

TESIS DE PREGRADO

**OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE RIEGO LOCALIZADO
DE ALTA FRECUENCIA. DISEÑOS OPTIMIZADOS.**

Andrés Felipe Ardila Jiménez

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

PREGRADO EN INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

2013

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Irene y Alberto, a quienes les debo todos los logros que he obtenido en mi vida, por su incondicional amor y paciencia, sin ellos nada de esto hubiera sido posible. A mis hermanos Juan y Andrea, por ser ejemplos a seguir y por apoyarme siempre.

A mi asesor, el profesor Juan Saldarriaga, y a los integrantes del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes – CIACUA, por brindarme su conocimiento y ayuda. Gracias a ellos he podido crecer como ingeniero, colega y amigo.

Muchas Gracias.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE GRÁFICAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivo General	3
1.3 Objetivos Especificos.....	3
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Redes de Riego Localizado de Alta Frecuencia	5
2.1.1 Componentes de una Red de Riego Localizado de Alta Frecuencia	6
2.1.2 Emisores de Riego	8
2.1.2.1 Comportamiento hidráulico de los emisores.....	8
2.1.2.2 Clasificación de emisores	11
2.2 Uniformidad del Riego	15
2.2.1 Tolerancia de caudales y presiones.....	17
2.3 Hidráulica de los sistemas RLAF	18
2.4 Diseño Hidráulico Tradicional de redes RLAF.....	20
2.5 Metodología para el diseño de submódulos de una RLAF propuesta por Bermúdez.....	24
2.5.1 Metodología de la Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico.....	24
2.5.2 Cálculo de la presión de entrada al Submódulo propuesto por Bermúdez.....	26
2.6 Metodología de diseño optimizado de submódulos de sistemas RLAF mediante Programación Lineal propuesto por Hernández.....	29
2.7 Pruebas para la metodología propuesta por Bermúdez y Hernández para el diseño de submódulos de sistemas RLAF	37
2.7.1 Caso de estudio 1, Submódulo simétrico con topografía planta	37
2.7.2 Caso de estudio 2, Submódulo Asimétrico con topografía planta.....	40
3. DISEÑO DE LA RED MATRIZ PARA SISTEMAS DE RIEGO LOCALIZADO DE ALTA FRECUENCIA	44

3.1 Programa REDES.....	45
3.2 Planteamiento de la Red Matriz.....	48
3.3 Metodología OPUS (Optimal Power Use Surface)	49
1. Estructura de Árbol	50
2. Optimal Power Use Surface	50
3. Distribución Óptima del Caudal	51
4. Cálculo de diámetros.....	51
5. Redondeo de diámetros.....	51
6. Optimización	51
3.4 Turnos de Riego.....	52
3.4.1 Ejemplo de diseño mediante turnos de riego	52
3.4.1.1 Caso de Estudio 3	53
- Un turno de Riego	53
- Dos turnos de Riego:	55
- Cuatro turnos de Riego:	57
3.5 Distribución de turnos.....	58
3.6 Número de Emisores por planta	60
3.7 Pruebas y análisis para el número de turnos, la distribución de turnos y el número de emisores por planta	61
3.7.1 Caso de Estudio 4	61
3.7.2 Caso de Estudio 5	75
4. REDES DE RIEGO LOCALIZADO DE ALTA FRECUENCIA ALIMENTADAS POR BOMBEO	84
4.1 Costo comercial de la bomba	84
4.2 Costos energéticos	86
4.3 Costo de la red matriz	86
4.4 Resultados y Análisis	86
5 CONCLUSIONES	91
6 BIBLIOGRAFÍA	93

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Coeficiente de Uniformidad Resultante vs PES, Caso de estudio 1	38
Gráfica 2 Curva Costo vs Diámetros de tubería. Tomado de Hernández (2012)	39
Gráfica 3 Curva CU vs PES, Caso de Estudio 2	42
Gráfica 4 Curva Q vs Presión para emisor ACUAFLO fabricado por AGRIFIM. Tomada del catálogo de emisores de AGRIFIM.....	64
Gráfica 5 Potencia máxima vs costos bomba.....	85
Gráfica 6 Altura de Bombeo vs Costos, Caso de Estudio 4	88
Gráfica 7 Altura de bombeo vs Costos proyección a 2 años, Caso de Estudio 4.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de RLAF en función del caudal. Adaptado de (Saldarriaga, 2007).....	6
Figura 2 Componentes Generales de una RLAF. Adaptado de Saldarriaga (2007)	7
Figura 3 Curvas caudal vs presión. Tomado de Bermúdez (2010)	9
Figura 4 Secuencia del diseño hidráulico de una red RLAF. Adaptado de Pizarro (1996).....	20
Figura 5 Línea de Gradiente Hidráulico Óptima. Adaptado de Hernández (2012)	25
Figura 6 Relación CUR - PES. Tomado de Bermúdez (2011)	27
Figura 7 Valores para α , β y γ según h_m y x . Tomado de Bermúdez (2011)	28
Figura 8 Diagrama de Flujo, metodología para diseños de Su módulos de sistemas RLAF mediante Programación Lineal y SOGH. Tomado de Hernández (2012)	35
Figura 9 Diagrama de Flujo, metodología para diseños de Su módulos de sistemas RLAF mediante Programación Lineal y SOGH. Tomado de Hernández (2012)	36
Figura 10 Caso de Estudio 1, REDES 2012	37
Figura 11 Caso de Estudio 2, red asimétrica con topografía plana	41
Figura 12 Esquema Red Matriz de Sistemas de Riego Localizado de Alta Frecuencia	44
Figura 13 Programa Redes, desarrollado por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, CIACUA	46
Figura 14 Interfaz REDES. Elementos de diseño.....	47
Figura 15 Interfaz REDES. Metodologías de diseño	47
Figura 16 Modelación Red Matriz	48
Figura 17 Esquema Metodología OPUS, tomado de “OPTIMAL POWER USE SURFACE FOR DESIGN OF WATER DISTRIBUTION SYSTEMS”	50
Figura 18 Caso de Estudio 3, Análisis de turnos de riego.....	53
Figura 19 Distribución de caudales para 1 turno de riego, Caso de Estudio 3.....	54
Figura 20 Distribución de caudales para el primer turno de riego, Caso de Estudio 3	56
Figura 21 Distribución de caudales para el segundo turno de riego, Caso de Estudio 3	56
Figura 22 Distribución de caudales para cuatro turnos de riego, último submódulo, Caso de Estudio 3.....	57
Figura 23 Opción A Distribución de riego con 3 turnos, Caso de Estudio 3	59
Figura 24 Opción B Distribución de riego con 3 turnos, Caso de Estudio 3	59
Figura 25 Opción C Distribución de riego con 3 turnos, Caso de Estudio 3	59
Figura 26 Opción D Distribución de riego con 3 turnos, Caso de Estudio 3.....	60
Figura 27 Configuración sistema de riego, Caso de Estudio 4	62
Figura 28 Submódulo de Riego, Caso de Estudio 4	62
Figura 29 Distribución de turnos con 1 turno de riego, Caso de Estudio 4.....	69
Figura 30 Distribución de turnos con 2 turnos de riego Opción A, Caso de Estudio 4	70
Figura 31 Figura 30 Distribución de turnos con 2 turnos de riego Opción B, Caso de Estudio 4....	70
Figura 32 Figura 30 Distribución de turnos con 2 turnos de riego Opción C, Caso de Estudio 4	71

Figura 33	Figura 30 Distribución de turnos con 3 turnos de riego Opción A, Caso de Estudio 4....	71
Figura 34	Distribución de turnos con 3 turnos de riego Opción B, Caso de Estudio 4.....	72
Figura 35	Distribución de turnos con 3 turnos de riego Opción C, Caso de Estudio 4.....	72
Figura 36	Esquema sistema de riego, Caso de Estudio 5	75
Figura 37	Diseño Submódulo, Caso de Estudio 5	76
Figura 38	Distribución de Turnos, 1 turno, Caso de Estudio 5	80
Figura 39	Distribución de Turnos, 2 turnos Opción A, Caso de Estudio 5	80
Figura 40	Distribución de Turnos, 2 turnos Opción B, Caso de Estudio 5	80
Figura 41	Distribución de Turnos, 2 turnos Opción C, Caso de Estudio 5	81
Figura 42	Distribución de Turnos, 3 turnos Opción A, Caso de Estudio 5	81
Figura 43	Distribución de Turnos, 3 turnos Opción B, Caso de Estudio 5	81
Figura 44	Distribución de Turnos, 3 turnos Opción C, Caso de Estudio 5	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características Emisores de Alto Caudal. Adaptado de Bermúdez (2010)	11
Tabla 2 Características de goteros de largo conducto. Adaptado de Bermúdez (2010).....	12
Tabla 3 Características de goteros de orificio. Adaptado de Bermúdez (2010).....	13
Tabla 4 Características de goteros tipo Vortex. Adaptado de Bermúdez (2010).....	13
Tabla 5 Características del gotero autocompensante. Adaptado de Bermúdez (2010)	14
Tabla 6 Características de mangueras. Adaptado de Bermúdez (2010)	14
Tabla 7 Características Cintas Exudantes	14
Tabla 8 Clasificación de goteros, mini aspersores y difusores. Adaptado de Bermúdez (2010)	16
Tabla 9 Valores para relación M. Adaptado de Saldarriaga (2007).....	18
Tabla 10 Matriz de Pérdidas Totales (DP. Tomado de Hernández (2012)	30
Tabla 11 Matriz de Conectividad (w)	31
Tabla 12 Datos agronómicos Caso de Estudio 1	37
Tabla 13 PES y presión mínima, Caso de Estudio 1	38
Tabla 14 Diámetros Comerciales Disponibles, Caso de Estudio 1.....	38
Tabla 15 Resultados Caso de Estudio 1	39
Tabla 16 Resultados Caso de Estudio 1	40
Tabla 17 Diseño obtenido por SOGH, Caso de Estudio 1	40
Tabla 18 Datos Agronómicos, Caso de Estudio 2	41
Tabla 19 Resultados para PES y Pmin Caso de Estudio 2	41
Tabla 20 Resultados Flecha 0 y Flecha 0.25 Caso de Estudio 2.....	42
Tabla 21 Resultados Metodología CIACUA y SOGH, Caso de Estudio 2	43
Tabla 22 Caudales de diseño para 1 turno de riego, Caso de Estudio 3	55
Tabla 23 Caudales de diseño para 2 turnos de riego, Caso de Estudio 3.....	56
Tabla 24 Caudales de diseño para cuatro turnos de riego, Caso de Estudio 3	57
Tabla 25 Resultados 1 Turno de Riego 1 Emisor, Caso de Estudio 4.....	65
Tabla 26 Resultados 1 Turno de Riego 2 Emisores, Caso de Estudio 4	65
Tabla 27 Resultados 2 Turnos de Riego 1 Emisor, Caso de Estudio 4	65
Tabla 28 Resultados 2 Turnos de Riego 2 Emisores, Caso de Estudio 4.....	66
Tabla 29 Resultados 2 Turnos de Riego 3 Emisores, Caso de Estudio 4.....	66
Tabla 30 Resultados 3 Turnos de Riego 1 Emisor, Caso de Estudio 4	67
Tabla 31 Resultados 3 Turnos de Riego 2 Emisores, Caso de Estudio 4.....	67
Tabla 32 Resultados 3 Turnos de Riego 3 Emisores, Caso de Estudio 4.....	67
Tabla 33 Resultados PES y Pmin para Caso de Estudio 4	67
Tabla 34 Resultados diseño submódulo mediante la metodología de Hernández.....	68
Tabla 35 Resultados diseños finales, Caso de Estudio 4	73
Tabla 36 Resultados 1 Turno de Riego 1 Emisor, Caso de Estudio 5.....	76

Tabla 37 Resultados 1 Turno de Riego 2 Emisores, Caso de Estudio 5	76
Tabla 38 Resultados 2 Turnos de Riego 1 Emisor, Caso de Estudio 5	77
Tabla 39 Resultados 2 Turnos de Riego 2 Emisores, Caso de Estudio 5.....	77
Tabla 40 Resultados 2 Turnos de Riego 3 Emisores, Caso de Estudio 5.....	78
Tabla 41 Resultados 3 Turnos de Riego 1 Emisor, Caso de Estudio 5	78
Tabla 42 Resultados 3 Turnos de Riego 2 Emisores, Caso de Estudio 5.....	78
Tabla 43 Resultados 3 Turnos de Riego 3 Emisores, Caso de Estudio 5.....	79
Tabla 44 Resultados PES y Pmin, Caso de Estudio 5	79
Tabla 45 Resultados Diseño Submódulo, Caso de Estudio 5	79
Tabla 46 Resultados diseños Finales Caso de Estudio 5.....	82
Tabla 47 Costos comerciales de las bombas, tomado de BWM-II	84
Tabla 48 Costos totales Caso de Estudio 4.....	87
Tabla 49 Resultados Costos Bombeo a una proyección de 2 años, Caso de estudio 4.....	88

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El agua, como bien sabido, es uno de los recursos más importantes e indispensables para que pueda existir la vida en nuestro planeta. Según el Programa de las Naciones Unidas (UNEP), actualmente el volumen de agua dulce consumible en el mundo es de aproximadamente 2.5% del volumen total de agua. De este 2.5%, el 70% del agua dulce se encuentra congelada en los glaciares y cubriendo permanentemente las montañas y nevados. De esta forma, se dispone realmente de un 30% del agua potable para suplir todas las necesidades que demanda una población que va creciendo día a día.

