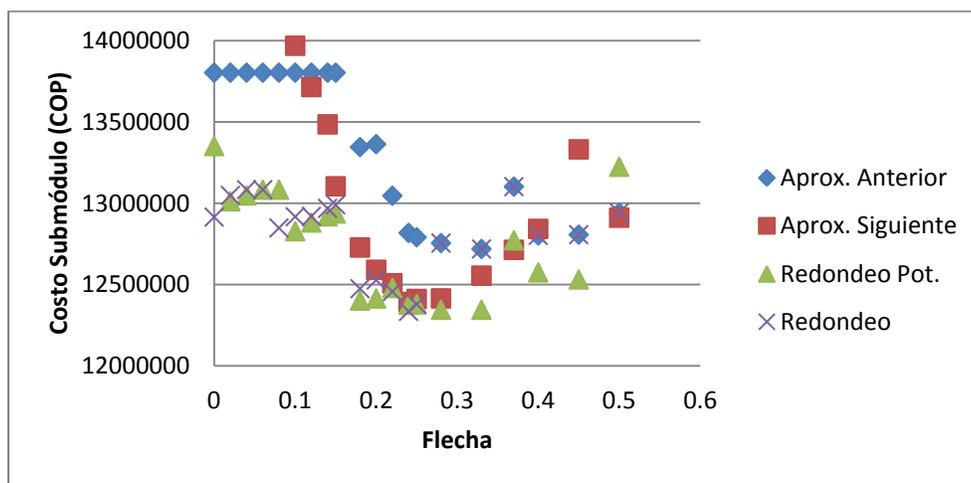


Figura 25. Caso de estudio 3, Submódulo Simétrico Plano.

Al igual que en el caso de estudio 1, en este submódulo se realizó el diseño usando la metodología planteada en este trabajo y se compararon sus resultados con los diseños obtenidos mediante la metodología planteada por Ochoa. En la Gráfica 3-45 se presentan los resultados finales obtenidos para este submódulo, donde se puede observar que nuevamente la metodología planteada resulta más económica que los diseños realizados utilizando SOGH.



Gráfica 3-45. Comparación de la relación Costo-Flecha usando SOGH y utilizando 4 criterios de redondeo, con el costo del diseño obtenido mediante la metodología propuesta. Submódulo Simétrico Plano.

Para el caso de la metodología SOGH el diseño más económico corresponde a un diseño obtenido mediante la Flecha 0.24 y el criterio de redondeo de aproximación al diámetro comercial más cercano, para un costo mínimo de COP \$ 12, 334,934. Por otro lado el costo del diseño obtenido mediante la metodología planteada es de de COP \$ 12, 168,800, que representa una reducción del 1.36 % (COP\$ 166,134) en el costo total del submódulo.

3.4.4.2. *Caso de Estudio 3, Submódulo Asimétrico 2 con Topografía Variable.*

En esta sección se presenta el tercer caso de estudio que resulta de gran importancia debido a que permite evaluar la metodología planteada, en submódulos de riego con topografía variable. En la práctica resulta poco común encontrar submódulos de riego en los cuales la topografía sea plana como los presentados en los casos de estudio 1 y 2. De esta manera, para el caso de estudio 3 se planteó un submódulo teórico con topografía variable tal como se muestra en la siguiente figura:

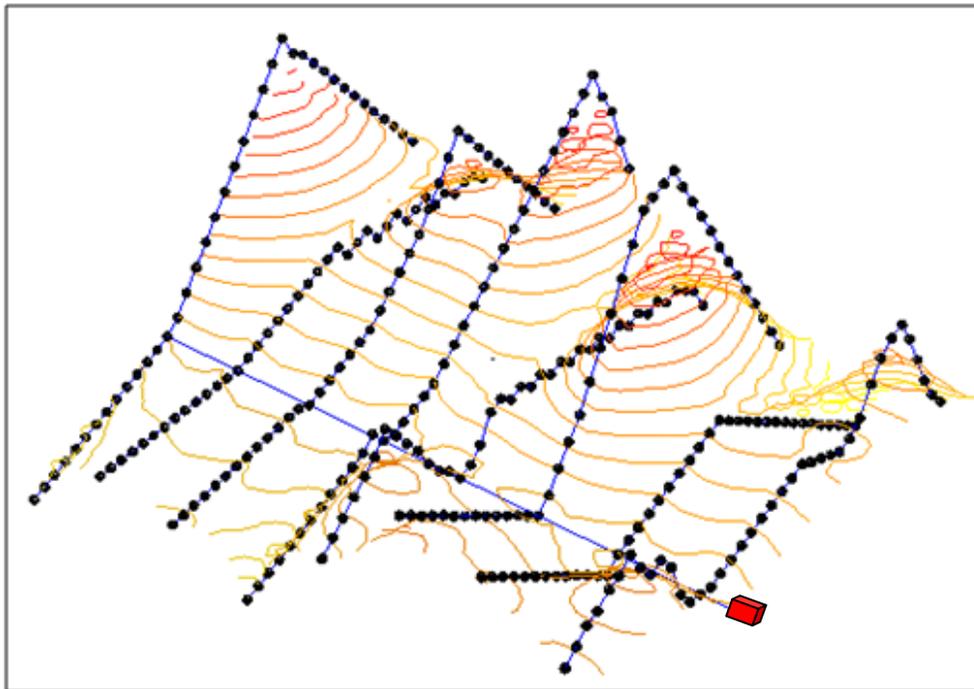


Figura 26. Caso de Estudio 3, Submódulo Asimétrico 2 con Topografía Variable.

Como se observa en la Figura 26 el submódulo de riego correspondiente al caso de estudio 3, es un submódulo en donde la topografía es completamente variada. De esta manera, el nudo crítico (nudo donde se presentará la presión más baja) puede encontrarse en cualquier punto del sistema; contrario a lo que sucede en submódulos de riego planos donde el nudo crítico estará

ubicado en el punto más alejado de la fuente de abastecimiento de agua. A continuación se presentan los datos de entrada utilizados para empezar el diseño.

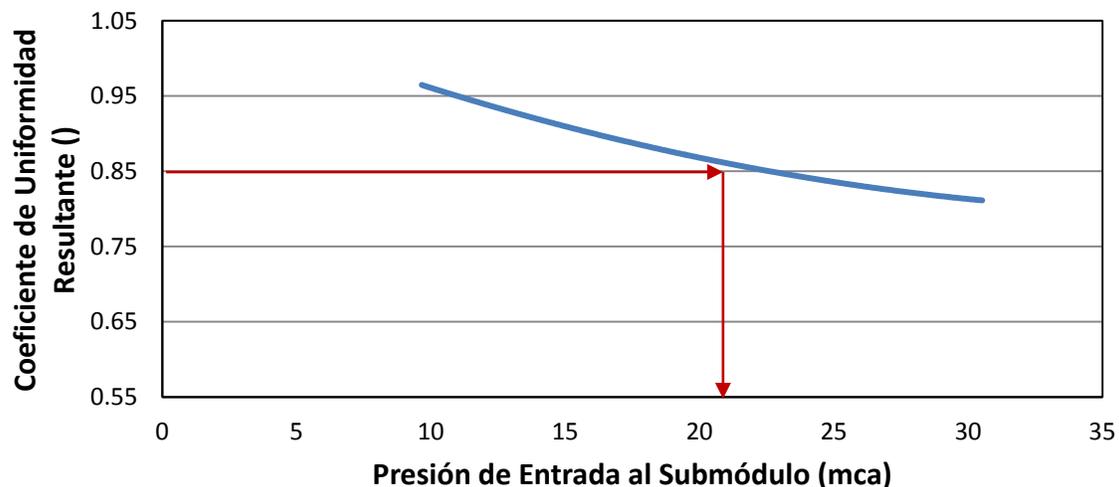
Tabla 19. Datos agronómicos de entrada, Submódulo Asimétrico 2 con Topografía Variable.

DATOS AGRONÓMICOS			
Coefficiente de uniformidad (CU)	Número de emisores por planta (n_e)	Presión media de operación (h_m)	Caudal medio por emisor (Q_m)
($\%$)	($\%$)	(mca)	(l/h)
0.85	2	14.32	80

Tabla 20. Datos de entrada de los emisores, Submódulo Asimétrico 2 con Topografía.

Coefficiente de variación del emisor (CV)	0.04
Exponente del emisor	0.3
Coefficiente del emisor (l/s)/(m ^x)	0.01

A partir de los datos de entrada presentados en la Tabla 19 y Tabla 20 y haciendo uso de la metodología de Bermúdez (2011), se obtiene la siguiente curva para determinar la presión de entrada al submódulo (PES).



Gráfica 3-46. Curva CU vs PES. Submódulo Asimétrico 2 con Topografía.

Con base en la Gráfica 3-46 obtenida a partir del algoritmo planteado por Bermúdez (2011) y teniendo en cuenta que el Coeficiente de Uniformidad deseado es de 0.85 se tiene que la PES a

utilizar es de 22.57 mca. Por otro lado y a partir de la tolerancia de presiones se obtiene que la presión mínima en el submódulo debe ser de 9.41 mca. Teniendo estos resultados se procede a realizar el diseño del submódulo usando la metodología planteada. Para esto, el primer paso es realizar los diseños del submódulo partiendo de la Flecha 0 y la Flecha 0.25. Estos diseños corresponden a lo que se denomina diseño D_1 y diseño D_2 . En la siguiente tabla se observan los resultados obtenidos para estos dos primeros diseños:

Tabla 21. Resultados diseños D_1 y D_2 , Submódulo Asimétrico 2 con Topografía.

Diseños	$\sum_{i \in N} \text{Caudal} E_i$ (l/s)	CU ()	Presión Mínima (mca)	Nudos con Presión < P_{\min} ()	Costo (COP)
D_1	13.0838176	0.8820	9.56	0	5129056
D_2	13.0465654	0.8655	8.89	20	5083611

Tal como se muestra en la tabla superior, los diseños D_1 y D_2 cumplen con el Coeficiente de Uniformidad deseado de 0.85, pero únicamente el diseño D_1 (diseño obtenido a partir de la Flecha 0) no presenta nudos con presión por debajo de la mínima. El diseño D_2 (diseño obtenido a partir de la Flecha 0.25) presenta 20 nudos con déficit de presión, con una presión en el nudo crítico de 8.89 mca (52 cm de columna de agua por debajo de la presión mínima). Usando los resultados de los caudales emitidos en los diseños D_1 y D_2 se pueden obtener caudales promedio en cada nudo i de manera que se proceda a calcular un tercer diseño (D_j), con el cual se puede obtener un cuarto diseño y así sucesivamente hasta que finalmente se cumpla que D_j sea factible y $(Q_{totalj} - Q_{total2} \leq \text{Diferencia}_{deseada})$. Los resultados obtenidos finalmente se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 22. Resultados de los diseños promedio D_j , Submódulo Asimétrico 2 con Topografía Variable.