De acuerdo con los informes de la Organización Mundial de la Salud (WHO), entre 1990 y 2000 la población mundial aumentó aproximadamente un 15%, pasando de 5270 a 6060 millones de habitantes, llegando hasta hoy en día a una cantidad de 7046 millones de habitantes en el mundo. Ante estas cifras es totalmente claro que se debe tener una visión crítica sobre los diferentes usos que se le da a este importante recurso. Todos los usuarios están en la obligación de hacer un uso racional y lo mayor eficientemente posible del agua, para de esta forma, evitar escases en un futuro.

Según el Programa de Evaluación Mundial del Agua (WWAP), un 10% del uso total que se le da al agua dulce está destinado al uso doméstico, un 20% para uso industrial y por último, un 70% para sistemas de riegos. Este importante porcentaje de participación hace que los sistemas de riego deban ser lo más eficientes posibles. Lamentablemente, este tipo de sistemas hidráulicos son los que menos avances han tenido con el paso del tiempo. Actualmente, se hace uso de una metodología clásica para el diseño de estas redes de distribución de agua. La falta de conocimiento e innovación en este campo, hace que los diseños de las redes de riegos no sean los mejores, y esto conlleva a posibles sobredimensionamientos de la red, lo que a su vez se traduce en una entrega de agua mayor a lo que las plantas realmente necesitan. Es por esto que uno de los objetivos principales de este trabajo es el análisis de diferentes variables que pueden influenciar sobre el diseño óptimo de una red de riego.

El Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA) ha venido trabajando en metodologías de diseño que se alejan del método clásico de diseño para redes de Riego Localizado de Alta Frecuencia, el cual está basado únicamente en una comprobación de diseño. Estos avances fueron impulsados por los muy buenos resultados que ha obtenido el CIACUA en el diseño de Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP), por medio de diferentes metodologías. Dentro de estas metodologías se destacan dos: La primera denominada "Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico (SOGH)" (Ochoa & Saldarriaga, 2009), la cual se basa

en la estimación de una superficie óptima de alturas piezométricas que conlleva a una configuración de mínimo costo. Esta superficie es obtenida por medio de una flecha de diseño, la cual describe la forma de la línea de gradiente hidráulico en función de características hidráulicas, topológicas y comerciales del sistema (Bermúdez, 2011). La segunda metodología de diseño corresponde a la denominada “Optimal Power Use Surface (OPUS)” (Saldarriaga, Páez, Cuero & León, 2012). El objetivo de esta metodología es obtener un diseño de mínimo costo haciendo uso de un número reducido de iteraciones. Esto lo consigue haciendo uso de principios hidráulicos deterministas, obtenidos por medio del análisis de la distribución del caudal y de la forma en que la energía es usada en estos sistemas (Saldarriaga et al., 2012).

Por medio de estas metodologías de diseño para Redes de Distribución de Agua Potable, el CIACUA planteó la solución para el diseño de Redes de Riego Localizado de Alta Frecuencia. Aquí se resalta el trabajo realizado por Nataly Bermúdez y David Hernández, al proponer una metodología de diseño óptima para submódulos de sistemas de riego. Bermúdez encontró, por medio de un análisis extensivo, una forma de hallar la Presión de Entrada al Submódulo (PES) que necesitaría éste para cumplir con el Coeficiente de Uniformidad Resultate (CUR) y asegurar la presión mínima requerida en el sistema. Por su parte, Hernández hizo uso de esta Presión de Entrada al Submódulo para poder desarrollar una metodología que encontrara el diseño óptimo del submódulo por medio de Programación Lineal. Los resultados obtenidos por medio su metodología propuesta los comparó con los resultados obtenidos usando SOGH, logrando una reducción de aproximadamente 2% sobre el costo del diseño del submódulo.

En este punto, el CIACUA ha desarrollado una metodología capaz de encontrar la PES correspondiente para cumplir con unos requerimientos agronómicos y a partir de ésta, encontrar el diseño de mínimo costo del submódulo, el cual cumple con las presiones mínimas y proporciona el caudal adecuado a cada una las plantas. Resta entonces conocer el diseño de la red matriz del sistema de Riego Localizado de Alta Frecuencia. Aplicando la metodología de Bermúdez y Hernández para el diseño del submódulo, se obtiene una PES que debe ser respetada para cada submódulo. El submódulo entonces puede ser modelado como un nudo con una presión constante (PES) y una demanda constante; la cual correspondería a la sumatoria del caudal que le llega a cada una de las plantas del submódulo. El problema correspondería ahora, a una red abierta con presiones y caudales constantes. Se propone entonces, por medio de este trabajo, encontrar la forma de diseño óptima, en cuanto a costos constructivos, para una Red de Riego Localizado de Alta Frecuencia, teniendo en cuenta diversas variables que influyen en este, como lo son los turnos de riego, el número de emisores por planta y la distribución de turnos de riego.

Aparte del costo constructivo en una red de Riego Localizado de Alta Frecuencia (tuberías, accesorios, etc.), los costos energéticos deben ser tenidos en cuenta cuando se está haciendo uso de una o varias bombas para diferentes propósitos, ya sea filtración, adición de fertilizantes o succión de pozos cercanos. Independientemente de su propósito, la finalidad de las bombas es la

misma: aportar energía al sistema para poder hacer llegar el agua a todos los usuarios con las presiones y los caudales demandados. Aunque estos costos pueden no ser tenidos en cuenta a la hora de escoger una configuración de diámetros, si deben ser tenidos en cuenta cuando se está haciendo un análisis de costos a largo plazo. Estos costos energéticos pueden llegar a ser bastante significativos para los costos totales cuando estos se traen a valor presente neto; por esta razón, se pretende también estudiar hasta qué punto los costos constructivos juegan una mayor participación en el costo total, y en qué momento dejan de ser principales para dar paso a los costos energéticos. De igual forma, se quiere saber hasta qué punto se podría dar un ahorro en los costos constructivos debido a una mayor energía disponible proporcionada por una bomba.

1.2 Objetivo General

Con el fin de obtener una metodología de diseño óptima para las Redes de Riego Localizado de Alta Frecuencia, el objetivo general de la tesis se centra en establecer criterios que conlleven a un óptimo diseño de éstos sistemas, partiendo desde el diseño de un submódulo, hasta llegar al diseño de la red matriz, teniendo en cuenta importantes variables como los turnos de riego, la distribución de turnos y los números de emisores, así como los costos energéticos condicionados al uso de bombas.

1.3 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos planteados a continuación, por medio de los cuales se busca alcanzar el objetivo general, comprenden a grandes rasgos, el análisis y verificación de metodologías para el diseño de un submódulo en un sistema RLAF, interpretación y análisis de las variables de operación que pudieran modificar la eficiencia de una RLAF, así como la importancia de los costos energéticos dentro de un sistema operado por bombeo. Los objetivos específicos son:

- Realizar un estado del arte de la metodología tradicional y la metodología propuesta por el CIACUA para el diseño de una Red de Riego Localizado de Alta Frecuencia, con el fin de establecer los avances alcanzados en esta última.
- Realizar varias comparaciones entre los resultados encontrados para el diseño de un submódulo de Riego Localizado de Alta Frecuencia usando la metodología de David Hernández y Nataly Bermúdez, y los resultados obtenidos mediante la metodología SOGH (Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico). De esta forma, se busca demostrar que el

diseño de submódulos de sistemas RLAF encontrado mediante Programación Lineal, corresponde al diseño óptimo.

- Realizar una búsqueda bibliográfica sobre el diseño de una Red RLAF teniendo en cuenta variables externas. Dentro de estas variables se encuentran los turnos de riego, la distribución de turnos y el número de emisores por planta.
- Analizar y entender estas variables externas, las cuales pueden llegar a modificar la operación y por consiguiente, la optimización de un diseño de una Red de Riego Localizado de Alta Frecuencia.
- Realizar varios diseños en diferentes escenarios, modificando las variables establecidas, para poder entender como estas afectan los costos totales del diseño de un sistema RLAF.
- Establecer la forma óptima de diseño de una RLAF (metodología para encontrar diseño más económico posible, el cual cumple todos los requerimientos) haciendo uso de las variables externas anteriormente mencionadas, y la metodología para el diseño de un submódulo propuesto por el David Hernández y Nataly Bermúdez.
- Analizar la importancia de los costos energéticos sobre los costos totales de una Red de Riego Localizada de Alta Frecuencia cuando esta es operada bajo bombeo, teniendo en cuenta varios periodos de tiempo. De esta forma, establecer un criterio sobre esta variable para el diseño óptimo de sistemas RLAF.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Redes de Riego Localizado de Alta Frecuencia

Los sistemas de Riego Localizado de Alta Frecuencia son la evolución del sistema tradicional de riego por canales, donde se produce un gran gasto de agua debido a que se está saturando el suelo con una cantidad mayor de agua a la que la planta realmente requiere. Las Redes de Riego Localizado de Alta Frecuencia (RLAF) se caracterizan por brindar un mayor ahorro en la cantidad de agua que se le aplica a la planta. Esto lo consigue por medio de dos características básicas: la localización del riego y su alta frecuencia.

La primera característica consiste en la zona donde se va a estar aplicando las dosis de agua a la planta. Dado que la planta absorbe agua y nutrientes del suelo por medio de sus raíces, será esta zona donde únicamente se aplicará la cantidad necesaria que ésta necesita. Debido a que solo se está humedeciendo parte del volumen de suelo total del cultivo, la cantidad de agua que se desperdicia es mínima. De igual forma, se debe tener en cuenta los efectos de evapotranspiración, distribución de raíces y distribución de sales que son producidos debido a la localización. Por otra parte, la capacidad de almacenamiento del suelo es reducida ya que únicamente se está aplicando agua en un volumen reducido. Esto conlleva a la segunda característica básica de los sistemas RLAF: la alta frecuencia de aplicación. Una alta frecuencia en la aplicación de agua compensa la poca capacidad de almacenamiento que tiene el volumen limitado de suelo que realmente se va a humedecer. Al igual que la localización, la alta frecuencia de aplicación tiene efectos sobre la capacidad de absorción de agua de las raíces, la aireación en la zona radicular y la concentración de sales en el suelo humedecido (Saldarriaga, 2007).

Por medio de estas características, el objetivo primordial de los sistemas de Riego Localizado de Alta Frecuencia es obtener una máxima eficiencia en el uso de agua, evitando a toda costa, posibles desperdicios de este recurso. Este sistema de riego va en contraste con las obligaciones actuales que se tienen para con el uso racional y responsable del agua.

Los sistemas de Riego Localizado de Alta frecuencia son clasificados, normalmente, por medio del caudal que son capaces de transportar:



Figura 1 Clasificación de RLAF en función del caudal. Adaptado de (Saldarriaga, 2007).

Cuando se está tratando con un caudal entre 16 y 150 L/h se puede establecer que la RLAF es una red de Alto Caudal y por consiguiente debe usarse emisores con elementos giratorios (micro aspersión) o con toberas no giratorias (difusión), por medio de los cuales el agua es pulverizada y el caudal es distribuido en la zona de riego. Por otro lado, cuando se está transportando un caudal menor a 16 L/h se puede hablar de una red de Bajo Caudal, en las cuales se contempla el uso de emisores de tipo gotero, en los cuales el agua se entrega a través de gotas con una alta frecuencia. En el caso de una red de alto caudal, es de esperarse que los costos constructivos tiendan a aumentar debido a que para transportar un caudal más alto, es necesario tuberías de diámetros mayores.

2.1.1 Componentes de una Red de Riego Localizado de Alta Frecuencia

Comúnmente las redes de Riego Localizado de Alta Frecuencia se encuentran compuestas de las siguientes partes:

- Embalse o estación de riego: Fuente inicial de donde se obtendrá el agua que se piensa utilizar para el riego. Ésta puede ser obtenida de un embalse, de un pozo, de aguas subterráneas, etc. De igual forma, en este componente se encuentran localizado todo el sistema de bombeo necesario para poder aumentar la altura de energía inicial, logrando así, que el agua pueda pasar por el filtrado, la aplicación de fertilizantes, las tuberías primarias y secundaria, hasta llegar a los emisores con una presión correcta.
- Tubería Primaria: Consiste en la tubería que lleva el agua desde la estación de riego hasta la tubería secundaria. Esta se caracteriza por tener un tamaño más grande que las demás tuberías en el sistema, dado que por esta es transportado todo el caudal que está siendo demandando por las plantas.
- Tuberías Secundarias: Son aquellas tuberías que transportan el agua desde la tubería primaria hasta la entrada de cada submódulo, los cuales componen un módulo de Riego.

Estas tuberías también transportan un caudal importante, por lo cual, su tamaño también es considerable.

- Tubería Múltiple: Es la tubería que lleva el caudal desde la tubería secundaria hasta cada uno de los laterales de riego. Estas tuberías se encuentran caracterizadas por tener aguas abajo un regulador de presión. La tubería múltiple, los laterales de riego y el regulador de presión componen un submódulo de riego.
- Tuberías Laterales: Estas tuberías llevan el caudal desde la tubería múltiple hasta los emisores, los cuales se encuentran localizados a lo largo de ésta y serán éstos los que suministren el agua a cada una de las plantas.
- Válvulas reguladoras de presión: Se encuentran localizados al comienzo de cada submódulo y se utilizan para poder contralar y fijar la presión que entra a éste.
- Válvulas de caudal: Se encuentran localizadas entre la tubería primaria y la tubería secundaria. Su fin consiste en controlar la cantidad de agua que será enviada a los módulos de riego para así evitar transportar más caudal del necesario.

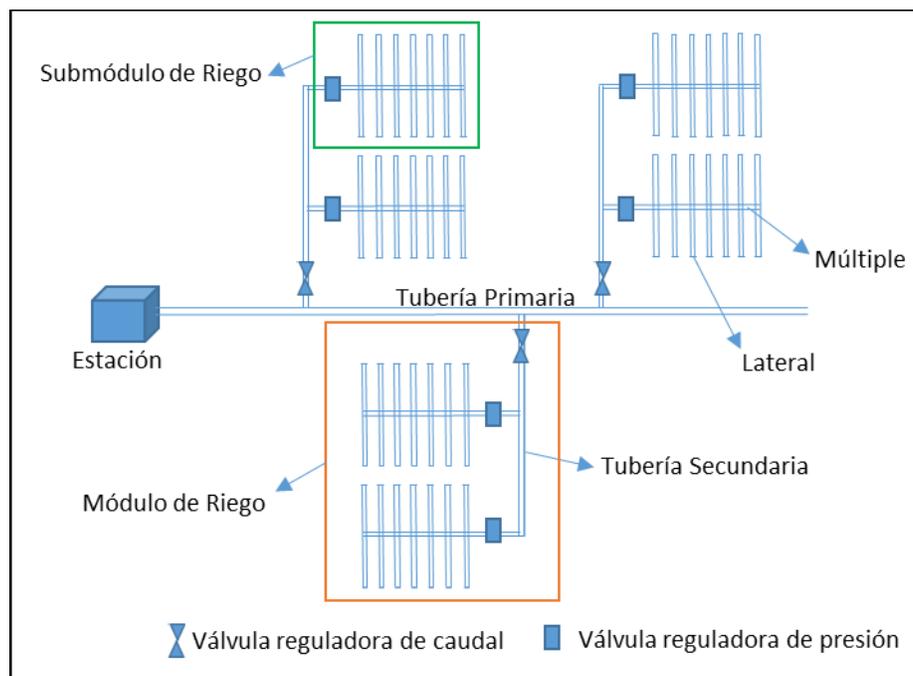


Figura 2 Componentes Generales de una RLAF. Adaptado de Saldarriaga (2007).

2.1.2 Emisores de Riego

Los emisores de riego constituyen una parte fundamental e indispensable de una Red de Riego Localizado de Alta Frecuencia. Son los encargados de suministrar el agua directamente al suelo, donde será absorbida por las raíces de la planta. Aunque hay diferentes tipos de emisores, cada uno con características y usos diferentes, todos comparten la misma función. Pizzaro (1996) establece tres criterios deseables para poder tener un funcionamiento correcto de los emisores:

- Se desea que el caudal suministrado por el emisor no sea muy alto con el fin de evitar dimensiones muy grandes en la tubería múltiple y en los laterales.
- Debido a los desniveles del terreno, a la longitud de las tuberías y al tipo del material que se esté empleando para éstas, la pérdida de energía en el sistema puede ser alta o baja, por lo tanto se recomienda que los emisores tengan disponible una presión alta y así evitar uniformidades de riego bajas.
- Los emisores son bastante sensibles a posibles obturaciones debido a partículas minerales, orgánicas o químicas, por esta razón, se aconseja que el diámetro de entrega de los emisores sea lo más grande posible.

Es evidente que los criterios que se desean para los emisores de riego son contradictorios. Por un lado, una alta presión teniendo en cuenta un diámetro grande implicaría un caudal alto. Dado esta contradicción, siempre se desea mantener un equilibrio entre la presión, el diámetro y el caudal para evitar problemas de obturaciones, menores costos constructivos y déficits de presiones.

2.1.2.1 Comportamiento hidráulico de los emisores

Los emisores se caracterizan por ser la parte más sensible de las Redes de Riego Localizado de Alta Frecuencia, dado que son los encargados de suministrar el agua a cada planta. Cuando se habla de la hidráulica de los emisores se debe resaltar en primera instancia, la relación que existe entre el caudal que sale del emisor y la presión que se tiene en éste. Esta relación es de tipo exponencial y tiene en cuenta tanto la altura de presión que se tiene en el emisor, como características propias de éste:

$$Q = kh^x \quad (\text{Ecuación 1})$$

Siendo:

Q el caudal suministrado por el emisor.

k el coeficiente del emisor.

h la altura de presión que se tiene en la tubería, en el lugar donde se encuentra ubicado el emisor.

x el exponente del emisor.

Tanto el exponente como el coeficiente son características propias del emisor y pueden cambiar dependiendo del tipo de emisor que se use. En algunos casos, estos valores son proporcionados por el fabricante, mientras que en otros, el fabricante provee una gráfica Caudal vs Altura de Presión, de la cual es posible obtener estos parámetros. Aunque los dos términos son importantes para conocer el caudal que puede ser suministrado por el emisor a una altura de presión conocida, el exponente del emisor juega un papel fundamental en la relación que tienen estas dos variables. En la gráfica presentada a continuación se puede ver como la función exponencial varía dependiendo del exponente que se esté usando. Si por ejemplo se tiene un exponente de 1, se puede establecer que el flujo dentro del emisor es de tipo laminar y por consiguiente la relación Caudal – Presión es de tipo lineal:

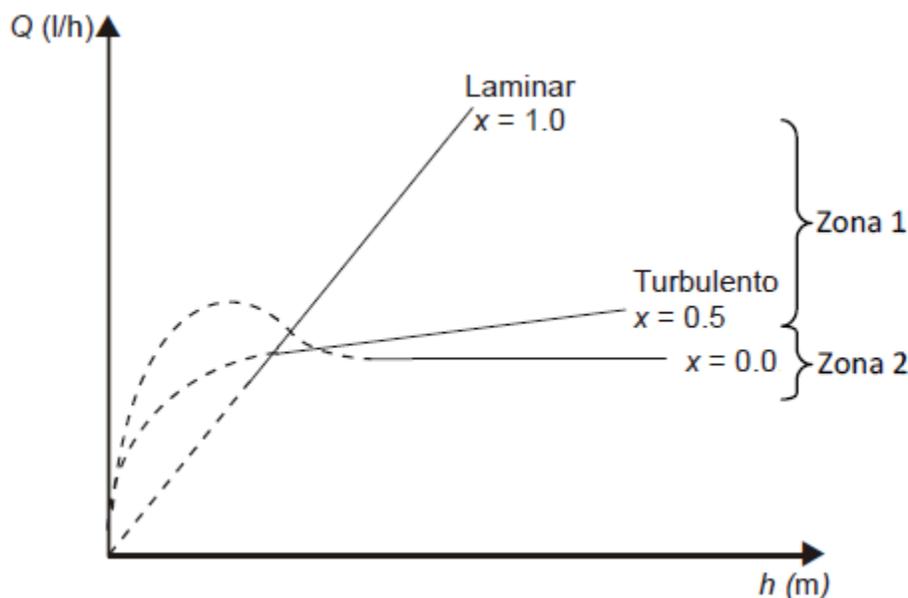


Figura 3 Curvas caudal vs presión. Tomado de Bermúdez (2010).

Si por otro lado, se tiene un exponente de 0.5, se puede establecer que el flujo dentro del emisor es plenamente de tipo turbulento (zona 1), mientras que con un exponente de 0 se puede establecer que el caudal que es suministrado por el emisor no se ve influenciado por la presión que se tenga en éste (Zona 2). Este último caso es el que en la mayoría de los casos se quisiera tener, ya que se está asegurando un caudal constante sin importar las diferencias de presiones que pudieran existir entre los emisores. Esto asegura que se obtendrá un coeficiente de uniformidad alto, logrando de esta forma, que todas las plantas reciban el caudal requerido para su correcto crecimiento. Por otro lado, no es muy recomendado usar emisores que sean de tipo

laminar ya que éstos tienen ciertas particularidades en su comportamiento hidráulico que se quisieran evitar:

1. Las pérdidas por fricción deben ser calculadas por medio de la ecuación de Darcy – Weisbach, la cual a su vez hace uso del factor de fricción de Darcy:

$$h_f = f \frac{l v^2}{d 2g} \quad (\text{Ecuación 2})$$

El coeficiente de fricción de Darcy para el flujo laminar se determina únicamente con el número de Reynolds:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Ecuación 3})$$

El número de Reynolds, para el caso de flujo laminar, es función de la viscosidad absoluta del fluido, lo que a su vez quiere decir que las pérdidas por fricción van a estar directamente relacionadas con la temperatura a la cual este expuesta el agua. Dado que normalmente los sistemas de Riego Localizado de Alta Frecuencia usan mangueras con aditivo negro de humo para evitar la cristalización por acción de los rayos ultravioleta, y adicionalmente, estos se encuentran ubicados en zonas abiertas donde reciben los rayos del sol directamente, se pueden llegar a tener aumentos de temperatura bastante altos. Estos aumentos de temperatura hacen que las presiones a lo largo de las tuberías se vean influenciadas, y por consiguiente, la uniformidad de los caudales de entrega no sea la esperada.

2. En el flujo laminar el exponente de la emisora tiene un valor de 1, lo que quiere decir que el caudal suministrado por este tiene una alta dependencia de la altura de presión que se tenga en el emisor. Esto quiere decir que si tiene una diferencia muy alta entre las presiones de los diferentes emisores, se tendrá también una diferencia importante en los caudales entregados, lo que se traduce en una baja uniformidad de riego. Por otro lado, si se tienen exponentes más pequeños (menores o iguales a 0.5) se puede contar con un régimen turbulento y una menor dependencia de la presión, aspectos que se desean en un sistema RLAF.
3. Una tubería con flujo laminar es más propensa a sufrir taponamiento, debido a que aunque el área de salida requerida es mayor, la velocidad de flujo que se tiene no es lo suficientemente alta para evitar sedimentaciones importantes, las cuales terminan disminuyendo la capacidad de la tubería y de igual manera, la uniformidad de riego (Saldarriaga, 2007).

2.1.2.2 Clasificación de emisores

En el mercado existe una gran variedad de emisores, los cuales varían dependiendo de sus características hidráulicas (exponente y coeficiente), el riesgo de obturaciones, su forma de inserción en los laterales, entre otros. Según la investigación llevada a cabo por Bermúdez (2011), la cual trae a colación los trabajos de Pizarro (1996) y López (1992), se pueden establecer la siguiente clasificación de emisores:

Emisores de Alto Caudal

Se habla de emisores de alto caudal cuando estos suministran caudales entre 16 L/h y 150 L/h. Dentro de estos, se encuentran emisores de tipo difusores, micro aspersores y microtubos de alto caudal. Aunque cada uno de estos tipos de emisor posee características diferentes, estos son usados cuando el suelo es bastante permeable; donde el bulbo de humedad de los goteros se desarrolla a una profundidad considerablemente alta y una poca anchura, lo cual se traduce en riegos insuficientes (Saldarriaga, 2007). Estos tipos de emisores están menos expuestos a las obturaciones causadas por sedimentaciones, gracias a las altas velocidades de flujo que se tienen en éstos. Algunas características propias de estos tipos de emisores se presentan a continuación:

Tabla 1 Características Emisores de Alto Caudal. Adaptado de Bermúdez (2010).