Diseño Promedio (D_j)	$\sum_{i \in N} \text{Caudal} E_{ji}$ (l/s)	CU ()	Presión Mínima (mca)	Nudos con Presión < P_{\min} ()	Costo (COP)
1	13.0652	0.8764	9.37	3	5100632
2	13.0559	0.8826	9.498	0	5098791
3	13.0457	0.8828	9.5	0	5098791

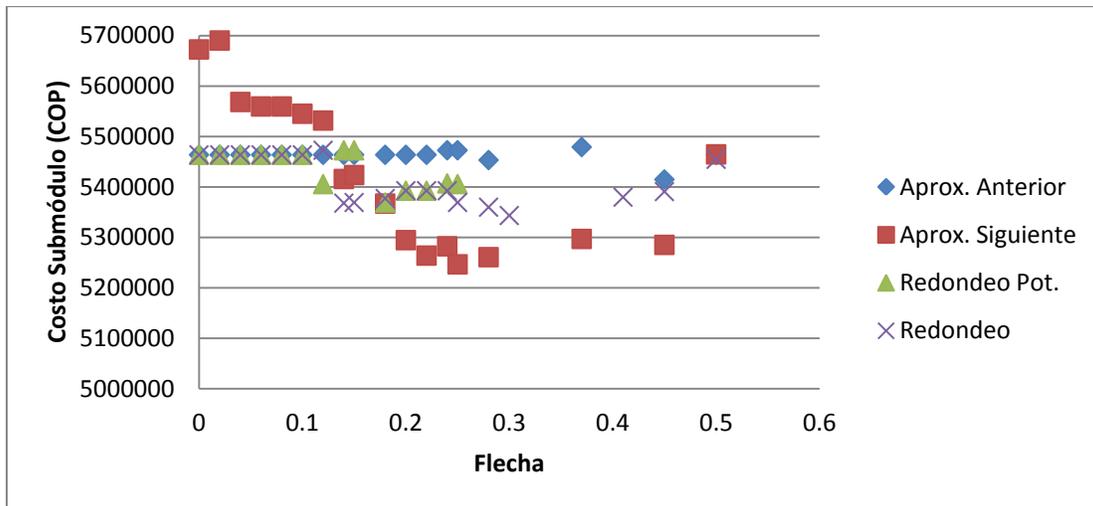
De la Tabla 22 se puede concluir que fue necesario realizar dos diseños promedio a fin de obtener un diseño factible. En esta tabla se puede ver que en el primer diseño promedio, el número de nudos por debajo de la presión mínima pasó de ser 20 en D_2 a tan solo 3. De esta manera, siguiendo el algoritmo de la Figura 23 el primer diseño D_j pasaría a ser el diseño D_2 y sus caudales

se promedian con el diseño D_1 original, para de esta manera obtener el segundo diseño promedio (D_j), el cual resulta factible. Observando los resultados presentados en la Tabla 22 queda establecido que el segundo diseño promedio es un diseño factible de manera que éste pasa a reemplazar el diseño D_1 y sus caudales se promediaron con los caudales del diseño D_2 , que para esta iteración corresponden a los del primer diseño promedio. Al realizar el tercer diseño promedio, se observa que nuevamente, el número de nudos con déficit de presión es cero y dado que D_j es factible y $(Q_{totalj} - Q_{total2} \leq Diferencia_{deseada})$ se decide terminar el proceso de diseño. Es importante hacer notar al lector que el costo del segundo diseño promedio y el tercero, son iguales; pero esto no quiere decir que el diseño sea exactamente igual en cuanto a la distribución de diámetros. Los diseños promedio 2 y 3 tienen 304 tuberías con el mismo diámetro asignado, únicamente 8 tubos presentan un diámetro diferente entre los dos diseños. En la siguiente tabla se presentan los diámetros asignados a las 8 tuberías en las que los diámetros difieren entre los dos diseños:

Tabla 23. Diámetros asignados por Xpress en las 8 tuberías diferentes entre el segundo y el tercer diseño promedio. Submódulo Asimétrico 2 con Topografía.

ID Tubería	Longitud Tubería (m)	Diámetro Asignado en el diseño promedio (mm)		Costo del tubo (COP)	
		$D_j 2$	$D_j 3$	$D_j 2$	$D_j 3$
73	5.009	25.4	19.05	17404.16	10836.25
74	5.009	19.05	25.4	10836.25	17404.16
99	5.001	19.05	25.4	10818.94	17376.36
101	5.001	25.4	19.05	17376.36	10818.94
151	5.004	19.05	25.4	10825.43	17386.78
152	5.004	25.4	19.05	17386.78	10825.43
162	5.001	25.4	31.75	17376.36	25093.98
163	5.001	31.75	25.4	25093.98	17376.36
Suma (COP \$)				127118.3	127118.3

En la Tabla 23 se muestran los diámetros, longitudes y costo de las 8 tuberías en los que difieren el segundo y tercer diseño promedio. Como se puede observar aunque los 8 tubos presentan un diámetro diferente entre un diseño y otro, la suma de los costos de los 8 tubos es exactamente igual, pero como se dijo anteriormente esto es únicamente una coincidencia. De esta manera y habiendo aclarado los resultados obtenidos en la Tabla 22, se escoge como diseño final el tercer diseño promedio, el cual presenta un costo de COP \$ 5, 098,791 y que en comparación con la metodología SOGH, resulta más económico, como se observa en la Gráfica 3-47.



Gráfica 3-47. Comparación de la relación Costo-Flecha usando SOGH y utilizando 4 criterios de redondeo, con el costo del diseño obtenido mediante la metodología propuesta. Submódulo Asimétrico 2 con Topografía Variable.

Como puede verse en la Gráfica 3-47 la metodología propuesta para el diseño de submódulos de riego resulta en un diseño más económico que al emplear la metodología propuesta por Ochoa. Al diseñar haciendo uso de la metodología SOGH variando el valor de la flecha de diseño y utilizando los cuatro criterios de redondeo (Aproximación al siguiente, Aproximación al anterior, Redondeo potencial y Redondeo al diámetro más cercano) mostrados en la Gráfica 3-47, se obtiene que el diseño del submódulo que presenta el menor costo es el de la Flecha 0.25 con criterio de aproximación al diámetro comercial siguiente, para un costo total de COP \$ 5, 246,523. Si se compara el costo del diseño más económico de la metodología SOGH con respecto al costo obtenido mediante la metodología propuesta, se observa que la nueva metodología conlleva a un costo 2.9% por debajo del más económico de SOGH, y esto corresponde a una reducción de COP \$ 147,732.

De esta manera y habiendo visto los resultados obtenidos para este caso de estudio, en el cual se tienen variaciones en la topografía a lo largo del submódulo, se observa que el desempeño de la metodología propuesta para submódulos de riego utilizando programación lineal en conjunto con SOGH resulta bastante buena y permite obtener una reducción en los costos finales del submódulo.

3.4.4.3. Caso de Estudio 4, Submódulo Asimétrico 3 con Topografía Variable.

En esta sección se estudia un nuevo submódulo en el cual los laterales de riego no son rectos y todos presentan longitudes diferentes. Adicionalmente, el submódulo presenta una topografía generada mediante números aleatorios y de esta manera, ningún nudo del sistema tiene la misma elevación de otro nudo (ver Figura 27 y Figura 28).

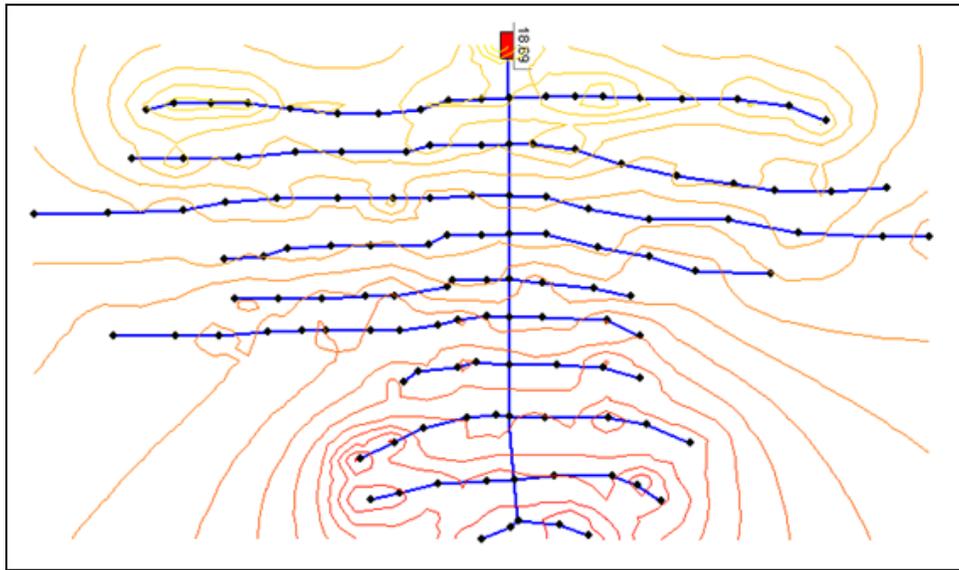


Figura 27. Caso de Estudio 3, Submódulo Asimétrico 3 con Topografía Variable, vista en planta.

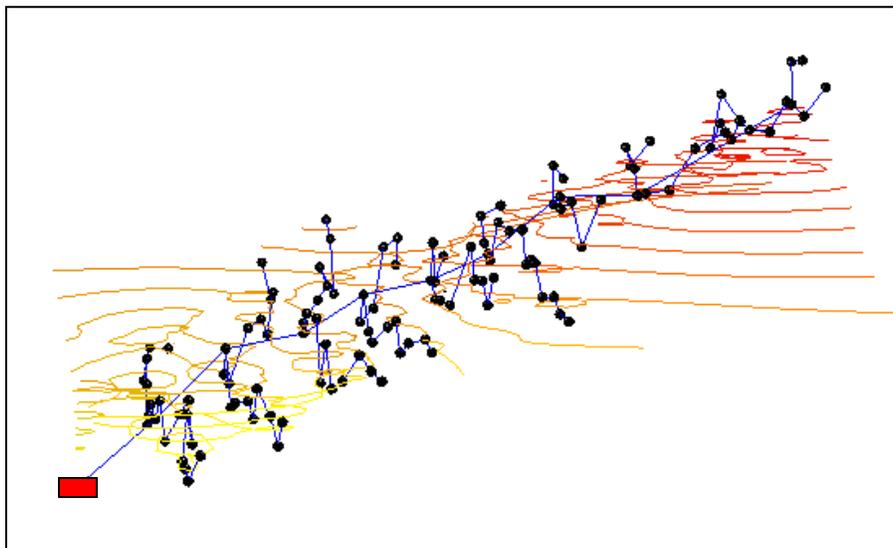


Figura 28. Caso de Estudio 4, Submódulo Asimétrico 3 con Topografía Variable, vista en perfil.

Como puede observarse en la Figura 27 y la Figura 28 los nudos del sistema presentan diferentes alturas topográficas, pero el sistema en sí tiene una tendencia a aumentar su elevación a medida que se aleja de la fuente de abastecimiento; de esta manera, los laterales más alejados de la entrada al submódulo presentan la mayor elevación y por lo tanto serán los que presentarán presiones más críticas, al estar más alejados y presentar un altura topográfica superior a la de la entrada. Para este caso de estudio los valores de entrada al problema de diseño fueron:

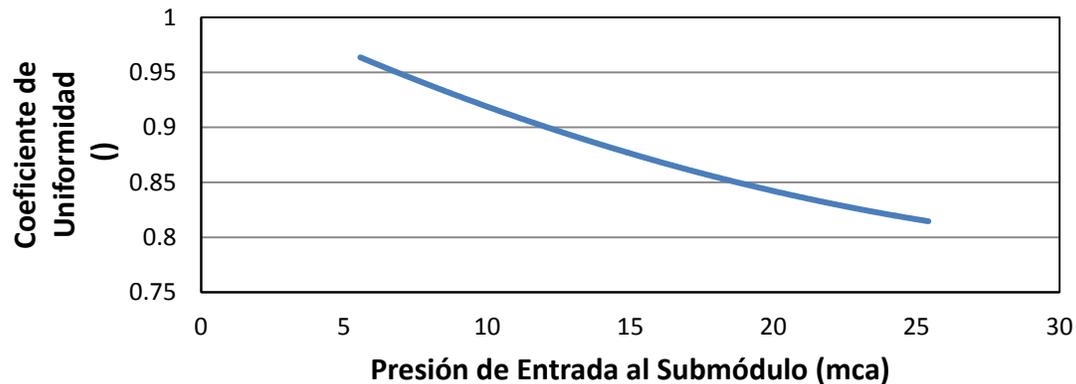
Tabla 24. Datos agronómicos de entrada, Submódulo Asimétrico 3 con Topografía Variable.