Micro aspersores y Difusores		
Tipo de Emisor	Rango Exponente	Esquema
De orificio	0.45 - 0.85	
Vórtice	0.35 - 0.45	
De largo conducto	0.45 - 0.5	
Autocompensante	0.0 - 0.25	

En el caso de los microtubos de alto caudal, estos casi no son usados debido al alto costo que conllevan (consecuencia de los grandes diámetros en las tuberías laterales y múltiples necesarias para poder transportar el alto caudal) y su poca área de suelo mojada.

Emisores de Bajo Caudal

Cuando se requiere transportar caudales menores de 16 L/h se debe usar emisores de bajo caudal. Dentro de estos emisores se encuentran los goteros, mangueras y cintas exudantes. A continuación se presentan algunas características de estos tipos de emisores:

Goteros de largo conducto: Debido a su largo conducto y a su pequeño diámetro, las pérdidas de energía que se experimentan dentro de ellos son altas. El flujo dentro de ellos es de régimen laminar, por lo que presentan una alta sensibilidad a la presión y la temperatura, además de ser bastante sensibles a los taponamientos. Dentro de esta categoría se encuentran los microtubos, los helicoidales y los goteros de laberinto:

Tabla 2 Características de goteros de largo conducto. Adaptado de Bermúdez (2010).

Goteros de Largo Conducto		
Emisor	Características	Esquema
Microtubos	Coeficiente interior: 2 mm - 0.6 mm Coeficiente de Variación: 0.02 - 0.05 Exponente del Emisor: 0.55 - 0.80 Coeficiente del Emisor: 4 - 8	
Helicoidales	Coeficiente de Variación: 0.02 - 0.13 Exponente del Emisor: 0.65 - 0.85 Coeficiente del Emisor: 0.4 - 0.8 Caudales Nominales: 2 - 4 L/h	
De Laberinto	Caudales Nominales: 2 - 8 L/h Coeficiente de Variación: <0.05 Exponente del Emisor: 0.5 - 0.6	

Goteros de orificio: Se caracterizan por presentar un flujo turbulento con un exponente de 0.5. Gracias a esto, con su uso se evitan todos los inconvenientes del flujo laminar a excepción de uno: los diámetros de este tipo de goteros son bastante pequeños, por lo que las obturaciones son un problema común en ellos:

Tabla 3 Características de goteros de orificio. Adaptado de Bermúdez (2010).

Emisores de Bajo Caudal		
Emisor	Características	Esquema
Gotero de orificio	Diámetro interior : <0.4 mm Coeficiente de Variación: 0.07 - 0.11 Exponente del emisor: 0.5	

Goteros tipo vórtice: Se caracterizan por tener propiedades autocompensantes. Parte de la energía que se tiene antes de entrar al emisor es transformada en velocidad y la presión en el centro del vórtice crece de una forma menos rápida que la presión en la periferia. Por esta razón estos emisores suelen tener un exponente de 0.4:

Tabla 4 Características de goteros tipo Vortex. Adaptado de Bermúdez (2010).

Emisores de Bajo Caudal		
Emisor	Características	Esquema
Gotero Vortex	Diámetro interior : >0.6 mm Coeficiente de Variación: 0.04 Exponente del emisor: 0.4 Coeficiente del emisor: 1	

Goteros Autocompensantes: Se trata de goteros especialmente fabricados para poder mantener un caudal constante e independiente de la presión que se tenga en el emisor. Esto quiere decir que el exponente del emisor es de 0. Esto lo consigue haciendo uso de un elastómero, de caucho o silicona, el cual se deforma según la diferencia de presiones. Aunque tiene grandes ventajas, se debe tener en cuenta los problemas de envejecimiento del elastómero, los altos costos de los emisores y la sensibilidad de estos a ciertos abonos químicos, plaguicidas e insecticidas:

Tabla 5 Características del gotero autocompensante. Adaptado de Bermúdez (2010).

Emisores de Bajo Caudal		
Emisor	Características	Esquema
Goteros Autocompensantes	Diámetro interior : 0.5 mm - 0.7 mm Coeficiente de Variación: 0.02 Exponente del emisor: 0.0 – 0.25	

Mangueras: Son utilizadas en cultivos intensivos, donde el espaciamiento entre planta y planta es muy estrecho y donde se requeriría una gran cantidad de goteros. Éstas son tuberías provistas de emisores tipo gotero cada 60 centímetros aproximadamente y son utilizadas muy frecuentemente en los sistemas de Riego Localizado de Alta Frecuencia debido a su bajo costo. Adicionalmente, dependiendo del tipo de manguera que se use, el régimen de flujo puede ser turbulento, evitando así los problemas del flujo laminar anteriormente planteado:

Tabla 6 Características de mangueras. Adaptado de Bermúdez (2010).

Emisores de Bajo Caudal		
Emisor	Características	Esquema
Tipo manguera	Exponente del Emisor: 0.4 -0.8 Coeficiente de Variación: 0.1 - 0.2 Presiones de operación: < 10 m.c.a	

Cintas exudantes: Son tuberías compuestas por microfibras de polietileno entrecruzadas con el fin de formar una maya por la cual pueda pasar el agua, aun con alturas de presión muy bajas. Debido al tamaño de los poros (entre 4 y 5 micras) este tipo de cintas es muy sensible a las obturaciones y se debe hacer ciclos de limpieza con el fin de permitir el paso de impurezas:

Tabla 7 Características Cintas Exudantes

Emisores de bajo caudal		
Emisor	Características	Esquema
Cintas Exudantes	Caudales de operación: 1.0 - 1.75 L/h/m Presiones de operación: entre 2 y 3.5 m.c.a	

2.2 Uniformidad del Riego

La finalidad de un sistema de riego consiste básicamente en proveer el agua y los nutrientes necesarios a todas las plantas del cultivo de forma homogénea, con el fin de que todas las plantas puedan alcanzar el desarrollo y la producción óptimos. Esta uniformidad del riego es medida por medio del Coeficiente de Uniformidad (CU) y se debe tener en cuenta para poder asegurar que el diseño planteado cumple con la uniformidad de riego mínima requerida en el diseño agronómico.

El cálculo del Coeficiente de Uniformidad de Riego tiene en cuenta tanto factores constructivos, como factores hidráulicos. Los factores constructivos corresponden a imperfecciones que se pueden tener en los emisores, las cuales dificultan la entrega del caudal deseado. Estas imperfecciones son medidas por medio del Coeficiente de Variación de Fabricación (*CV*). La variabilidad de fabricación depende del diseño del emisor, de los materiales utilizados en su proceso de producción, del cuidado y la tolerancia utilizados en este proceso. Por otra parte, debe tenerse en cuenta el envejecimiento de los emisores, la diferencia de temperaturas entre diferentes partes del sistema y posibles obturaciones de los emisores, los cuales pueden influenciar en el Coeficiente de Variación. Estos últimos factores no son tenidos muy en cuenta debido a la alta incertidumbre que existe con relación a ellos.

Dentro de los factores hidráulicos que son tenidos en cuenta para el cálculo de la uniformidad del riego, se encuentran las pérdidas de energía por fricción y pérdidas menores, y las diferencias topográficas que se tienen entre cada uno de los nudos de consumo (en cada emisor). La uniformidad de riego es una de las variables más importantes para poder establecer si el diseño hidráulico del sistema de Riego de Alta Frecuencia se encuentra bien diseñado. El Coeficiente de Uniformidad es calculado por medio de la siguiente ecuación:

$$CU = \left[1 - \frac{1.27 * CV}{\sqrt{n_e}} \right] \frac{Q_{mp}}{Q_m} \quad (\text{Ecuación 4})$$

donde:

CU: Corresponde al Coeficiente de Uniformidad del riego. Este valor es normalmente un dato de entrada del diseño agronómico. Con base en éste se verificará si el diseño planteado cumple con los requisitos.

CV: Coeficiente de Variación por Fabricación. Este depende propiamente del tipo de emisor como se explicó anteriormente.

n_e : Número de emisores por planta. En la mayoría de casos un solo emisor no alcanza a suministrar todo el caudal que la planta requiere, por esta razón se usan varios.

Q_{mp} : Caudal de mínima presión. Corresponde al caudal del emisor que se obtiene mediante la mínima presión; este sería por tanto, el caudal más bajo de todo el riego. Normalmente, este emisor es el que se encuentra más alejado de la entrada al submódulo, o el que presenta las diferencias topográficas más desfavorables.

Q_m : Caudal medio por planta. Es el caudal que se espera que cada una de las plantas recibas, con el cual se asegura un correcto crecimiento de la planta. Normalmente, este es un valor de entrada del diseño agronómico.

El coeficiente variación a su vez es calculado por medio de la siguiente ecuación:

$$CV = \frac{\sigma}{Q_m} \quad (\text{Ecuación 5})$$

donde σ es la desviación estándar y se calcula de la siguiente forma:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_m)^2}{n}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

donde:

Q_i : Caudal del emisor i

Q_m : Caudal medio

n : Número de emisores en la prueba

El coeficiente de variación (CV) se puede clasificar según la US *Soil Conservation Service* de la siguiente forma:

Tabla 8 Clasificación de goteros, mini aspersores y difusores. Adaptado de Bermúdez (2010).

Coefficiente de Variación (CV)	Categoría
≤ 0.05	Excelente
$0.05 < CV \leq 0.07$	Normales
$0.07 < CV \leq 0.11$	Marginales
$0.11 < CV \leq 0.15$	Deficientes
> 0.15	Inaceptables

2.2.1 Tolerancia de caudales y presiones

Dado que el objetivo de los sistemas de riego localizado de alta frecuencia es que todas las plantas reciban una cantidad de agua y nutrientes necesaria para su óptimo desarrollo, es decir, asegurar el Coeficiente de Uniformidad mínimo estipulado por el diseño agronómico, se debe buscar que los caudales que reciban las plantas no sean muy diferentes unos de otros. Se debe estimar unos valores máximos y mínimos para poder establecer un rango de caudales. Se parte entonces encontrando una tolerancia de caudales por medio de la ecuación del coeficiente de uniformidad:

$$CU = \left[1 - \frac{1.27 * CV}{\sqrt{n_e}} \right] \frac{Q_{mp}}{Q_m} \quad (\text{Ecuación 4})$$

El diseño agronómico proporciona el valor mínimo que debe tener el Coeficiente de Uniformidad y el caudal medio que necesitan las plantas para que puedan crecer correctamente. Por otro lado, se debe conocer qué tipo de emisores se va a usar, es decir, conocer el coeficiente de variación, y la cantidad de emisores por planta. De esta forma, el único valor que se desconoce de esta ecuación es el valor del caudal de mínima presión. Conociendo el caudal de mínima presión, es posible encontrar la presión mínima del sistema, haciendo uso de la ecuación del emisor:

$$Q_{mp} = \frac{CU * Q_m}{\left[1 - \frac{1.27 * CV}{\sqrt{n_e}} \right]} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$Q_{mp} = k * h_{mp}^x \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$h_{mp} = \left(\frac{Q_{mp}}{k} \right)^{1/x} \quad (\text{Ecuación 10})$$

De igual forma que se calculó la presión mínima es posible encontrar la presión media:

$$Q_m = k * h_m^x$$

$$h_m = \left(\frac{Q_m}{k} \right)^{1/x} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Ahora es necesario conocer la tolerancia de presiones, la cual consiste básicamente en cuanta altura de presión se tiene disponible para que el agua pueda realizar todo el recorrido por el sistema. Se tiene entonces:

$$\Delta H = h_{max} - h_{mp} \quad (\text{Ecuación 11})$$

donde:

ΔH : Tolerancia de presiones.

h_{max} : Altura de presión máxima. Ésta está normalmente localizada a la entrada del submódulo y es llamando también Presión de Entrada al Submódulo (PES).

La tolerancia de presiones ΔH , admitida para el submódulo será proporcional a la diferencia entre la presión media y la presión mínima teniendo en cuenta un factor M de relación entre la diferencia de presiones máxima y mínima:

$$\Delta H = M[h_m - h_{mp}] \quad (\text{Ecuación 12})$$

El valor de la relación M depende del número de diámetros que se usen en una misma tubería y de las características topográficas del terreno. La experiencia obtenida en estos sistemas de riego aconsejan los siguientes valores para M:

Tabla 9 Valores para relación M. Adaptado de Saldarriaga (2007).

Diámetro	M
Constante	4.3
2 Diámetros	2.7
3 Diámetros	2

El problema surge cuando se está diseñando la red, y por consiguiente, se desconoce la cantidad de diámetros que se planea utilizar. En este caso, se recomienda un valor de 2.5 para el parámetro M. Obtenido el valor de ΔH , se debe diseñar los laterales y el múltiple teniendo en cuenta este valor de altura de presión disponible.

2.3 Hidráulica de los sistemas RLAf

El diseño de las redes de riego siguen los principios básicos de la hidráulica de tuberías. Las ecuaciones básicas para analizar y diseñar estas redes son las ecuaciones de conservación de la energía y el cálculo de las pérdidas de energía por fricción, así como por pérdidas menores. A continuación se explicará brevemente cada uno de estos principios con el fin de hacer más claro el proceso de diseño, tanto tradicional como moderno, de los sistemas RLAf:

Ley de la conservación de la energía

Esta ley establece que la diferencia de energía entre dos puntos del sistema corresponde a la sumatoria de las pérdidas de energía, tanto de fricción, como menores, que se dan entre estos dos puntos. De esta forma se tiene la siguiente ecuación entre un punto a y un punto b :

$$h_a - h_b = h_f + h_m \quad (\text{Ecuación 13})$$

donde:

h_a y h_b corresponden a las alturas en los puntos a y b .

h_f corresponden a las pérdidas de energía a causa de la fricción

h_m corresponden a las pérdidas menores

Pérdidas por fricción

Las pérdidas por fricción son calculadas por medio de la ecuación de Darcy – Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook - White para el cálculo del coeficiente de Darcy:

$$h_f = f \frac{l v^2}{d 2g} \quad (\text{Ecuación 14})$$

donde:

f es el factor de Darcy

l corresponde a longitud de la tubería entre los puntos a y b

d es el diámetro de la tubería

v corresponde a la velocidad media del flujo entre estos dos puntos

El cálculo de f se hace por medio de una ecuación no explícita, con ayuda de métodos iterativos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (\text{Ecuación 15})$$

donde:

k_s corresponde a la rugosidad del material usado para las tuberías

Re corresponde al número de Reynolds

Pérdidas menores

Para el cálculo de las pérdidas menores se hace uso de la siguiente ecuación, en donde se debe tener en cuenta la sumatoria de los coeficientes de pérdidas por accesorios k_m :

$$h_m = \sum k_m * \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Teniendo en cuenta estos principios se procede a explicar el proceso de diseño tradicional para una red de riego localizado de alta frecuencia.

2.4 Diseño Hidráulico Tradicional de redes RLAF

En el diseño hidráulico de sistemas de riego localizado se deben tener en cuenta múltiples variables, tanto hidráulicas como agronómicas. El diseño agronómico del cultivo debe realizarse antes del hidráulico, ya que con base en éste, se conocerán cuáles son los requerimientos que deben ser cumplidos por la red diseñada. Al final del diseño agronómico se debe establecer el Coeficiente de Uniformidad (CU), el número de emisores por planta (n_e), el caudal medio por planta (Q_m), las dosis y el tiempo de riego y el espaciamiento entre emisores. Adicionalmente, se debe tener en cuenta otros parámetros como el Coeficiente de Variación de Fabricación (CV), el plano topográfico y el tipo de conexión lateral – emisor. A continuación se presenta un diagrama del proceso de diseño hidráulico para un sistema RLAF:

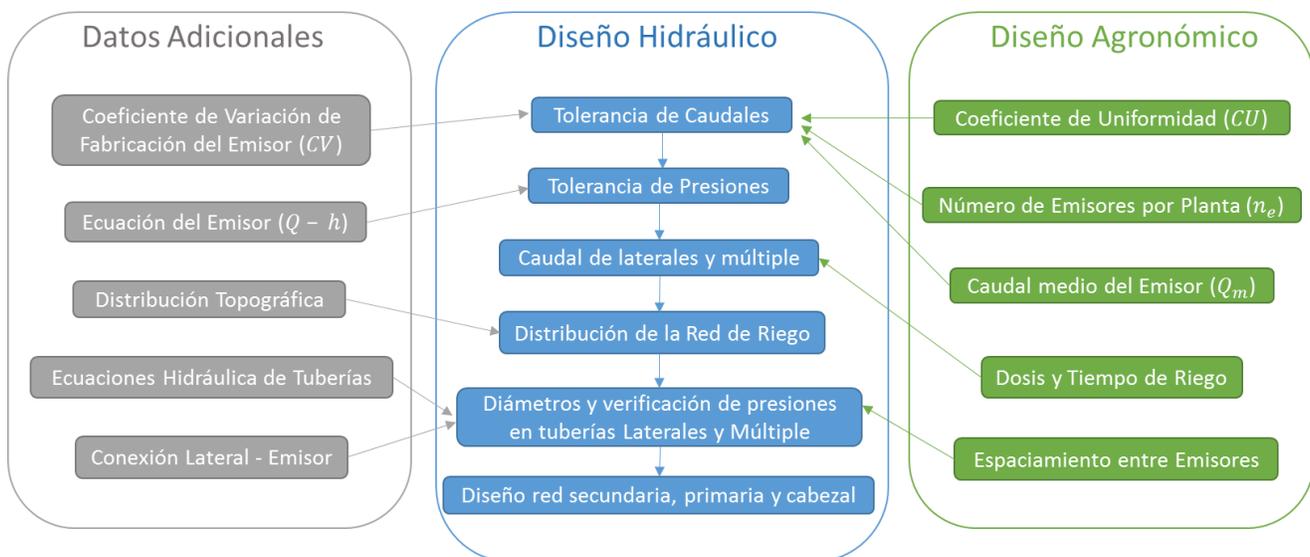


Figura 4 Secuencia del diseño hidráulico de una red RLAF. Adaptado de Pizarro (1996).

El diseño de un sistema RLAF debe empezar con el diseño de los submódulos de riego antes que el diseño de la red matriz (tuberías secundarias, primaria y el cabezal, siendo éste último el encargado de la gestión, filtrado y repartición del agua hacia los diferentes sectores). Esto se debe a que la presión de entrada al submódulo es controlada por una válvula reguladora de presión, lo cual hace que desde ese punto, el submódulo pueda ser tomado como una red aparte. Por otra parte, aguas abajo de esta válvula reguladora de presión, las presiones en cada uno de los emisores cambiará debido a las pérdidas de energía a causa de la fricción en las tuberías y los accesorios en ellas. Esto hace el caudal entregado por los emisores a las plantas no sea el mismo, y por consiguiente, el Coeficiente de Uniformidad del submódulo no sea del 100%.

El proceso de diseño hidráulico de los sistemas de riego localizado de alta frecuencia comienza con el cálculo de la tolerancia de caudales, el cual es calculado por medio del Coeficiente de Uniformidad (CU), el número de emisores (n_e) y el caudal medio del emisor (Q_m), por medio de la Ecuación 8. Posteriormente se calcula la tolerancia de presiones y por medio de la ecuación del Emisor es posible calcular el caudal de los laterales y múltiples. Una vez encontrados los caudales de los laterales y múltiples, se diseña la red para transportar estos caudales y verificar que se cumplan las presiones mínimas y el coeficiente de uniformidad.

La metodología de diseño tradicional de los sistemas de riego, de acuerdo con Saldarriaga (2007), se traduce en una metodología más de comprobación que de diseño. Esto se debe a que de antemano no se conoce el emisor de presión mínima, por lo que es necesario iterar los diámetros de los laterales y múltiples para que estos cumplan con los requisitos establecidos, es decir, que cumplan con las presiones mínimas, caudales requeridos y coeficiente de uniformidad mínimo.

A continuación se describe el proceso tradicional de cálculo para un submódulo de RLAF. Este proceso fue tomado de Saldarriaga (2007):

1. Escoger los diámetros de las mangueras que van a conformar los laterales de riego utilizando los disponibles en el mercado local. Posteriormente, escoger el diámetro del múltiple, el cual debe permitir una conexión adecuada con las mangueras que van a conformar los laterales de riego.
2. Escoger el emisor con las condiciones más adversas de presión. En la mayoría de casos, se puede iniciar con el emisor más alejado del regulador de presión o punto de entrada al submódulo. Otra opción sería escoger el emisor o grupo de emisores más elevados, desde el punto de vista topográfico, del submódulo de riego. A este emisor se le asigna la presión mínima permisible.
3. A partir de este emisor de mínima presión, calcular el lateral que lo contiene, teniendo en cuenta que este es un tubo en serie de diámetro conocido. Para el cálculo hidráulico se deben utilizar las ecuaciones de Darcy – Weisbach para las pérdidas por fricción:

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

Se debe tener en cuenta que el caudal que debe ser utilizado en la ecuación anterior corresponde a la sumatoria de los caudales de los emisores que se encuentran aguas abajo del emisor calculado, que en ese caso sería el emisor de mínima presión. Para el caudal de salida de este emisor se tiene entonces:

$$h_i = h_{min} + \sum_{j=1}^{i-1} h_{fj} \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$Q_i = kh_i^x \quad (\text{Ecuación 18})$$

Las alturas de pérdidas de fricción h_{fj} deben ser calculadas con un caudal diferente para cada emisor ya que la tubería se encuentra en serie y en con el paso de cada emisor el caudal disminuirá. Este nuevo caudal se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q_j = \sum_{i=1}^j Q_i \quad (\text{Ecuación 19})$$

Esquemáticamente se tiene:

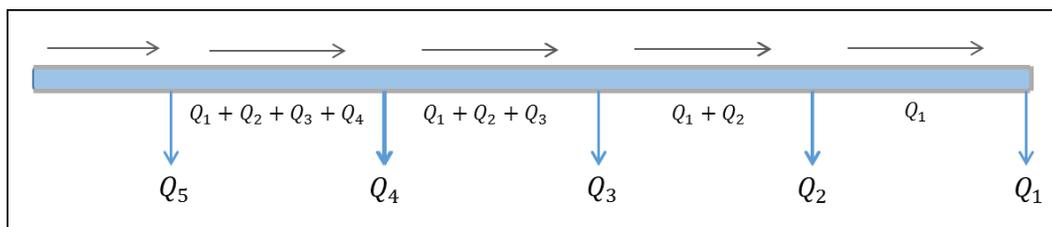


Figura 1 Esquema de Caudales para Lateral. Adaptado de Saldarriaga (2007).

4. Mediante las ecuaciones anteriores se llega al cálculo de la presión en el punto de conexión entre el múltiple y el lateral que contiene al emisor de mínima presión.
5. Conocida la presión en el punto de conexión entre el múltiple y el lateral, se procede a calcular el siguiente lateral. En este punto, el proceso debe realizarse iterando ya que no se conoce el caudal que pasa por el lateral. Dicho proceso implica que:
 - Se supone una presión en el último emisor del lateral que está siendo calculado.

- Posteriormente, se calcula el lateral de la misma forma que se hizo en los pasos anteriores (1 – 4).
- Al llegar al múltiple, debe compararse la presión encontrada con la presión calculada en el paso 4. Si son diferentes se debe volver a calcular la altura en el último emisor del lateral que está siendo calculado por medio de la siguiente ecuación:

$$\begin{cases} h_m > h_m^* \rightarrow h_{ei} = h_{ei-1} + \Delta h \\ h_m < h_m^* \rightarrow h_{ei} = h_{ei-1} - \Delta h \end{cases} \quad (\text{Ecuación 18})$$

donde:

h_m corresponde a la presión del múltiple encontrada en el paso 4.

h_m^* corresponde a la misma presión del múltiple pero calculada en el paso 5.

h_{ei} corresponde a la nueva presión del último emisor del lateral.

h_{ei-1} corresponde a la presión anterior supuesta para el último emisor del lateral.

Δh es un dato que debe ser suministrado por el diseñador.