DATOS AGRONÓMICOS			
Coefficiente de uniformidad (CU)	Número de emisores por planta (n_e)	Presión media de operación (h_m)	Caudal medio por emisor (Q_m)
()	()	(mca)	(l/h)
0.85	2	10.00	80

Tabla 25. Datos de entrada de los emisores, Submódulo Asimétrico 3 con Topografía Variable.

Coefficiente de variación del emisor (CV)	0.04
Exponente del emisor	0.2
Coefficiente del emisor (l/s)/(m ^x)	0.01402127

de donde se obtiene la curva CU vs PES establecida por Bermúdez (2011):



Gráfica 3-48. Curva CU vs PES. Caso de estudio 3, Submódulo Asimétrico 3 con Topografía Variable.

Con base en la Gráfica 3-48 obtenida a partir del algoritmo planteado por Bermúdez (2011) y teniendo en cuenta que el Coeficiente de Uniformidad deseado es de 0.85 se tiene que la PES a utilizar es de 18.69 mca. Por otro lado y a partir de la tolerancia de presiones se obtiene que la presión mínima en el submódulo debe ser de 5.33 mca. Teniendo estos resultados se procede a realizar el diseño del submódulo usando la metodología planteada. Para esto, el primer paso es realizar los diseños del submódulo partiendo de la Flecha 0 y la Flecha 0.25. Estos diseños corresponden a lo que se denomina diseño D_1 y diseño D_2 . En la siguiente tabla se observan los resultados obtenidos para estos dos primeros diseños:

Tabla 26. Resultados diseños D_1 y D_2 , Submódulo Asimétrico 3 con Topografía Variable.

	$\sum_{i \in N} \text{Caudal } E_i$	CU	Presión Mínima	Nudos con Presión $< P_{\min}$	Costo
Diseños	(l/s)	()	(mca)	()	(COP)
D_1	5.05644	0.88285	5.366	0	1756991
D_2	5.03981	0.87810	5.137	5	1735176

Tal como se muestra en la tabla superior, los diseños D_1 y D_2 cumplen con el Coeficiente de Uniformidad deseado de 0.85, pero únicamente el diseño D_1 no presenta nudos con presión por debajo de la mínima, por su parte el diseño D_2 presenta 5 nudos con déficit de presión. Usando los resultados de los caudales emitidos en los diseños D_1 y D_2 se pueden obtener caudales promedio en cada nudo i de manera que se proceda a calcular el siguiente diseño (D_j), con el cual se puede obtener un tercer diseño, del cual se presentan sus resultados en la siguiente tabla:

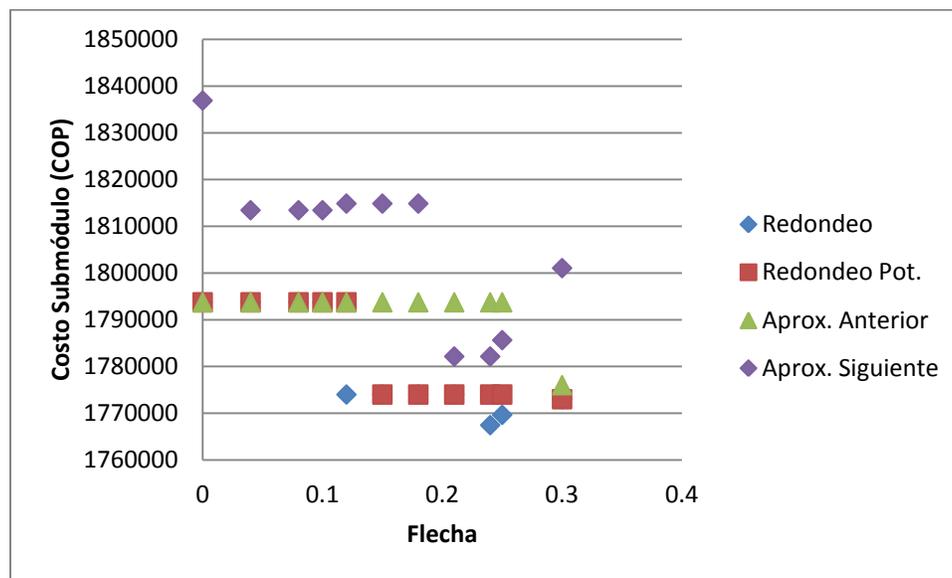
Tabla 27. Resultados del diseño promedio D_j , Submódulo Asimétrico 3 con Topografía Variable.

	$\sum_{i \in N} \text{Caudal } E_{ji}$	CU	Presión Mínima	Nudos con Presión $< P_{\min}$	Costo
Diseño Promedio (D_j)	(lps)	()	(mca)	()	(COP)
1	5.05644	0.88285	5.366	0	1756991

Si se observa con cuidado la Tabla 27 en conjunto con la Tabla 26 se puede ver que el primer diseño promedio dio exactamente el mismo resultado del diseño D_1 . Cuando sucede esto, el algoritmo termina y se obtiene como resultado el primer diseño promedio. Es importante mencionar que el proceso de convergencia en los diseños de submódulos de riego, será más rápido en la medida en que el exponente de los emisores disminuya. Los resultados obtenidos en el diseño del caso de estudio 4 muestran que tarde o temprano el algoritmo tiene que converger a un mismo diseño, pero como se dijo, este proceso tardará más entre mayor sea el exponente del

emisor. De esta manera, el caso más sencillo en el diseño de submódulos de riego usando la metodología propuesta corresponde al de emisores autocompensantes (exponente de emisor $x=0$); este caso se presentará en la Sección 3.4.4.4.

Finalmente y volviendo al caso de estudio que corresponde a esta sección, se obtuvo que el costo del submódulo mediante la metodología planteada es de COP \$ 1, 756,991. Si se compara el costo obtenido a partir de la metodología propuesta, con los costos que se obtienen utilizando la metodología SOGH se tiene la siguiente gráfica comparativa:



Gráfica 3-49. Comparación de la relación Costo-Flecha usando SOGH y utilizando 4 criterios de redondeo, con el costo del diseño obtenido mediante la metodología propuesta. Submódulo Asimétrico 3 con Topografía Variable.

De la misma manera como sucedió para los casos de estudio 1, 2 y 3, en este caso el diseño obtenido mediante la metodología propuesta resultó más económico que los diseños obtenidos mediante la metodología SOGH. El menor costo (COP \$ 1, 767,447) mediante la metodología SOGH corresponde al diseño con la Flecha 0.24 y un criterio de redondeo al diámetro comercial más cercano; la diferencia entre este costo y el obtenido mediante la metodología propuesta es de diez mil quinientos pesos (COP \$ 10,456) que corresponde a una diferencia del 0.6 %.

Teniendo los resultados presentados en las secciones 3.4.4.1, 3.4.4.2 y 3.4.4.3 se puede concluir que la metodología planteada conlleva a diseños óptimos. Es importante anotar que los cuatro casos de estudios presentados hasta ahora corresponden a submódulos con características completamente diferentes. Los cuatro casos de estudio difieren en su topografía, ecuación del emisor, topología, caudal medio por planta, Coeficiente de Uniformidad, PES y Presión mínima.

3.4.4.4. Caso de Estudio 5, Submódulo con Emisores Autocompensantes.

En esta sección se presenta un submódulo de riego en el cual se tienen emisores autocompensantes. Es importante recordar al lector que un emisor autocompensante es aquel en el que el exponente de la ecuación del emisor es cero (0), implicando que el caudal que sale por cada nudo es independiente de la presión que se tenga en el punto. El submódulo que se utilizó como ejemplo para este caso es un ejemplo teórico con una pendiente del 100%, como se puede ver en la siguiente figura:

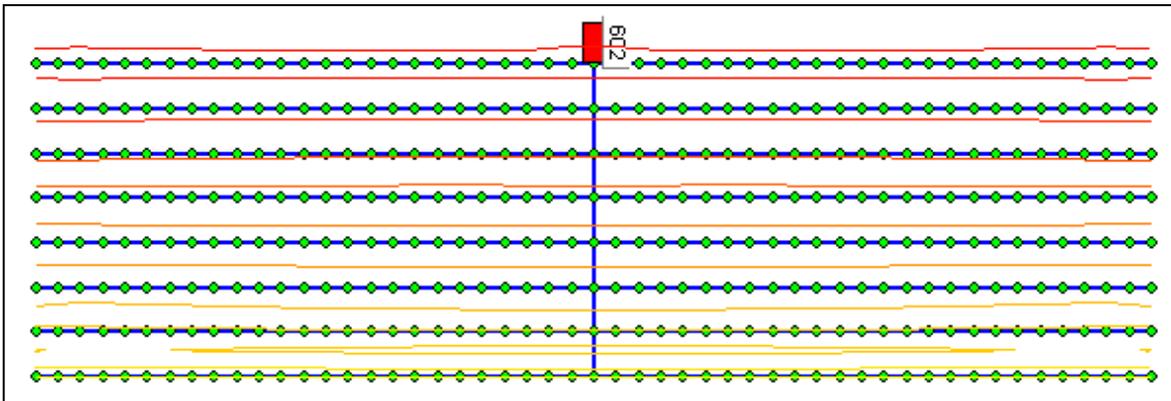
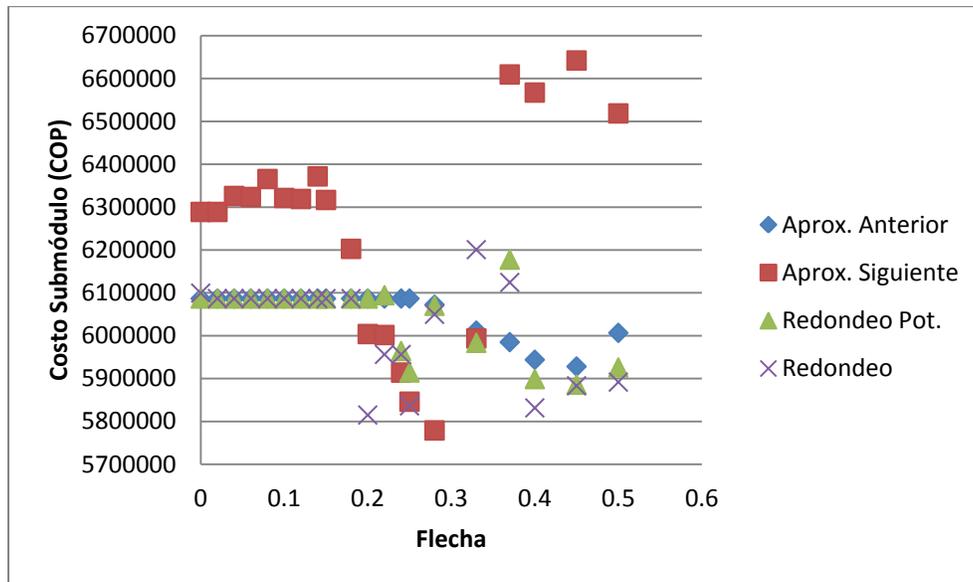


Figura 29. Caso de Estudio 5, Submódulo con Emisores Autocompensantes, vista en planta.

En la Figura 29 se puede ver que el submódulo presenta una pendiente topográfica en la cual entre más alejado se encuentre el lateral de riego, menor elevación topográfica tendrá. Este tipo de submódulo se asemeja a los submódulos de riego utilizados en los cultivos de café.

Para este caso de estudio y al hacer uso de emisores autocompensantes, el diseñador debe definir por sí mismo, la presión de entrada al submódulo que desea tener o la presión que las condiciones hidráulicas aguas arriba de la entrada le permiten alcanzar. Adicional a esto, el diseñador definirá una presión mínima deseada en el submódulo y asignará el caudal que desee que se emita a cada planta. En el caso que se presenta en esta sección se escogió una presión de entrada al submódulo de 17 mca y una presión mínima de 5 mca; por su parte, el caudal que se asignó a cada nudo fue de 0.045 l/s. Teniendo en cuenta que se tienen emisores autocompensantes no es necesario seguir el diagrama de flujo presentado en la Figura 23, esto quiere decir que no es necesario definir ninguna superficie de gradiente hidráulico y únicamente se requiere realizar el diseño directamente usando programación lineal para obtener los diámetros del submódulo, que por ser de emisores autocompensantes se comporta como una red abierta con demanda constante en sus nudos de consumo. Teniendo en cuenta lo anterior en la siguiente gráfica se presentan los resultados de comparación entre el diseño usando programación lineal y el diseño que se obtendría usando diferentes flechas de diseño y la metodología SOGH:



Gráfica 3-50. Comparación de la relación Costo-Flecha usando SOGH y utilizando 4 criterios de redondeo, con el costo del diseño obtenido mediante programación lineal. , Submódulo con Emisores Autocompensantes.

Como era de esperarse, el diseño haciendo uso de programación lineal resultó más económico que los diseños obtenidos mediante SOGH. El diseño más económico mediante la metodología SOGH corresponde a una flecha de 0.28 y un criterio de redondeo de aproximación al siguiente diámetro comercial y su costo es de COP \$ 5, 778,819. Por su parte el costo del diseño obtenido con programación lineal es de COP \$ 5, 666,668 implicando una diferencia de COP \$ 112,151. Es importante aclarar que para este caso de estudio todos los diseños de SOGH y el diseño mediante programación lineal cumplieron con el coeficiente de uniformidad y la presión mínima en todos sus nudos.

Este caso de estudio resulta importante debido a que para éste se realizó un análisis de sensibilidad. El objetivo era determinar que implicaciones tenía sobre el resultado final del submódulo, una variación en el coeficiente (K) o el exponente de la curva de costos (x) (ver Ecuación 3.9).

$$C = \sum_{i=1}^{NT} K * L_i * (D_i^x)$$

Ecuación 3.9

Aunque ya se ha mencionado anteriormente, es importante recordar que en la Ecuación 3.9 NT hace referencia al número de tubos en el sistema, K corresponde al coeficiente de la curva de costos, L_i es la longitud de la tubería i, D_i el diámetro de la tubería i y x es el exponente de la curva

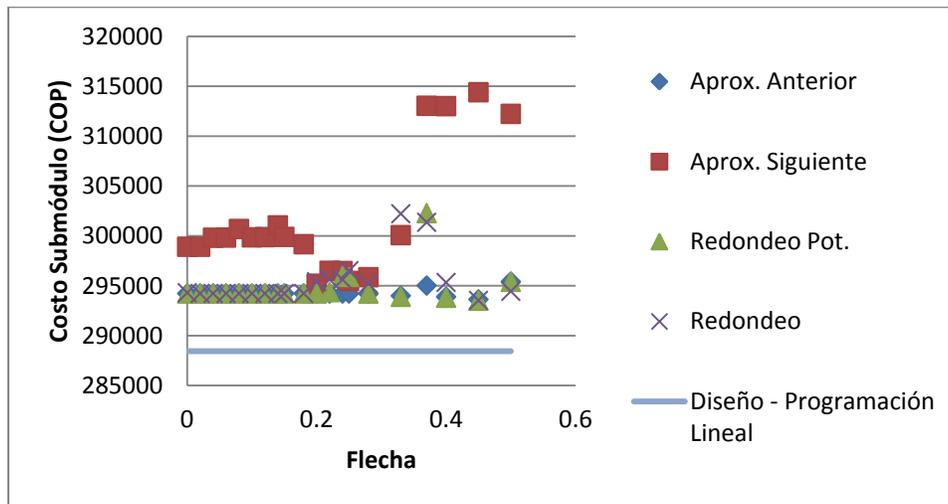


de costos. De esta manera, se plantearon diferentes curvas de costos a la original en donde el Coeficiente K es de 16.871 y el exponente x es de 1.647; en la siguiente tabla se presentan los valores de K y x que se utilizaron:

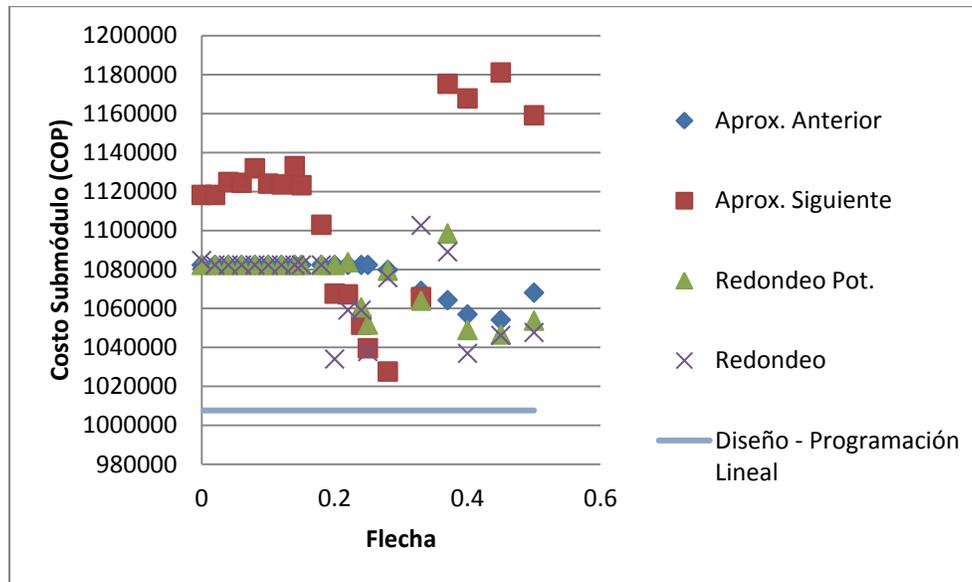
Tabla 28. Valores de K y x utilizados para crear diferentes curvas de costos.

Curva de Costo	K	x
C ₁	16.871	1.647
C ₂	16.871	0.7
C ₃	3	1.647

En la Tabla 28 se observan 3 curvas de costos utilizadas para el análisis de sensibilidad realizado. Se puede ver que la curva de costos C₁ corresponde a la que se utilizó para todos los casos de estudio mostrados anteriormente y corresponde a la curva de costos obtenida a partir de las tuberías que suministra la empresa PAVCO S.A., las demás curvas mostradas son variaciones teóricas de la curva original. Los resultados comparativos entre SOGH y programación lineal con la curva de costos C₁ son los que se presentaron en la Gráfica 3-50 en las siguientes gráficas se observa la comparación entre ambas metodologías usando C₂ y C₃.



Gráfica 3-51. Comparación de la relación Costo-Flecha usando SOGH y utilizando 4 criterios de redondeo, con el costo del diseño obtenido mediante programación lineal. Caso de estudio 5 usando la curva de costos C₂.



Gráfica 3-52. Comparación de la relación Costo-Flecha usando SOGH y utilizando 4 criterios de redondeo, con el costo del diseño obtenido mediante programación lineal. Caso de estudio 5 usando la curva de costos C_3 .

Como puede observarse en la Gráfica 3-51 y la Gráfica 3-52, el diseño usando programación lineal siempre resulta más económico que los diseños de SOGH, independiente de la curva de costos utilizada. Lo que se puede esperar es que el único caso en que el diseño de SOGH y el diseño mediante programación lineal tengan el mismo costo es en un caso hipotético en el que el exponente de la curva de costos sea igual a cero (0). En el caso en que el exponente de la curva de costos sea 0 el costo del sistema únicamente será función de la longitud de las tuberías y del coeficiente de la curva de costos. Para este caso, la metodología SOGH establecerá un diseño igual al obtenido en el caso inicial, ya que la forma en que SOGH asigna los diámetros es independiente de la curva de costos. Por otro lado la formulación lineal presentará una gran cantidad de soluciones factibles, donde una de ellas será un diseño en el que todos los tubos del sistema tengan el diámetro máximo; sin embargo, a pesar de que se asigne el máximo diámetro disponible, dado que el exponente de la curva de costos es 0 entonces el diseño tendrá el mismo costo establecido por la metodología SOGH.

4. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se presentaron diferentes análisis, diseños, metodologías y comparaciones. Primero se presentó un resumen de lo que se conoce de sistemas de riego localizado de alta frecuencia, después se realizó un análisis de la metodología SOGH y su aplicación al diseño de submódulos de riego y finalmente se presentó una nueva metodología para el diseño de sistemas de submódulos de riego. Teniendo en cuenta lo mostrado a lo largo de este documento se puede concluir:

- El uso de programación lineal en conjunto con la metodología SOGH permitió obtener una metodología de diseño de submódulos de riego que conlleva a diseños que cumplen con las restricciones hidráulicas y agronómicas y que a su vez resulta en diseños más económicos que los obtenidos por la metodología SOGH originalmente planteada por Ochoa (2011).
- La metodología planteada requiere de un proceso iterativo basado en el algoritmo de bisección para poder llegar a un diseño óptimo. Esto se debe a que existe una sensibilidad de los diseños obtenidos, respecto a la flecha a partir de la cual se plantea la superficie de gradiente hidráulico que permite establecer los caudales que se emitirán en los nudos del sistema.
- La metodología de diseño se probó para diferentes casos de estudio, donde cada caso de estudio presentó parámetros de entrada diferentes. En los diferentes diseños se cambiaron los caudales medios por emisor, la ecuación del emisor, la topología, CU y la topografía y se observó que siempre la metodología planteada presentaba menores costos que la metodología SOGH del 2009.
- Entre menor sea el exponente de la curva de los emisores en el submódulo, el proceso de convergencia del algoritmo será más rápido. Esto ocurre debido a que entre menor sea el exponente del emisor, se presentará una menor sensibilidad del caudal emitido con respecto a la presión en el punto de emisión.
- En los casos en que el submódulo presente emisores autocompensantes el diseñador debe definir la PES, la presión mínima y los caudales que desea en cada emisor del submódulo. En este caso la metodología planteada por Bermúdez no puede aplicarse dado que el exponente de la ecuación del emisor es 0 y resulta matemáticamente inviable.
- Cuando el submódulo de riego tiene emisores autocompensantes, el algoritmo planteado resulta innecesario y únicamente se requiere realizar un diseño mediante programación lineal en Xpress, que resultará en el diseño óptimo del sistema. Este diseño resulta ser el diseño óptimo global ya que al ser un problema



lineal no se presentan óptimos locales y solo se presenta un diseño óptimo que cumple con todas las restricciones establecidas en la formulación. Adicionalmente es importante mencionar que el tiempo que Xpress tarda en realizar un diseño es inferior a 1 segundo.