El proceso de iteración finaliza cuando la diferencia entre los valores de la presión en el múltiple encontrados en el punto 4 y el punto 5 sea menor a un error establecido por el diseñador:

$$(h_m - h_m^*) \leq E \quad (\text{Ecuación 19})$$

6. Una vez calculada la presión en el múltiple se calcula la presión del siguiente punto de conexión múltiple – lateral, calculando las pérdidas de fricción entre estos dos puntos del múltiple:

$$h_{m2} = h_{m1} + h_{f(1-2)} \quad (\text{Ecuación 20})$$

$$h_{f(1-2)} = f \frac{l v^2}{d 2g} = f \frac{l Q_{(1-2)}^2}{d 2gA^2} \quad (\text{Ecuación 21})$$

7. Una vez encontrado esta presión del múltiple se repite el paso 5 hasta verificar nuevamente las dos presiones del múltiple. Este proceso se debe repetir hasta haber calculado todos los laterales.
8. Calculados los caudales y las presiones en todos los emisores y en todo el múltiple se debe llegar hasta en punto de entrada al submódulo.

9. Para este punto se debe verificar todas las presiones de todos los emisores y comprobar que estas sean mayores a la presión mínima permisible. En el caso de que se encuentre una presión menor a la permisible, se debe realizar de nuevo todo el proceso desde el paso 1, asignando a este emisor o emisores, la presión mínima.
10. Por último, se calculan la tolerancia de presiones y de caudales para luego ser verificadas con las tolerancias establecidas por medio de los requerimientos del diseño agronómico. Si son muy diferentes es necesario cambiar los diámetros de laterales y múltiple y reiniciar el proceso.

2.5 Metodología para el diseño de submódulos de una RLAf propuesta por Bermúdez

Nataly Bermúdez, estudiante de la Universidad de Los Andes, realizó una extensa investigación sobre una nueva metodología de diseño de submódulos de redes de Riego Localizado de Alta Frecuencia con el fin de volver el proceso de diseño más cercano al óptimo, ofreciendo diseños más económicos y obtenidos en un menor tiempo computacional. Para lograr esto, utilizó la metodología de la *Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico* (SOGH) propuesta por Juan Saldarriaga y Susana Ochoa de la Universidad de los Andes en el 2009. Esta metodología fue propuesta con el fin de minimizar los costos de una red de agua potable, por lo cual, Bermúdez debió realizar pequeños cambios para que esta metodología se acoplara al diseño de redes de Riego Localizado de Alta Frecuencia. A continuación se hace una pequeña y concisa descripción de esta metodología de diseño:

2.5.1 Metodología de la Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico

Por medio del concepto de Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico (SOGH), se buscó solucionar el problema del diseño óptimo de Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP). Este problema consiste en encontrar la combinación de diámetros de tuberías que minimice los costos constructivos pero cumpla igualmente, con las presiones mínimas y los caudales demandados en cada nudo del sistema. La solución al problema se dificulta al tener millones de posibilidades (combinaciones de diámetros) que pueden cumplir con los requisitos mínimos establecidos; este número de combinaciones posibles depende de la cantidad de diámetros disponibles en el mercado. Esto hace que el costo computacional sea bastante elevado si se quiere encontrar el diseño óptimo. Con el fin de resolver este problema, Saldarriaga y Ochoa, proponen una metodología de diseño que se basa netamente en la compresión de la hidráulica y de la topología del sistema.

La metodología SOGH establece que es posible llegar a un diseño bastante cercano al óptimo de la red si se parte la superficie óptima de gradiente hidráulico. Esta superficie corresponde a las coordenadas espaciales X y Y de la topología del sistema, con una componente Z correspondiente a la Línea de Gradiente Hidráulico ideal (LGH_{ideal}). Esta línea de gradiente hidráulico ideal corresponde a la altura piezométrica que debería tener cada nudo del sistema para poder obtener el diseño de mínimo costo, el cual cumple exactamente con las presiones mínimas y los caudales requeridos.

La línea de gradiente hidráulico puede ser representada por medio de una ecuación parabólica, donde se necesitan 3 puntos para poder describirla. Estos tres puntos corresponden al punto inicial del sistema (nudo de entrada al submódulo), punto final (nudo más alejado de la entrada) y el punto de curvatura máxima:

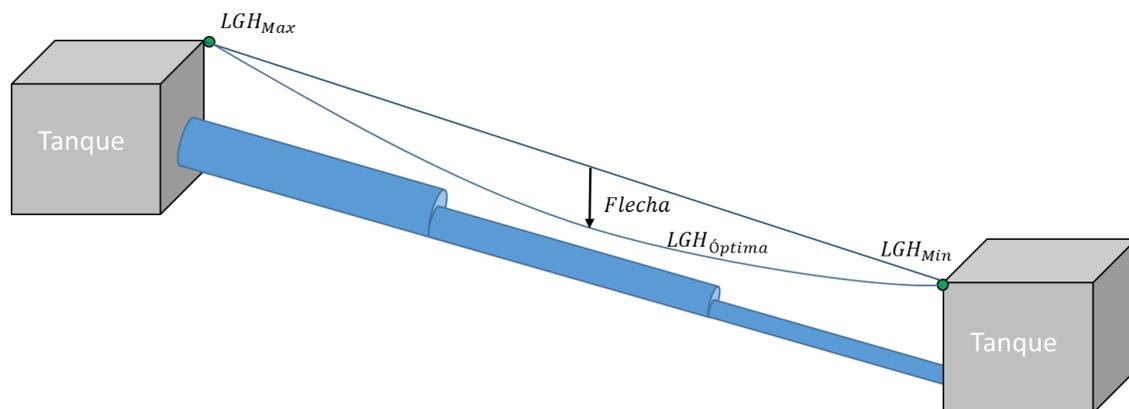


Figura 5 Línea de Gradiente Hidráulico Óptima. Adaptado de Hernández (2012).

Tal y como se puede ver en la figura anterior, el punto de curvatura máxima está establecido por medio de la flecha. Según concluyó I - pai Wu (1975), el diseño óptimo para una red con demandas constantes es aquel diseño donde se usa una flecha de 15%. Sin embargo, Saldarriaga y Ochoa establecieron que la flecha de diseño óptima se debe basar en tres características hidráulicas y topológicas del sistema:

- La relación entre caudal demandado y la longitud total de la red de tuberías.
- La distribución de demandas.
- El exponente de la función de costos.

Una vez encontrada la Línea de Gradiente Hidráulica óptima del sistema, se asignan las pérdidas de energía objetivo de cada tramo que compone la red y se encuentra el diámetro ideal de cada tubería, con el fin de que las pérdidas de energía objetivo y las reales sean muy parecidas. En este punto se tienen los diámetros continuos para cada tramo de la red que conllevan al diseño óptimo

de esta. Lamentablemente, los diámetros continuos deben ser discretizados, ya que en el mercado local solo se pueden conseguir ciertos tamaños de tuberías. Para realizar esta aproximación a los diámetros comerciales se usan distintas metodologías, todas con el fin de que la línea de gradiente hidráulico obtenida, se aleje lo menos posible a la Línea de Gradiente Hidráulico ideal.

Bermúdez realizó algunas modificaciones en la metodología SOGH para poder ser usadas en el diseño de redes de Riego Localizado de Alta Frecuencia. Estos cambios se debieron principalmente a que en una red de riego, los caudales demandados no se conocen a priori. Esto se debe a que estos caudales, suministrados por los emisores, son función de la presión que se tenga en los mismos. Por esta razón, no se puede hablar de un centroide de demanda, ni tampoco de una Línea de Gradiente Hidráulico objetiva a priori. Posteriormente, Hernández (2012) propuso una metodología de diseño mediante SOGH y Programación Lineal, la cual daría resultados más económicos que los obtenidos por medio de la metodología SOGH – Ajustada propuesta por Bermúdez. Esta nueva metodología se explicará más a fondo en las siguientes páginas.

Sin embargo, el gran aporte de Bermúdez al desarrollo de una metodología para el diseño óptimo de submódulos de sistemas RLAF consistió en un proceso para encontrar la presión de entrada al submódulo (PES) que cumpliera con el Coeficiente de Uniformidad del diseño agronómico, dada la topología de la red y las características del emisor. Esta se explica a continuación.

2.5.2 Cálculo de la presión de entrada al Submódulo propuesto por Bermúdez

Por medio de diversos análisis, Bermúdez encontró que existía una relación inversamente proporcional entre el Coeficiente de Uniformidad Resultante (CU_R) y la Presión de Entrada al Submódulo (PES), descrita por una función polinómica de segundo orden (Bermúdez, 2011). Esta relación se puede apreciar en la siguiente gráfica:

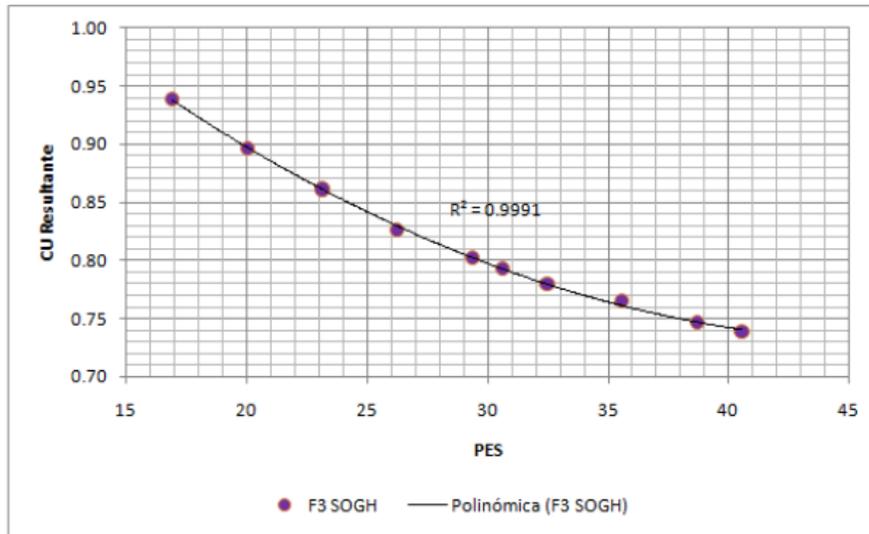


Figura 6 Relación $CU_R - PES$. Tomado de Bermúdez (2011).

Haber encontrado esta relación fue de fundamental importancia ya que por medio de esta se estableció que se podría llegar a conocer la PES necesaria para cumplir exactamente con un Coeficiente de Uniformidad establecido por el diseño agronómico. De esta forma, el trabajo de Bermúdez se enfocó a entender y comprobar qué parámetros hidráulicos y topológicos podrían explicar esta relación polinómica:

$$CU_R = \alpha(PES)^2 + \beta(PES) + \gamma \quad (\text{Ecuación 22})$$

en donde los factores α , β y γ son los coeficientes que describen la relación y son influenciados por parámetros hidráulicos y topológicos propios del sistema. Para encontrar estas relaciones, Bermúdez realizó múltiples variaciones de parámetros y verificó si éstas influenciaban en la curva $CU_R - PES$. Los parámetros que tuvo en cuenta para el análisis fueron los siguientes:

- Variación del exponente del emisor (x)
- Variación del coeficiente del emisor (k)
- Variación de la topología de la red
- Variación en los caudales requeridos
- Variación en la presión media de operación
- Variaciones en el Coeficiente de Uniformidad requerido (CU_I)
- Cambios debido al coeficiente de Variación de Fabricación del Emisor (CV)
- Variación en el número de emisores por planta (n_e)

Después de verificar los anteriores parámetros, Bermúdez llegó a la conclusión de que la curva $CU_R - PES$ se veía influenciada por la presión media de operación, del exponente del emisor, el Coeficiente de Uniformidad Inicial (CU_I) y el Coeficiente de Variación del Emisor (CV), mientras es

independiente del caudal medio de operación y la topología de la red. Establece finalmente que la ecuación que relaciona el Coeficiente de Uniformidad Resultante y la Presión de Entrada al Submódulo es la siguiente:

$$CU_R = \alpha(PES)^2 + \beta(PES) + \gamma + \gamma_{[CU]} + \gamma_{[CV]} \quad (\text{Ecuación 23})$$

donde α , β y γ se pueden calcular por medio de la siguiente tabla, conociendo de antemano la presión media en el submódulo (h_m) y el exponente del emisor (x):

Tipo de Emisor	Presión Nominal [mca]	α	β	γ
Bajo Caudal	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	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	$[0.0005x - 0.000054]$	$[-0.0413x + 0.00206]$	$[0.6065x + 0.8753]$

*Nota: Las ecuaciones referentes a $H_m = 10$ mca son aplicables para emisores de Bajo y Alto caudal.

Figura 7 Valores para α , β y γ según h_m y x . Tomado de Bermúdez (2011).