- La metodología SOGH es aplicable al diseño de submódulos de riego, llevando a diseños cuyo costo no es superior al 2% del óptimo obtenido mediante la metodología planteada.
- La flecha máxima de diseño de la metodología SOGH para el caso en que la última tubería tiene una longitud infinitesimal, es la flecha de 0.25. En este caso, la pendiente de la línea de gradiente hidráulico presenta una pendiente cero en el último punto del sistema y esto significaría hacer uso de una tubería de diámetro infinito con el fin de cumplir con las pérdidas objetivo de cero. Por otro lado, este caso es solo un caso teórico, y dado que la última tubería del sistema presentará una longitud no diferencial, el valor de la flecha máxima puede aumentar en función de la última tubería de la ruta crítica.
- En el caso de submódulos de riego, no es posible determinar la flecha óptima propuesta por Ochoa; esto ocurre porque en un submódulo de riego, con emisores no autocompensantes, no se conocen a priori los caudales emitidos en los nudos que componen el sistema.
- Al aplicar la metodología SOGH al diseño de submódulos de riego, La curva Costo-Flecha del diseño de diámetros continuos, presenta un patrón donde la flecha de mínimo costo es una flecha intermedia entre la flecha 0 y 0.25. Este patrón se mantiene para un mismo submódulo de riego, independientemente de las características de los emisores que se utilicen; sin embargo, la flecha que lleva al mínimo costo con diámetros continuos varía dependiendo de la topología de la red.
- Los resultados encontrados por Bermúdez, aunque no llevan a un diseño óptimo de forma directa, permiten determinar la relación que existe entre la presión de entrada al submódulo de riego y el coeficiente de uniformidad, de tal manera que se pueda establecer la presión a la entrada del submódulo, a partir de la cual no se cumplirá con el requerimiento agronómico de uniformidad.

5. RECOMENDACIONES

Con este trabajo surgió una nueva forma de diseñar submódulos de sistemas de riego localizado de alta frecuencia, que como bien es sabido, la metodología hace uso de programación lineal y su formulación surgió de un ejemplo sencillo de redes abiertas con demanda constante en sus nudos. De esta manera la formulación implementada en el programa Xpress se puede utilizar para realizar el diseño de cualquier sistema de tuberías en donde se conozca el camino que toma el fluido y el caudal que pasará por cada una de las tuberías que componen el sistema, permitiendo obtener de forma rápida el diseño óptimo global del sistema. Teniendo en cuenta lo mencionado y lo presentado a lo largo de este trabajo a continuación se presentan las siguientes recomendaciones para futuros estudios:

- Dado que la formulación matemática planteada en este trabajo es aplicable a redes abiertas con demanda constante, su uso para el diseño diferentes sistemas hidráulicos podría presentar resultados muy parecidos a los mostrados en este trabajo. A continuación se dan algunos ejemplos para futuras investigaciones:
 - Diseño de redes de distribución de agua potable (RDAP): En los últimos años se ha venido desarrollando en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) la metodología OPUS que busca obtener el diseño óptimo de RDAP. Esta metodología, que ha obtenido importantes resultados en sus investigaciones, presenta dentro de su algoritmo, una etapa en la cual la red cerrada se convierte en un árbol (red abierta). Al tenerse una red abierta y los caudales de diseño en cada tubería se puede proceder a utilizar la formulación planteada en este trabajo de tal forma que se tenga un diseño óptimo del árbol que se generó mediante la metodología OPUS. Una vez se tiene el diseño óptimo del árbol es necesario diseñar las tuberías que no se incluyeron en éste. Para esto es recomendable probar diferentes criterios de diseño de las tuberías faltantes de forma que se pueda obtener un diseño óptimo de una RDAP. Actualmente y con base en los resultados y programas del presente trabajo se han venido realizando los diseños de diferentes redes, y hasta la fecha se ha encontrado que para las redes R28 y Balerna se puede obtener un diseño óptimo.
 - Diseño de alcantarillados: Como bien es conocido, el conjunto de tuberías que conforman un sistema de drenaje urbano presenta una topología abierta. Teniendo una topología abierta y conociendo los caudales que pasan por cada una de las tuberías se puede hacer uso de la formulación lineal presentada en este trabajo, de manera que se obtenga un diseño óptimo. Es importante aclarar que se deben hacer algunas modificaciones en las restricciones de la formulación matemática, dado que el flujo en alcantarillados no es un flujo a presión.

Adicionalmente se deben agregar restricciones que se presentan en estos tipos de sistemas; por ejemplo, cuando se tiene flujo cuasicrítico la relación de llenado de las tuberías no puede ser mayor al 70% y que en cada tubería se debe cumplir con una velocidad mínima (para asegurar la autolimpieza) y velocidad máxima (por seguridad).

- Diseño de tuberías en serie: El diseño con programación lineal, de tuberías en serie con demanda constante en los nudos de consumo es un problema resuelto. La formulación lineal permitirá obtener el diseño óptimo del problema de forma rápida y eficiente. Teniendo en cuenta lo anterior, se recomienda estudiar las líneas de gradiente hidráulico resultantes en diferentes sistemas de tuberías en serie al aplicar programación lineal. Estas investigaciones permitirán conocer de forma exacta las características de la LGH óptima y sus variaciones respecto a las características del sistema de tuberías que se plantee.
- En el presente trabajo se pudo observar que se obtuvo el diseño óptimo de submódulos de riego. Ahora es necesario investigar la manera en que se debe diseñar todo el sistema que se encuentra aguas arriba de la entrada a los diferentes submódulos de riego. Para esto se debe definir la manera en que se operará todo el sistema de riego en sí, es decir el orden en que se operarán los diferentes submódulos de riego que componen el sistema en su totalidad, de forma que se optimice el diseño de los sistemas de tuberías principales y la aplicación de los nutrientes que se agregan al fluido en la estación que alimenta todo el sistema de riego.
- Mediante los resultados obtenidos al verificar el trabajo de Bermúdez, se puede establecer que existe una presión de entrada máxima que cumpla con el coeficiente de uniformidad. Pero es posible que en campo esta presión no pueda lograrse a la entrada del submódulo y se requiera de alguna bomba para lograr tener esa presión. En este caso se recomienda un análisis de costos que determine si es mejor colocar una bomba que permita tener la PES establecida por Bermúdez, logrando minimizar los costos de las tuberías o si es mejor no colocar la bomba y tener una PES menor pero con diámetros de tuberías mayores.
- La metodología SOGH presenta resultados muy buenos en el diseño de submódulos de sistemas de riego, pero es necesario realizar algunas modificaciones en algunos pasos como en el de la determinación de la flecha óptima. Para el caso de Submódulos de RLAF, no es posible establecer la flecha óptima mediante lo propuesto por Ochoa debido a que no es posible establecer un centroide de demandas. Se recomienda hacer uso de programación lineal para poder determinar la LGH óptima en este tipo de sistemas y sus variaciones respecto a variaciones en los parámetros de entrada al problema de diseño.

6. REFERENCIAS

- Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, C. (2008). Programa REDES. Bogotá: Universidad de los Andes.
- De Paco, J. L. (1993). Fundamentos del Cálculo Hidráulico en los Sistema de Riego y de Drenaje. Madrid: Mundi-Prensa.
- IDEAM. (2011). Estudio Nacional del Agua. Bogotá, Colombia.
- Kelle, J., & Karmeli. (1974). Trickle irrigation design. Rainbird Sprinkler Manufacturing Corporation .
- López, J. R. (1992). Riego Localizado. Madrid: Mundi-Prensa.
- Ochoa, S. (2009). Diseño Optimizado de Redes de Distribución de Agua Potable con Base en el Concepto Energético de Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico . Bogota: Universidad de los Andes.
- Pizarro, F. (1996). Riegos Localizados de Alta Frecuencia. Goteo, microaspersión, exudación. Madrid: Mundi-Prensa.
- Saldarriaga, J. (2007). Hidráulica de Tuberías. Abastecimiento de Agua, Redes, Riego. Bogotá: Alfaomega.
- Solomon, K. H. (1985). Global uniformity of trickle irrigation system. ASAE , 1151-1158.
- Villalba, G. (2004). Algoritmos de optimización combinatoria aplicados al diseño de redes de distribución de agua potable. Bogotá: Universidad de Los Andes.
- Wu, I. (1975). Design of Drip Irrigation Main Lines. Journal of the Irrigation and Drainage Division , 265 - 278.
- Bermúdez, N. (2011). *Desarrollo de una metodología de diseño hidráulico para submódulos de sistemas de riego localizado de alta frecuencia.* Bogotá: Universidad de los Andes.
- Paez, D. (2011). Análisis de redes internas de distribución de agua potable utilizando simulación de eventos discretos. Bogotá: Universidad de los Andes.
- OECD 2006, *The impacts of Change on the Long-term Future Demand for Water Sector infrastructure.*
- Departamento Nacional de Planeación. (1998). Recuperado el 9 de Junio de 2011, de http://www.dnp.gov.co/PortalWeb/Portals/0/archivos/documentos/DDRS/Publicaciones_Estudios/ProductividadMR.pdf

7. ANEXOS

En esta sección se presenta una breve descripción del uso de los programas que fue necesario desarrollar con el objetivo de realizar los diseños mediante la metodología planteada. Se mostrarán dos programas sin entrar en detalle en las subrutinas y la formulación detrás de estos, únicamente se mostrará su manera de uso y los resultados que producen.

7.1. Programa para el cálculo de PES y generar archivo de Xpress.

El programa que se presenta a continuación es un programa en Microsoft Excel con Visual Basic para aplicaciones. El programa permite determinar la presión de entrada al submódulo usando la metodología planteada por Bermúdez y adicionalmente permite generar las 4 matrices (en el formato de Xpress) necesarias para realizar el diseño de una red abierta mediante programación lineal. De esta manera al abrir el programa el usuario se encontrará con la hoja “INICIO” la cual se ve como se muestra a continuación:

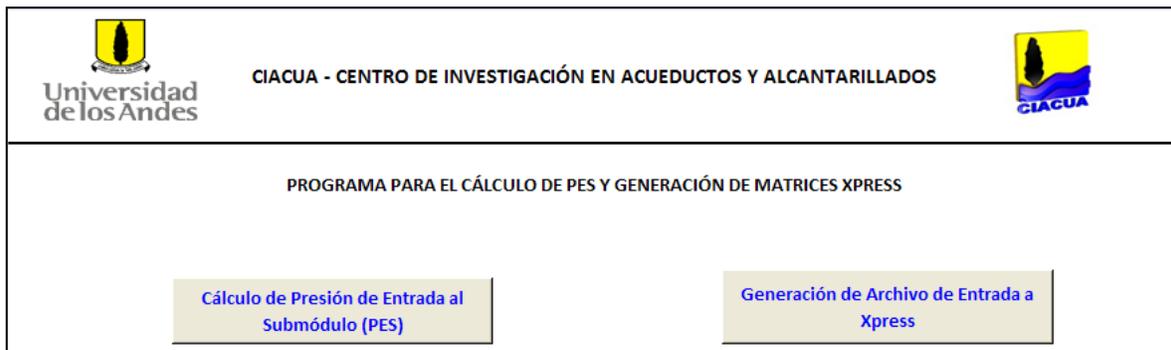


Figura 30. Hoja “INICIO”. Programa para el cálculo de PES y la generación de matrices de Xpress.

Como se observa en la Figura 30, la hoja “INICIO” es una hoja bastante sencilla, donde el usuario solo tiene dos opciones, hacer click en el botón que lo llevará a la hoja para realizar el cálculo de la presión de entrada al submódulo (PES) o hacer click en el botón para generar el archivo con las matrices de entrada a Xpress. Al hacer click en el botón para cálculo de presión a la entrada, el usuario será llevado a la hoja “Cálculo PES” donde se encontrará con una tabla para ingresar los datos de entrada. La primera parte de la tabla permite al usuario ingresar los valores de la viscosidad cinemática del fluido que se moverá por el sistema de tuberías y adicionalmente permite asignar el valor de la aceleración de la gravedad (Ver Tabla 29).

Tabla 29. Tabla para ingresar la gravedad y la viscosidad cinemática del fluido, Hoja “Cálculo PES”.

CONSTANTES	
Gravedad (g)	Viscosidad cinemática
(m/s ²)	(m ² /s)
9.81	1.14E-06

Como se puede observar en la Tabla 29, las celdas de los datos de entrada son azules, de esta manera en todo el programa los valores que el usuario debe ingresar presentarán un color azul. La segunda parte de la tabla principal permite al usuario ingresar los valores correspondientes al diseño agronómico y las propiedades de los emisores (ver Tabla 30).

Tabla 30. Tabla para ingresar los datos agronómicos y las propiedades de los emisores, Hoja “Cálculo PES”.

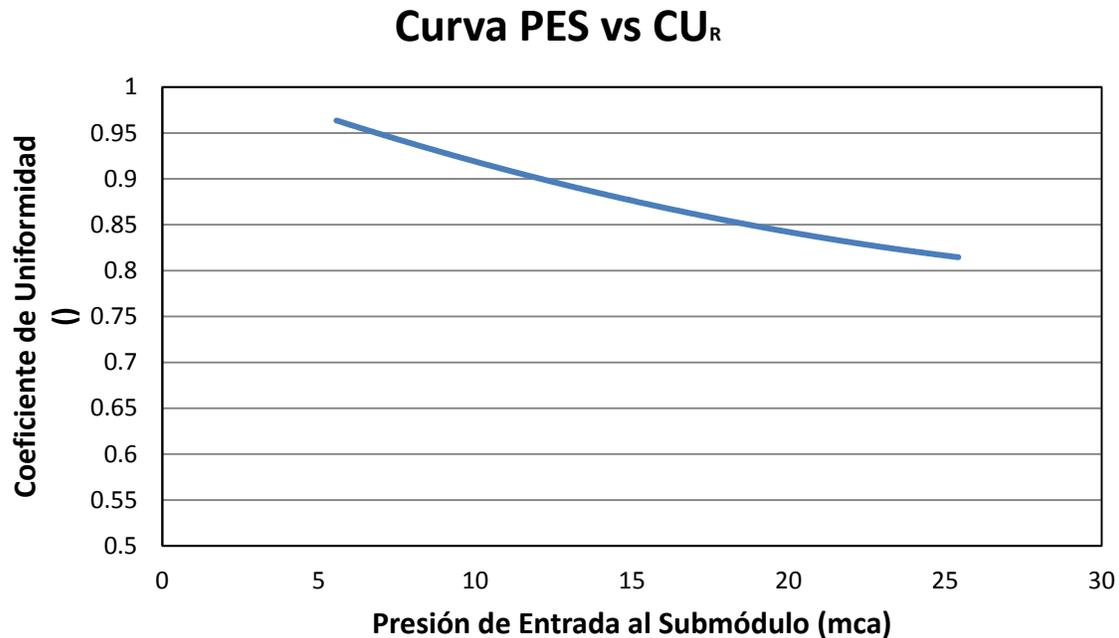
DATOS AGRONÓMICOS			
Coefficiente de uniformidad (CU)	Número de emisores por planta (n _e)	Presión media de operación (h _m)	Caudal medio por emisor (Q _m)
()	()	(mca)	(l/h)
0.85	2	10.00	80
Coefficiente de variación del emisor (CV)			0.04
Exponente del emisor			0.2
Coefficiente del emisor (l/s)/(m ^x)			0.01402127

En la Tabla 30 se puede ver que el usuario debe ingresar el Coeficiente de Uniformidad (CU) deseado, el número de emisores que utilizará por planta, el caudal medio por cada emisor, el coeficiente de variación (CV) y los valores del exponente y coeficiente de la ecuación que caracteriza los emisores. Se puede ver que la presión media de operación en cada emisor no es un dato que el diseñador asigne, sino que es calculado (En color verde se presentan los resultados); el cálculo de la presión media se obtiene a partir del caudal medio del emisor y la ecuación de éste.

Una vez el usuario ha ingresado todos los datos de entrada (Celdas en azul), debe hacer click en el botón:

Calcular Presión de Entrada al Submódulo

Al hacer click en el botón “*Calcular Presión de Entrada al Submódulo*” el programa calculará la tolerancia de caudales y presiones para determinar la presión mínima aceptable en el submódulo de riego, adicionalmente se generará la curva de Coeficiente de Uniformidad vs PES establecida en el trabajo de Bermúdez (ver Gráfica 7-1).



Gráfica 7-1. Curva CU vs PES, Hoja “Cálculo PES”.

Como se mencionó anteriormente, el programa calcula internamente la presión mínima aceptable y haciendo uso de los resultados de la Gráfica 7-1 establece la presión de entrada al submódulo de riego. Los resultados de la presión mínima y la PES se muestran en la tercera tabla que comprende la hoja “Cálculo PES” (ver Tabla 31).

Tabla 31. Resultados de presión mínima y PES. Hoja “Cálculo PES”.

Presión mínima en el Submódulo (mca)	5.33
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (mca)	18.69

Habiendo calculado la presión mínima y la presión de entrada al submódulo el siguiente paso consiste en generar el archivo de entrada a Xpress. Para esto se debe generar un modelo del submódulo de riego en REDES o EPANET, donde se establezca la topología del submódulo, asigne las propiedades a cada una de las tuberías, establezca el caudal demandado en cada nudo y asigne

a la entrada del submódulo la PES calculada. Si el usuario generó el modelo en REDES debe exportarlo a EPANET debido a que el programa lee archivos *.INP que corresponden al formato de EPANET. Para mostrar el funcionamiento de esta parte del programa se utilizará una pequeña red de ejemplo que es la que se muestra a continuación:

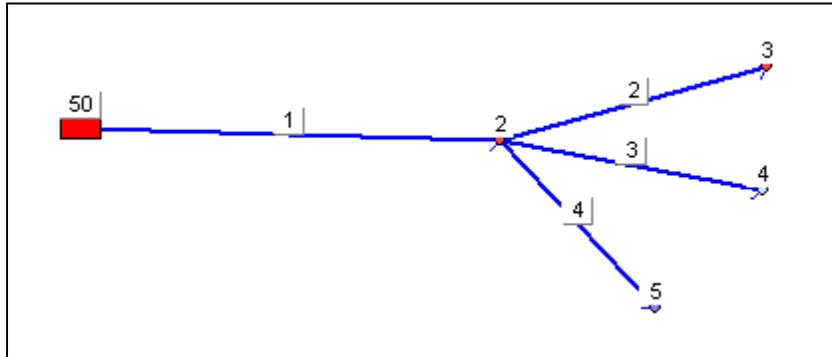


Figura 31. Red ejemplo para mostrar uso de programa.

La red ejemplo para mostrar el uso del programa con el fin de generar las matrices de entrada a Xpress se observa en la Figura 31, donde se puede ver que existen 4 tuberías (1, 2, 3 y 4), 4 nudos de consumo (1, 2, 3 y 4) y una fuente de abastecimiento con LGH de 50 mca. En la siguiente tabla se presentan la altura topográfica y demanda base de cada uno de los nudos y la longitud de cada una de las tuberías. La rugosidad utilizada para este ejemplo es de 0.0000015 m.

Tabla 32. Elevación y demanda base en los nudos y longitud de las tuberías.

ID Nudo	Elevación	ID Nudo	Demanda_Base	ID Tubo	Longitud
()	(m)	()	(l/s)	()	(m)
2	4	2	10	1	170.514
3	0	3	5	2	122.788
4	4	4	8	3	113.893
5	3	5	7	4	148.037

Una vez se tiene el modelo del submódulo en EPANET, el usuario debe hacer click en el botón “Generación de Archivo de Entrada a Xpress” de la hoja “INICIO” y este botón llevará al usuario a la hoja “Matriz” que se ve como se muestra a continuación:

	CIACUA - CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS	
GENERACIÓN DEL ARCHIVO CON LAS MATRICES DE ENTRADA A XPRESS		
<div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;"> Importar Archivo </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;"> Generar Rotulo Matriz </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;"> Generar Matriz de Costos </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;"> Generar Matriz de Costos en Formato Xpress </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;"> Generar Matriz de Perdidas de Presión </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;"> Generar Matriz dp en Formato Xpress </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;"> Generar Matriz de Conexión de Nudos en Formato Xpress </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 2px;"> Generar Matriz de LGH Mínimas en cada Nudo en Formato Xpress </div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px;"> Crear Archivo .dat </div>	<p style="text-align: right; margin: 0;">Introducir el conjunto de diámetros comerciales disponibles</p> <p>Diametros: 200 100 75</p>	

Figura 32. Vista general de la hoja “Matriz” para la generación del archivo con las matrices de entrada a Xpress.

Como se puede ver en la figura superior, la hoja “Matriz” cuenta con 9 botones que el usuario debe utilizar de manera secuencial de arriba hacia abajo. Adicionalmente en la parte derecha se observa que existe un espacio donde se le pide al usuario introducir el conjunto de diámetros comerciales disponibles; y para el correcto funcionamiento del programa el usuario debe introducir en las celdas adjuntas a la palabra “Diámetros:” todos los diámetros que tiene disponibles para diseñar. Para la red ejemplo mostrada suponga que únicamente se tienen 3 diámetros comerciales disponibles (200 mm, 100 mm y 75 mm) como se muestra en la Figura 32.

Una vez el usuario ha introducido los diámetros comerciales, puede empezar a hacer uso de los botones que se describen a continuación

1. *Importar Archivo*: Este es el primer botón que el usuario debe utilizar. Este botón permitirá importar el archivo *.INP de EPANET para que el programa pueda leer la topología de la red y adicionalmente permitirá que el programa haga uso del Toolkit de EPANET con Excel para poder realizar los cálculos hidráulicos requeridos para calcular la matriz de pérdidas totales. Cuando el usuario hace click en este botón aparecerá una ventana como la que se muestra a continuación, donde el usuario debe seleccionar el archivo *.INP que se desea importar.

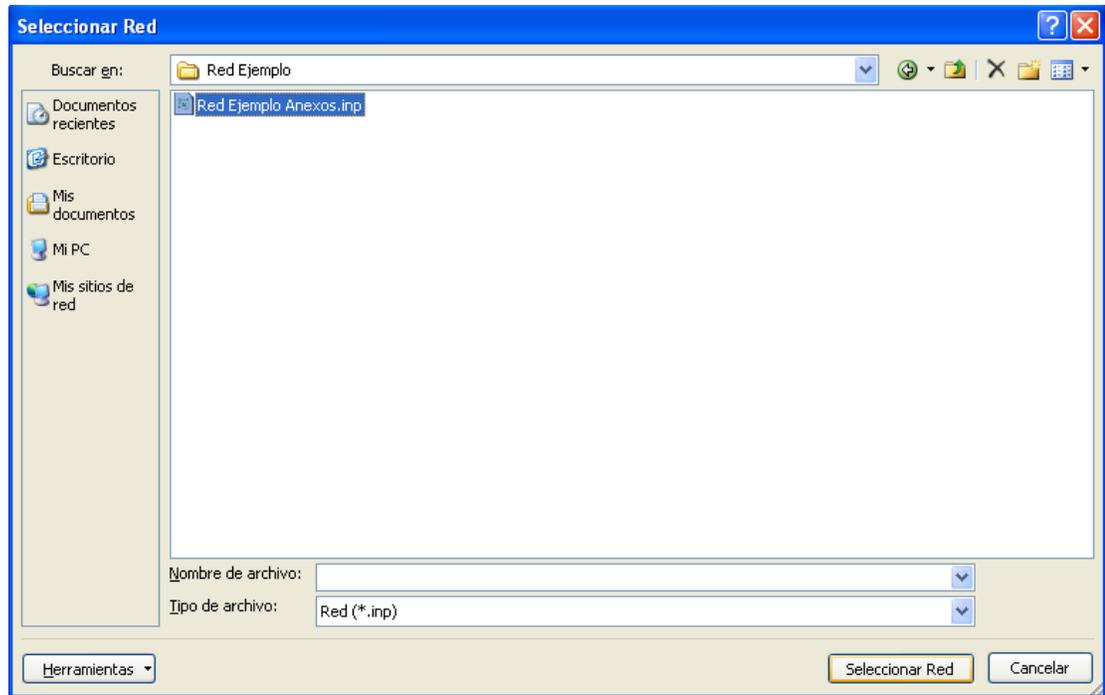


Figura 33. Ventana para seleccionar el archivo de EPANET que se desea importar, Red Ejemplo.