Por otra parte, $\gamma_{[CU]}$ y $\gamma_{[CV]}$ corresponden a los coeficientes de corrección debido a cambios en el Coeficiente de Uniformidad Inicial (CU_I) y en el Coeficiente de Variación (CV) correspondientemente.

El parámetro $\gamma_{[CU]}$ se puede calcular por medio de la siguiente ecuación y representa una tasa de cambio igual a un valor de 0.03 por cada diferencia del 5% en el CU_I con respecto a un CU del 80%:

$$\gamma_{[CU]} = 0.03 * \left[\frac{CU_I - 0.8}{0.05} \right] \quad (\text{Ecuación 24})$$

Adicionalmente, este coeficiente es independiente de la presión y caudal medio de operación del emisor y topología de la red.

De la misma forma, $\gamma_{[CV]}$ es independiente de la presión y el caudal medio de operación del emisor, y topología de la red. Este coeficiente representa una tasa de cambio igual a un valor de 0.004 por cada diferencia del 0.01 en el CV con respecto a un CV DE 0.04. Este se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$\gamma_{[CV]} = 0.004 * \left[\frac{CV - 0.04}{0.01} \right] \quad (\text{Ecuación 25})$$

Una vez encontrados los coeficientes α , β , γ , $\gamma_{[CU]}$ y $\gamma_{[CV]}$ los cuales explican la curva $CU_R - PES$, es necesario definir la Presión de Entrada al Submódulo en función de la presión mínima permisible y la presión media de operación, por lo cual se tiene:

$$\Delta H = h_{Max} - h_{mp}$$

Sabiendo que la altura de presión máxima corresponde a la Presión de Entrada al Submódulo (*PES*), se despeja ésta haciendo uso de la ecuación 26:

$$\Delta H = M[h_m - h_{mp}] \quad (\text{Ecuación 26})$$

$$PES = \Delta H + h_{mp} \quad (\text{Ecuación 27})$$

$$PES = M[h_m - h_{mp}] + h_{mp} \quad (\text{Ecuación 28})$$

Finalmente para la construcción de la curva $CU_R - PES$, Bermúdez propone un rango entre 0.5 y 4.5 para el valor del factor M, con un ΔM de 0.1 para su determinación. Una vez establecida la curva, sólo se necesita revisar cual debe ser la Presión de Entrada al Submódulo que cumple exactamente con el Coeficiente de Uniformidad (*CU*) requerido por el diseño agronómico.

2.6 Metodología de diseño optimizado de submódulos de sistemas RLA mediante Programación Lineal propuesto por Hernández

David Hernández, estudiante de la Universidad de los Andes, estableció una metodología de diseño óptimo de submódulos de sistemas de Riego Localizado de Alta Frecuencia, haciendo uso de la metodología SOGH (Saldarriaga & Ochoa, 2009) y la metodología para el cálculo de la Presión de Entrada al Submódulo (Bermúdez, 2011). Para poder encontrar la solución óptima de diseño del submódulo, Hernández propuso modelar el problema mediante una formulación lineal, siendo de esta forma posible encontrar el diseño óptimo de la red.

Al ser las redes de riego redes abiertas es posible solucionar el problema de diseño mediante Programación Lineal. Para esto, se debe conocer diferentes parámetros hidráulicos y topológicos de la red. Dentro de estos se encuentran la longitud de los tramos, la rugosidad absoluta de las tuberías (k_s), el coeficiente de pérdidas menores (k_m) y el caudal transportado en cada tramo. Teniendo estos parámetros, Hernández propone usar cuatro matrices, con las cuales se modela el problema de forma lineal y por medio de las cuales se encuentra el diseño óptimo:

1. **Matriz de pérdidas totales de energía:** En esta matriz se establece cuáles son las pérdidas de energía debido a fricción y accesorios que se tendrían en cada tramo de la red para cada uno de los diámetros comerciales disponibles. La energía total está calculada por medio de la ecuación de Darcy – Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook – White:

$$\Delta H = \frac{Q_{i,j}^2}{2 \cdot g \cdot A_{i,j}^2} \left[\sum k_{m i,j} + f_{i,j} \frac{l_{i,j}}{d_{i,j}} \right]$$

donde:

ΔH corresponde a las pérdidas totales entre los nudos i y j

$Q_{i,j}$ corresponde al caudal que es transportado por la tubería entre los nudos i y j

$k_{m i,j}$ corresponde al coeficiente de pérdidas menores entre los nudos i y j

$f_{i,j}$ corresponde al factor de Darcy, calculado por medio de la ecuación de Colebrook-White

Esta matriz es denotada como la matriz DP y tiene la siguiente forma, tomando como ejemplo la siguiente red:

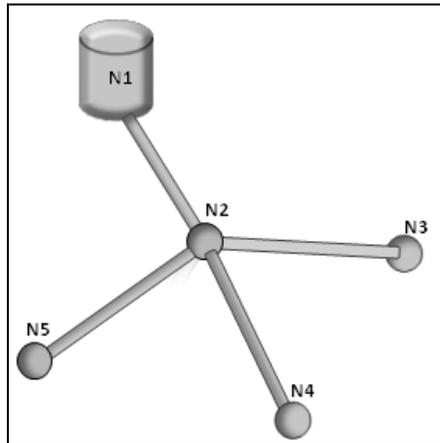


Figura 2 Red ejemplo. Tomada de Hernández (2012).

Se establece una red pequeña donde se tiene una fuente de abastecimiento (N1) y 4 nudos de demanda (N2, N3, N4 y N5).

Tabla 10 Matriz de Pérdidas Totales (DP. Tomado de Hernández (2012).

Pérdidas Totales (m)		Diámetros Comerciales (mm)		
		200	100	75
Tramo	N ₁ -N ₂	0.0642	18.153	73.182
	N ₂ -N ₃	0.0189	0.5176	2.052
	N ₂ -N ₄	0.0403	1.1113	4.4235
	N ₂ -N ₅	0.0413	1.1373	4.5219

En la figura anterior se puede ver un ejemplo para la matriz de pérdidas totales (DP), donde para cada diámetro comercial disponible tiene asociada una pérdida de energía

total entre dos diferentes nudos. De esta forma se tiene por ejemplo, que entre el nudo 2 (N_2) y el nudo 3 (N_3) se tiene una pérdida de energía de 0.5176 metros.

2. **Matriz de costos:** Esta matriz corresponde a los costos que se tendrían al usar una tubería de cada diámetro comercial disponible en cada uno de los tramos que componen el sistema. Este costo se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$C = K * L * (D^x) \quad (\text{Ecuación 29})$$

donde:

C corresponde al costo de la tubería

K y x corresponden al coeficiente y al exponente de la ecuación de costos

L es el la longitud de la tubería

D corresponde al diámetro de la tubería

3. **Matriz de Líneas de Gradiente Hidráulico mínimas (LGH_{min}):** Esta matriz corresponde a las alturas piezométricas mínimas que debería tener cada uno de los nudos, para que se cumpliera la presión mínima requerida por el diseño agronómico. Para poder establecer esta matriz se deben conocer la altura topográfica de cada uno de los nudos y la presión mínima permitida, siendo esta última calculada por medio de la tolerancia de caudales y los requerimientos agronómicos del cultivo:

$$LGH_{min-i} = h_{topografica-i} + h_{min} \quad (\text{Ecuación 30})$$

4. **Matriz de conectividad:** Matriz binaria que indica si existe una conectividad entre dos nudos del sistema, tomado un valor de uno si existe tal conexión o cero de lo contrario. Para el caso del ejemplo correspondería a la siguiente:

Tabla 11 Matriz de Conectividad (w).

Tramo	Conectividad
N_1-N_2	1
N_2-N_3	1
N_2-N_4	1
N_2-N_5	1

Por otra parte, es necesario fijar variables de decisión, restricciones del problema y la función objetivo para que el problema pueda ser resuelto mediante Programación Lineal. En base a esto, Hernández estableció los siguientes parámetros:

Variable de decisión X_{ija} :

Esta variable binaria será la que establecerá si para el tramo comprendido entre el nudo i y el nudo j se tiene una tubería con un diámetro d . De esta forma se tendrá 1 si la tubería de diámetro d está uniendo esto dos nudos, o 0 de lo contrario:

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

siendo N el conjunto que contiene todos los nudos del submódulo y D , el conjunto que contiene todos los diámetros comerciales disponibles.

Restricciones del problema:

Hernández establece también 3 restricciones del problema, las cuales tendrá que cumplir el diseño óptimo encontrado:

- Restricción de Línea de Gradiente Hidráulico LGH_{min} : Se desea que todos los nudos tengan una línea de gradiente hidráulico superior a la Línea de Gradiente Hidráulica Mínima establecida por medio de la Ecuación 30.
- Restricción de LGH en nudos aguas abajo: Se debe verificar que exista una conservación de la energía, por lo cual se debe asegurar que la LGH de un nudo aguas abajo sea la resta entre la LGH del nudo aguas arriba de éste y las pérdidas totales que se dieron en el tramo:

$$LGH_j = LGH_i - \sum_{d \in D} dp_{ija} * X_{ija} \quad (\text{Ecuación 31})$$

- Restricción de un único diámetro en cada tramo: Por medio de esta restricción se quiere asegurar que en cada tramo se asigne únicamente un diámetro.

Función Objetivo

La función objetivo corresponde al costo total de las tuberías que componen la red:

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{d \in D} C_{ija} * X_{ija} \quad (\text{Ecuación 32})$$

El objetivo de la metodología es minimizar los costos totales, sin incumplir las restricciones establecidas, obteniendo así el diseño óptimo.

Ya establecidos estos parámetros, se puede hacer uso de Xpress, el cual es un software especializado en optimizar funciones haciendo uso de sofisticados subprocesos y algoritmos que tienen la capacidad de resolver problemas lineales, cuadráticos y convexos, entre otros. Sin embargo, cuando se desea aplicar esta forma de solución al problema de las redes de Riego Localizado de Alta Frecuencia existe un inconveniente. Como se había explicado anteriormente, los caudales que son suministrados por los emisores son función de la altura de presión que se tengan en éstos. Esta altura de presión va a variar a medida que el agua se aleja del punto de entrada al submódulo, debido a las pérdidas por fricción y las pérdidas menores. Por esta razón, no se puede realizar la matriz (DP) de forma directa. Para resolver este problema, Hernández hace uso de la metodología SOGH (Saldarriaga y Ochoa, 2009), por medio de la cual se puede establecer una Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico de la red y de esta forma, poder conocer por medio de la ecuación del emisor, el caudal que es suministrado por éste. Una vez encontrados estos caudales, estos se establecen como demandas constantes y se puede hacer uso de Programación Lineal para encontrar el diseño Óptimo.

Hernández encontró que el diseño final encontrado mediante Programación Lineal es sensible a la flecha con la que se diseñe la Superficie de Gradiente Hidráulico. Esto se debe a que a medida que se cambia la flecha de diseño en la metodología SOGH, se está cambiando también las presiones ideales en los nudos y al mismo tiempo los caudales que son suministrados por cada emisor. Debido a estos cambios en el caudal, se encontró que algunos de los diseños finales encontrados mediante Programación Lineal no cumplían con las presiones mínimas requeridas por el diseño agronómico.

Mediante un análisis detallado, Hernández estableció que el rango en donde se debe encontrar la flecha de diseño óptima va a estar entre un valor de 0 y 0.25. De esta forma, propone comenzar con los límites de este rango, es decir, encontrar el diseño mediante una flecha de 0 y una flecha de 0.25. Una vez obtenidos estos diseños (los cuales fueron encontrados mediante caudales constantes), deben ser modelados mediante emisores, y se debe comprobar que los nudos tengan una presión mayor o igual a la presión mínima establecida. En el caso de que el diseño encontrado mediante una flecha de 0.25 cumpla con las presiones mínimas, se debe tomar éste como diseño final del sistema, ya que correspondería al diseño óptimo. Si por otro lado, existen nudos con

presiones menores a la mínima, Hernández propone calcular el promedio de los caudales obtenidos por medio de estas dos flechas y volver a diseñar mediante Programación Lineal. Este proceso se repite hasta que todos los nudos tengan una presión mayor o igual a la presión mínima, y se obtenga el diseño óptimo final del submódulo.