Al seleccionar el archivo *.INP deseado el programa colocará en una hoja aparte todas las características de la red y guardará en una celda oculta la dirección del archivo seleccionado. De esta manera se tiene ubicado el archivo para poder hacer uso del Toolkit de EPANET con Microsoft Excel para los procedimientos posteriores. De esta manera, habiendo importado el archivo (en este caso Red Ejemplo Anexos.inp) exitosamente el usuario puede proceder al siguiente botón.

2. **Generar Rótulo Matriz:** Este botón es el encargado de leer el archivo importado y generar el rótulo de la matriz de costos y la matriz de pérdidas totales. Al hacer click en el botón se generará el rótulo tal como se puede observar en la siguiente figura para el caso de la red de ejemplo:



CIACUA - CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS



GENERACIÓN DEL ARCHIVO CON LAS MATRICES DE ENTRADA A XPRESS

<div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">Importar Archivo</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">Generar Rótulo Matriz</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">Generar Matriz de Costos</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">Generar Matriz de Costos en Formato Xpress</div>	<p style="text-align: right; margin: 0;">Introducir el conjunto de diámetros comerciales disponibles</p> <p style="margin: 0;">Diametros: 200 100 75</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th>Node1</th> <th>Node2</th> <th>Length</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>170.514</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>122.788</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>2</td> <td>4</td> <td>113.893</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>2</td> <td>5</td> <td>148.037</td> </tr> </tbody> </table>	ID	Node1	Node2	Length	1	1	2	170.514	2	2	3	122.788	3	2	4	113.893	4	2	5	148.037
ID	Node1	Node2	Length																		
1	1	2	170.514																		
2	2	3	122.788																		
3	2	4	113.893																		
4	2	5	148.037																		

Figura 34. Generación del rótulo de las matrices de costos y pérdidas totales, Red Ejemplo.

Si se observa la Figura 34 se puede notar que al seleccionar el botón “Generar Rótulo Matriz” se llenan 4 columnas con la información correspondiente al ID de la tubería, el nudo 1 (nudo aguas arriba del tubo), nudo 2 (nudo aguas abajo del tubo) y la longitud del tubo en metros. Para esta red de ejemplo se puede observar que existen las 4 tuberías mostradas en la Figura 31 y que a cada una le corresponde la longitud que se mostró inicialmente en la Tabla 32. Haciendo uso de este rótulo se procede a hacer click en el siguiente botón.

3. *Generar Matriz de Costos*: Al hacer click sobre este botón al usuario le saldrán las siguientes ventanas:

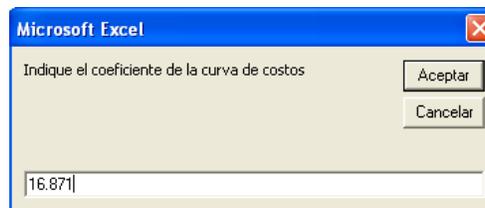


Figura 35. Ventana para ingresar el valor del coeficiente de la curva de costos, Red Ejemplo.

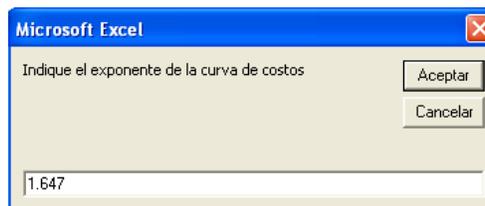
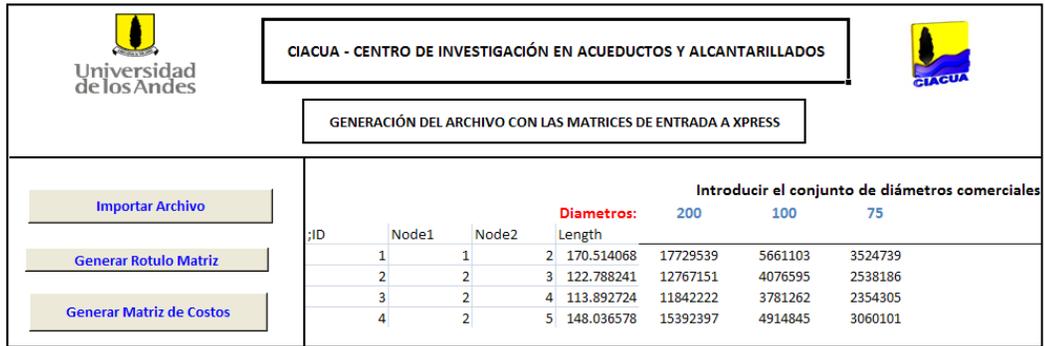


Figura 36. Ventana para ingresar el valor del exponente de la curva de costos, Red Ejemplo.

En la primera ventana que aparece (ver Figura 35) se ingresa el valor del coeficiente de la curva de costos, que para este caso se asignó un valor de 16.871. Cuando el usuario hace

click en aceptar, aparece inmediatamente la ventana donde se ingresa el exponente de la curva de costos (ver Figura 36). Al aceptar el valor del exponente asignado se crea la matriz de costos que para el caso de la red de ejemplo quedaría así:



ID	Node1	Node2	Length	Diametros: 200	100	75
1	1	2	170.514068	17729539	5661103	3524739
2	2	3	122.788241	12767151	4076595	2538186
3	2	4	113.892724	11842222	3781262	2354305
4	2	5	148.036578	15392397	4914845	3060101

Figura 37. Matriz de Costos, Red Ejemplo.

Al observar la Figura 37 se puede ver que se generó la matriz de costos. Si se desea verificar que los resultados mostrados son correctos, se puede determinar el costo de asignarle a la tubería con ID 1 el diámetro de 200 mm; para esto se utiliza la siguiente ecuación

$$C = K * L_1 * (D_1^x) \quad \text{Ecuación 7.1}$$

$$C = 16.871 * 170.514068 * (200^{1.647}) = COP \$ 17,729,539$$

De esta manera, habiendo establecido la matriz de costos, se puede proceder a transformar la matriz mostrada al formato que lee el programa Xpress (Siguiendo botón).

4. *Generar Matriz de Costos en Formato Xpress:* Hacer click en este botón únicamente guardará en la hoja "datos.txt" la matriz de costos en el formato que lee Xpress. En el formato creado por Xpress se asigna en un paréntesis los parámetros que identifican la tubería y fuera del paréntesis el valor del costo al utilizar el diámetro que se muestra dentro de los parámetros. El formato de cada línea correspondiente a la matriz de costos en formato Xpress es el siguiente:

(Nudo Aguas Arriba, Nudo Aguas Abajo, Diámetro)Costo Asociado

De esta manera para el caso de la red de ejemplo, el formato quedará como se muestra a continuación:

Formato Xpress 1. Matriz de costos.

```

c:[
(1,2,200)17729539.0235421
(2,3,200)12767151.3322971
(2,4,200)11842222.2772582
(2,5,200)15392397.3391019
(1,2,100)5661102.7962649
(2,3,100)4076595.33683489
(2,4,100)3781262.30799107
(2,5,100)4914845.41712585
(1,2,75)3524738.82118234
(2,3,75)2538186.34974677
(2,4,75)2354304.89954064
(2,5,75)3060101.02011986
]
  
```

Si se observan la matriz de costos en formato de archivo de entrada a Xpress se podrá ver que por ejemplo en la segunda línea, se indica que el costo asociado al tramo comprendido entre el nudo 1 y el nudo 2, usando un diámetro de 200 mm es de COP \$ 17, 729,539.

5. *Generar Matriz de Pérdidas de Presión:* Una vez se ha generado la primera matriz en formato Xpress se procede a calcular la matriz de pérdidas totales. Para poder calcular las pérdidas que ocurren en un tramo del sistema utilizando un diámetro determinado se hace uso del Toolkit de EPANET con Excel, el cual permite que únicamente haciendo click en el botón “*Generar Matriz de Pérdidas de Presión*”, se calcule la matriz de pérdidas de forma automática. Si el usuario desea entrar en detalle de cómo se realiza este proceso de forma automática, puede encontrar la subrutina correspondiente en el Módulo “Llenar Datos” y la subrutina “Matrizdp”.

Dicho lo anterior si se hace click en este botón se generará la matriz de pérdidas tal como se muestra a continuación (ver Figura 38). Si se observa la siguiente figura se podrá ver, por ejemplo, que si en la tubería de ID 1 se utiliza un diámetro de 100 mm, las pérdidas totales serán de 18.153 mca, si por el contrario se utiliza un diámetro de 75 mm las pérdidas totales serán mayores y representarán un gasto de 73.180 mca de la energía total.



CIACUA - CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS



GENERACIÓN DEL ARCHIVO CON LAS MATRICES DE ENTRADA A XPRESS

Importar Archivo

Generar Rotulo Matriz

Generar Matriz de Costos

Introducir el conjunto de diámetros comercia

;ID	Node1	Node2	Length	Diametros:		
				200	100	75
1	1	2	170.514068	0.6421	18.1531	73.1820
2	2	3	122.788241	0.0190	0.5176	2.0520
3	2	4	113.892724	0.0403	1.1113	4.4235
4	2	5	148.036578	0.0414	1.1373	4.5220

Figura 38. Matriz de pérdidas totales, Red Ejemplo.

6. *Generar Matriz dp en Formato Xpress*: Este botón permite que, habiendo calculado la matriz de pérdidas totales, se pase la información al formato que se requiere por Xpress. Este formato para el caso de la matriz de pérdidas totales se presenta a continuación:

Formato Xpress 2. Matriz de pérdidas totales.

```

dp:[
(1,2,200)0.642143368721008
(2,3,200)1.89556125551462E-02
(2,4,200)4.03186343610287E-02
(2,5,200)4.13717590272427E-02
(1,2,100)18.1530704498291
(2,3,100)0.517597138881683
(2,4,100)1.11126124858856
(2,5,100)1.137322306633
(1,2,75)73.1820068359375
(2,3,75)2.05202221870422
(2,4,75)4.4234676361084
(2,5,75)4.52198696136475
]
  
```

Si se observa el Formato Xpress 2 se podrá ver (penúltima línea) que en el tramo comprendido entre el nudo 2 y el nudo 5, si se utiliza un diámetro de 75 mm se generarán unas pérdidas totales de 4.521 mca.

7. *Generar Matriz de Conexión en Nudos en Formato Xpress*: Una vez se han creado las matrices de costo y pérdidas totales, es necesario establecer una matriz de conectividad que permitirá a Xpress conocer la forma en que se conectan los nudos que componen el

sistema. Al hacer click en este botón se generará automáticamente la matriz de conectividad en formato de entrada a Xpress. A continuación se muestra la forma en que quedó para el caso de la red de ejemplo:

Formato Xpress 3. Matriz de Conectividad de los nudos.

```
w:[
(1,2)1
(2,3)1
(2,4)1
(2,5)1
]
```

Como se observa en el Formato Xpress 3 la matriz de conectividad asigna un valor de 1 a los nudos que se encuentran conectados. Por ejemplo, dado que el nudo 1 (nudo aguas arriba) y el nudo 2 (nudo aguas abajo) están conectados, se asigna un valor de 1 para establecer en Xpress que estos nudos están conectados con una tubería.

8. *Generar Matriz de LGH Mínimas en cada Nudo en Formato Xpress:* Este botón permite generar finalmente la matriz donde se establece la LGH mínima en cada uno de los nudos. Al hacer click saldrá la siguiente ventana:

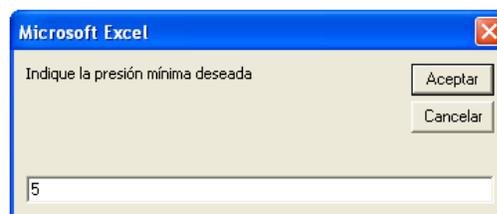


Figura 39. Ventana para ingresar la presión mínima deseada, Red Ejemplo.

En la ventana mostrada en la Figura 39 el usuario debe ingresar la presión mínima que desea, y al hacer click en aceptar se generará la matriz de LGH mínima en formato Xpress:

Formato Xpress 4. Matriz de LGH mínima en los nudos.

```
LGHmin:[
(2)9
(3)5
(4)9
(5)8
]
```

Observando el Formato Xpress 4 se puede ver que la LGH mínima en el nudo 2 es igual a 9 mca, que corresponden a los 5 metros de presión mínima sumados a su elevación topográfica de 4 metros. Una vez se tienen las cuatro matrices que entran a Xpress, el siguiente paso es generar el archivo *.DAT.

9. *Crear Archivo .dat:* Al hacer click en este botón saldrá una ventana (ver Figura 40) donde el usuario debe ubicar la dirección donde desea ubicar el archivo que entrará a Xpress y que contiene las cuatro matrices requeridas para realizar el diseño:

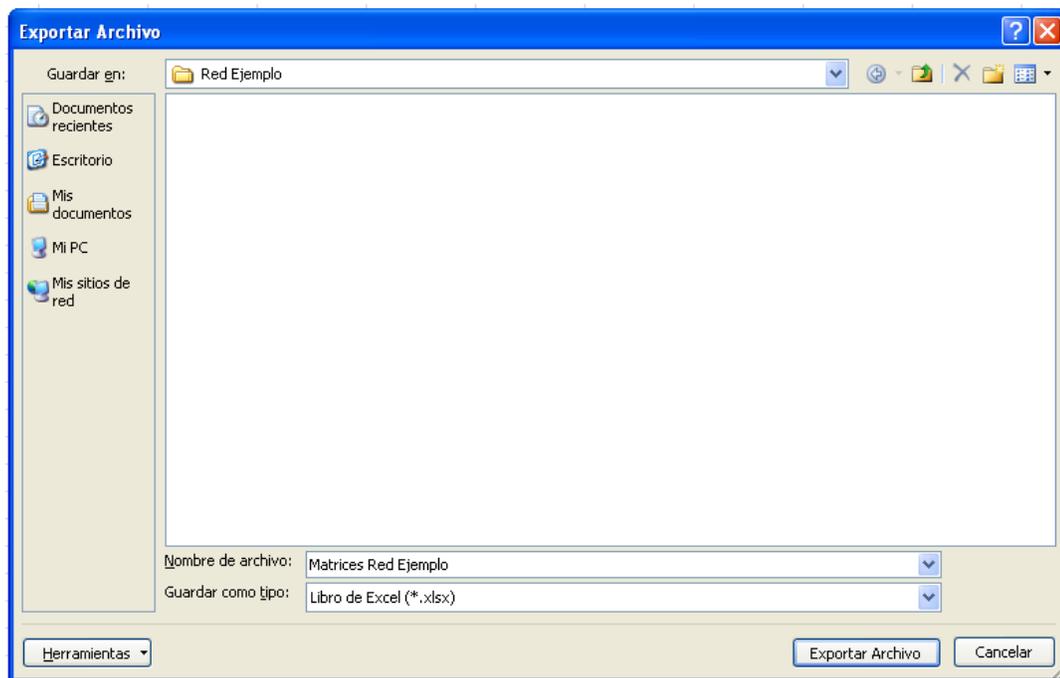


Figura 40. Ventana para guardar el archivo *.DAT de entrada a Xpress.

Si se observa la Figura 40 se podrá ver que el archivo que se guarda debe guardarse como un archivo tipo *.XLSX, el programa automáticamente convertirá el archivo guardado como *.XLSX a *.DAT.

De esta manera, una vez el usuario ha creado el archivo *.DAT el siguiente paso consiste en utilizar Xpress. Cuando el usuario abre Xpress se encontrará con la siguiente interfaz:

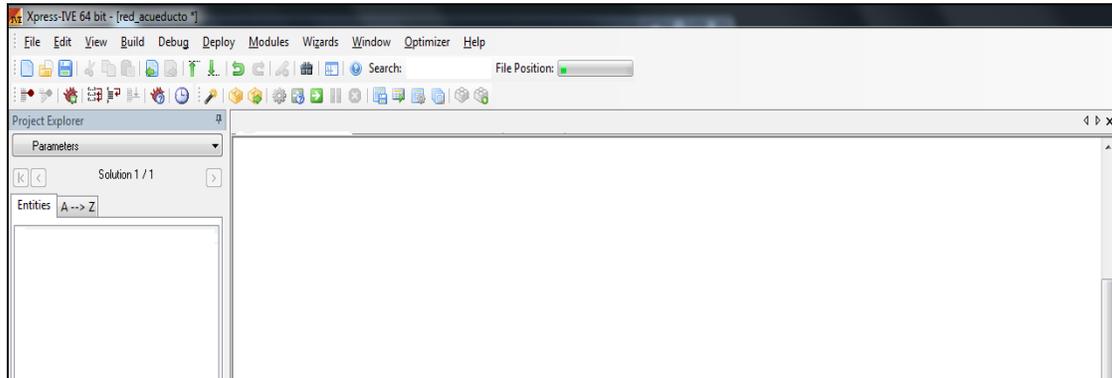


Figura 41. Interfaz Xpress.

Al entrar a Xpress el usuario puede abrir la formulación del problema de diseño y en la parte derecha de la interfaz aparecerá el código correspondiente a la formulación creada:

```

model ModelName
uses "mumxprs"; !gain access to the Xpress-Optimizer solver

parameters
  inputFile="data.dat"
end-parameters

declarations

Nodos: set of integer
Diametros: set of real

c:dynamic array(Nodos,Nodos,Diametros) of real
w: dynamic array (Nodos,Nodos)of integer
dp:dynamic array(Nodos,Nodos,Diametros)of real
Pmin: dynamic array (Nodos) of real

x:array(Nodos,Nodos,Diametros)of mpvar
p:array(Nodos)of mpvar

end-declarations

initializations from inputFile
  c w dp Pmin
end-initializations

forall(i in Nodos,j in Nodos,d in Diametros|exists(w(i,j)))do
create(x(i,j,d))
x(i,j,d)is_binary
end-do

forall(i in Nodos)
create(p(i))

fo:=sum(i in Nodos,j in Nodos,d in Diametros|exists(c(i,j,d)))c(i,j,d)*x(i,j,d)

```

Figura 42A. Código de formulación lineal, problema de diseño de tuberías.

```

forall(i in Nodos)
p(i) >= Pmin(i)

forall(i in Nodos, j in Nodos | exists(w(i,j)))
p(j) = p(i) - sum(d in Diametros) dp(i,j,d) * x(i,j,d)

forall(i in Nodos, j in Nodos | w(i,j) = 1)
sum(d in Diametros | exists(x(i,j,d))) x(i,j,d) = 1

p(1) = 50

minimize(fo)

writeln("Solución")
writeln("Costo: ", getobjval)
forall(d in Nodos)
writeln("La presión en el nudo ", d, "      ", getsol(p(d)))

forall(i in Nodos, j in Nodos, d in Diametros | getsol(x(i,j,d)) > 0)
writeln("En el tramo ", i, " al ", j, " utilice un tubo con diametro ", d)

end-model

```

Figura 42B. Código de formulación lineal, problema de diseño de tuberías, continuación.

En la Figura 42 se presenta el código de Xpress para el problema de diseño de tuberías de redes abiertas. En el código se encuentran definidas todas las restricciones del problema, la función objetivo y el tipo de variable que se utiliza (para ver la formulación matemática del problema ir a la Sección 3.4.1.1.1 en la página 84). Para poder diseñar el usuario únicamente debe cambiar 2 cosas en el código de acuerdo con la red que desee diseñar.

1. *Leer archivo de entrada con las matrices*: Para poder diseñar se le debe indicar a Xpress el nombre del archivo que contiene las 4 matrices (costos, pérdidas totales, conectividad y $LGH_{\text{mínimas}}$). Para esto en la parte del código donde se define el archivo de entrada se debe colocar el nombre, tal como se muestra a continuación:

```

parameters
  inputFile="data.dat"
end-parameters

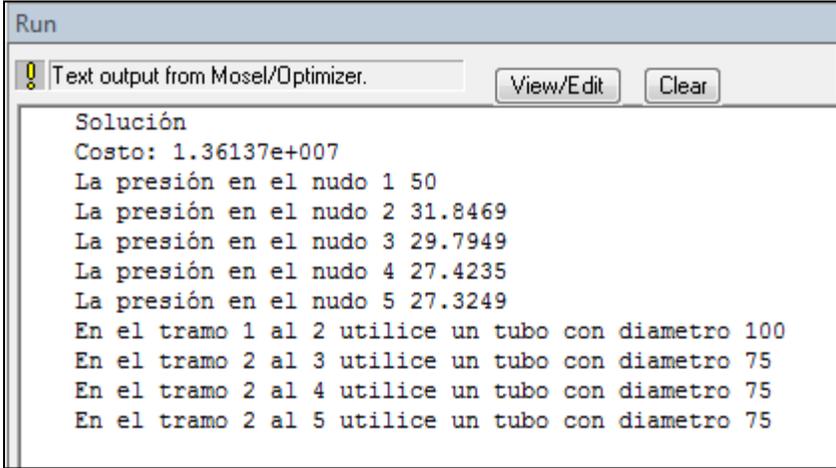
```

En este caso se observa que el archivo de entrada (inputFile) se llamó data.dat. El ejemplo que se muestra corresponde al de la red ejemplo que se ha utilizado en la sección Anexos. Es importante recordar que el archivo data.dat contiene las cuatro matrices que se presentaron anteriormente.

2. *LGH y ID del nudo de abastecimiento*: Para el caso de la red ejemplo se debe indicar a Xpress que el ID del embalse es 1 y que su altura piezométrica es de 50 mca. Para esto se debe cambiar en el código la línea donde se define esto, que es la que se muestra a continuación:

$p(1)=50$

Habiendo indicado a Xpress el archivo de entrada y el ID y la altura piezométrica del embalse, se procede a diseñar. Para diseñar se debe hacer click en el botón  de Xpress y de esta manera Xpress generará el resultado del diseño, entregando un archivo de Salida, que para el caso de la red ejemplo resulta:



```

Run
Text output from Mosel/Optimizer. View/Edit Clear
Solución
Costo: 1.36137e+007
La presión en el nudo 1 50
La presión en el nudo 2 31.8469
La presión en el nudo 3 29.7949
La presión en el nudo 4 27.4235
La presión en el nudo 5 27.3249
En el tramo 1 al 2 utilice un tubo con diametro 100
En el tramo 2 al 3 utilice un tubo con diametro 75
En el tramo 2 al 4 utilice un tubo con diametro 75
En el tramo 2 al 5 utilice un tubo con diametro 75
  
```

Figura 43. Resultados del diseño generado por Xpress, Red Ejemplo.

En la Figura 43 se observa que Xpress entrega como solución un diseño que cuesta COP \$ 13, 613,700 y que consiste en colocar una tubería de 100 mm y las otras tres de 75 mm. De esta manera, se ha diseñado usando formulación lineal y el siguiente paso consiste en pasar los resultados al modelo en EPANET donde se podrá verificar el adecuado funcionamiento del diseño resultante.