A continuación se presenta un diagrama de flujo de la metodología propuesta por Hernández para el diseño óptimo de submódulos de sistemas RLAF:

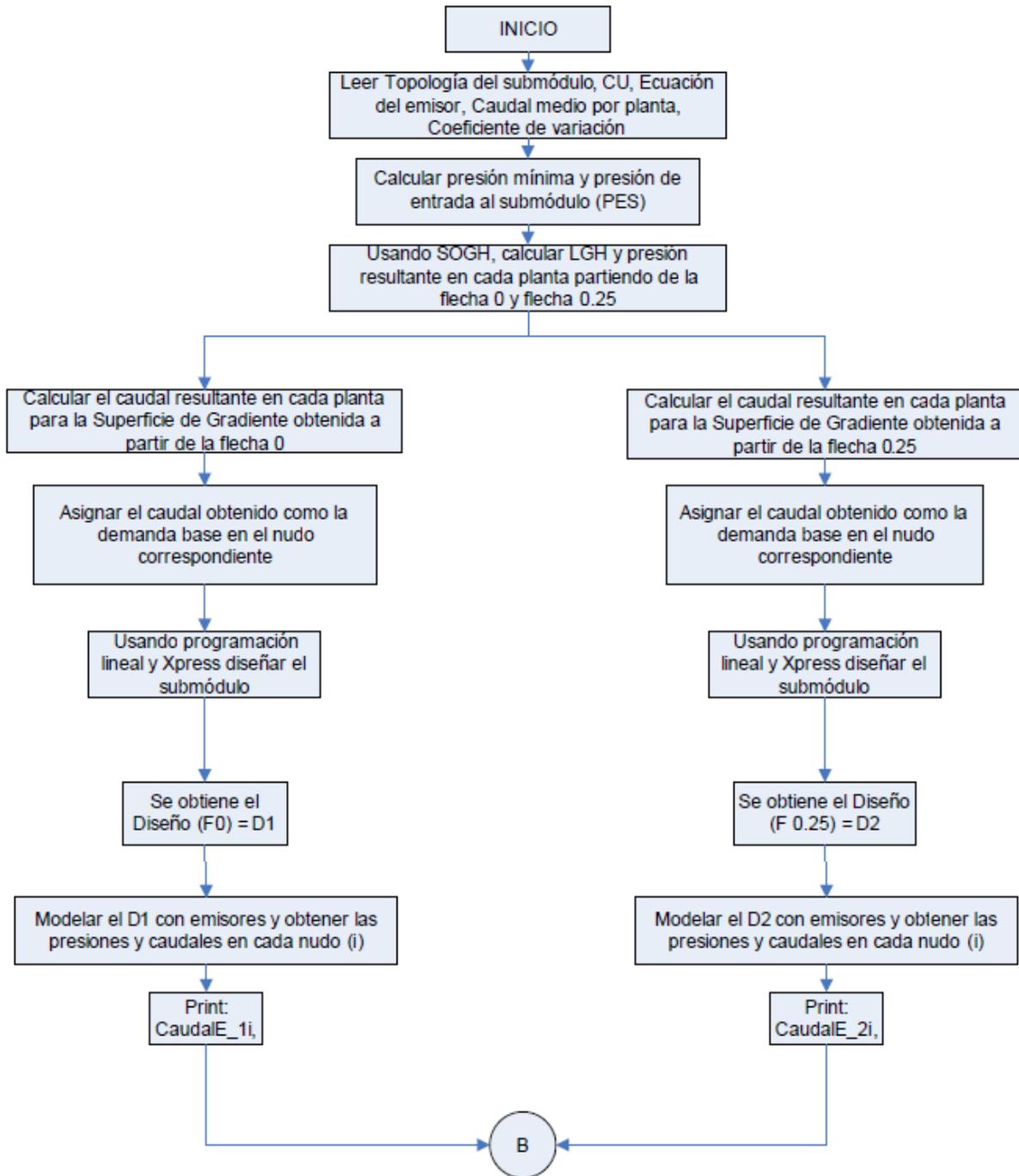


Figura 8 Diagrama de Flujo, metodología para diseños de Su módulos de sistemas RLAf mediante Programación Lineal y SOGH. Tomado de Hernández (2012).

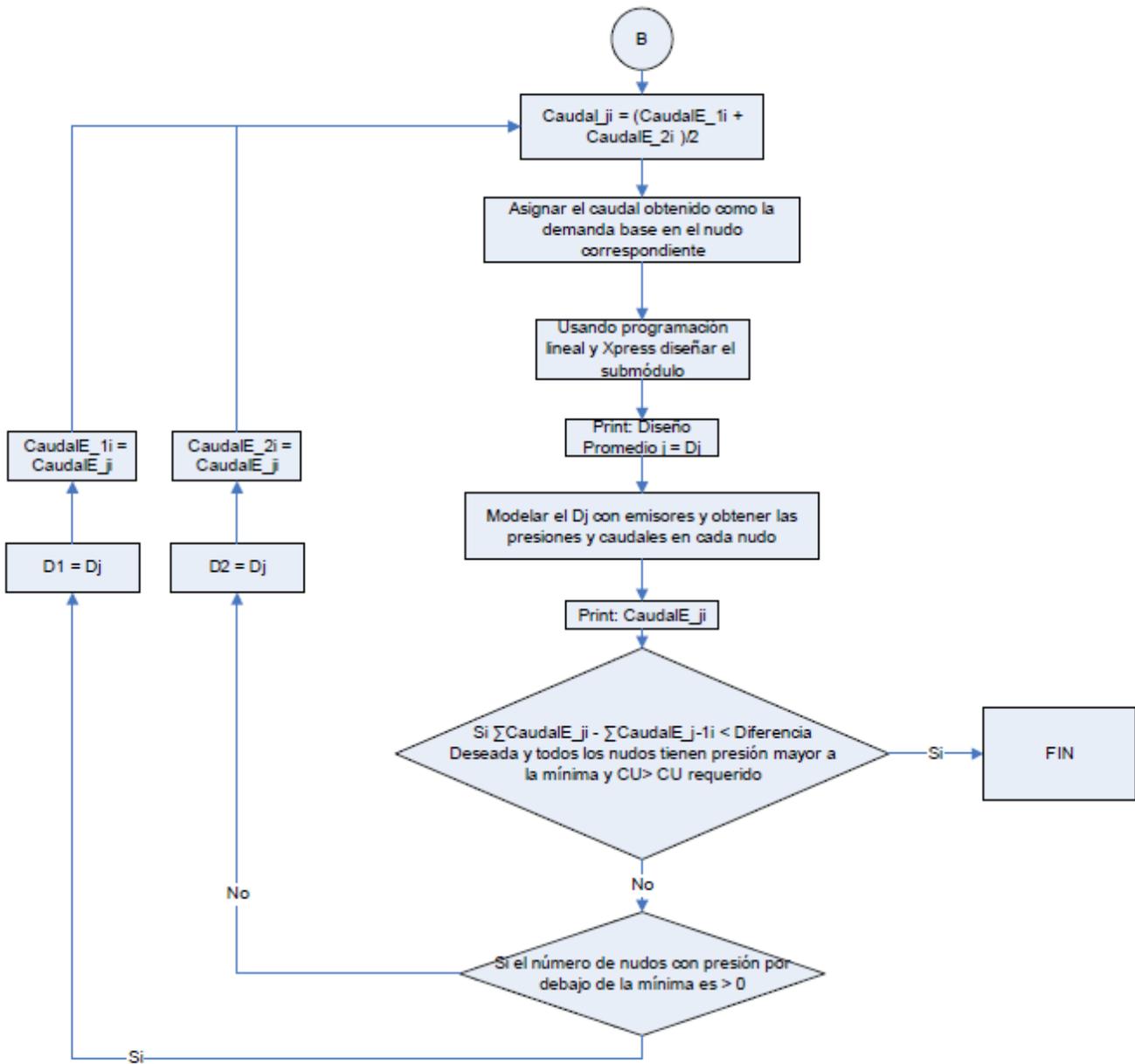


Figura 9 Diagrama de Flujo, metodología para diseños de Su módulos de sistemas RLA mediante Programación Lineal y SOGH. Tomado de Hernández (2012).

Debido a que para el análisis de la red matriz se utilizará la metodología propuesta por Bermúdez y Hernández para el diseño de submódulos, objetivo de esta tesis, es necesario realizar algunas pruebas con el fin de verificar que los diseños finales cumplan con todos las presiones mínimas, caudales demandados, Coeficiente de Uniformidad y demás requerimientos agronómicos, además de ofrecer un diseño más económico que el encontrado usando la metodología SOGH. A continuación se presentan las pruebas realizadas para esta metodología.

2.7 Pruebas para la metodología propuesta por Bermúdez y Hernández para el diseño de submódulos de sistemas RLAF

Se realizaron varias pruebas para la metodología propuesta, teniendo en cuenta varios escenarios donde varían la topografía, el número de emisores por planta, el caudal medio por emisor, entre otros. A continuación se presentan cada escenario y su respectivo resultado:

2.7.1 Caso de estudio 1, Submódulo simétrico con topografía planta

Este caso de estudio corresponde a un submódulo de veinte laterales, cada uno con 5 plantas. El caudal medio por planta es de 80 L/h. El terreno es completamente plano, por lo cual la LGH corresponde a la altura de presión únicamente. La topología de la red se muestra a continuación con los demás requerimientos agronómicos:

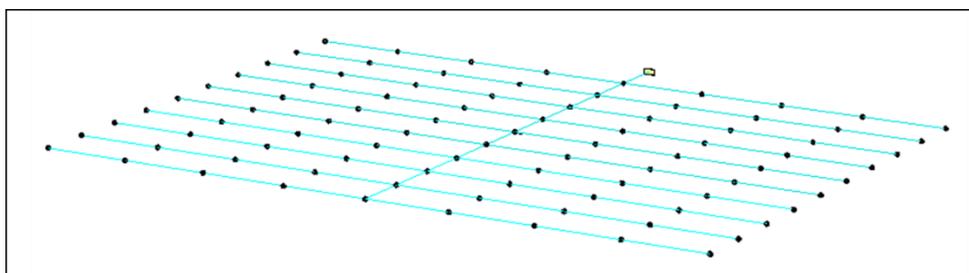


Figura 10 Caso de Estudio 1, REDES 2012.

Tabla 12 Datos agronómicos Caso de Estudio 1.

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)
()	()	(m)	(L/h)
0.8	1	10.08	80

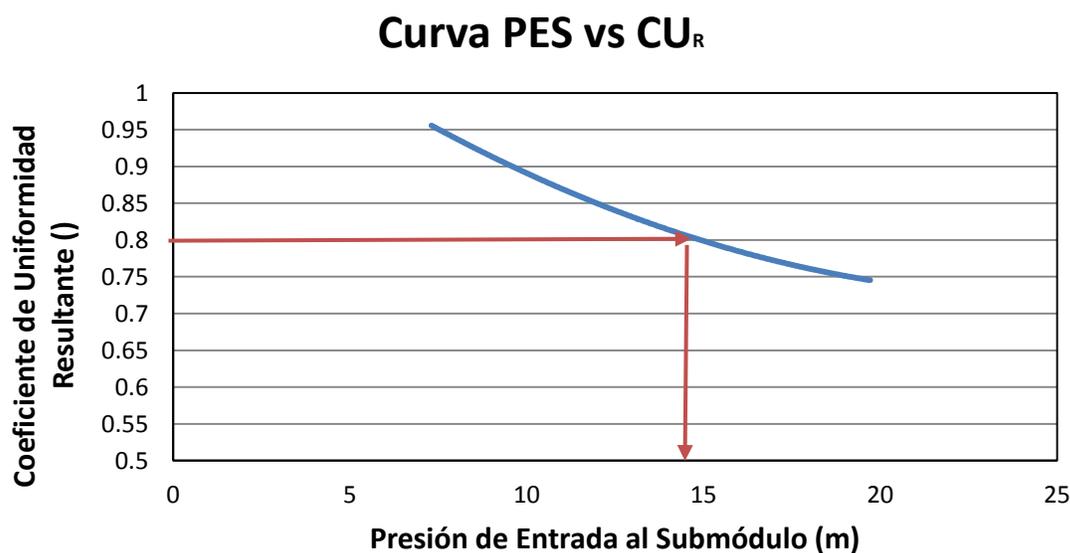
Coefficiente de variación del emisor (CV)	0.04
Exponente del emisor	0.5
Coefficiente del emisor (L/h)/(mx)	0.007

Adicionalmente, se tiene una longitud de 5 metros entre lateral y lateral, y una longitud de 2 metros entre planta y planta.

Por medio de la metodología propuesta por Bermúdez (2011), se obtiene el siguiente resultado para la Presión de Entrada (PES) y la presión mínima permisible:

Tabla 13 PES y presión mínima, Caso de Estudio 1.

Presión mínima en el submódulo (m)	7.16
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	14.89



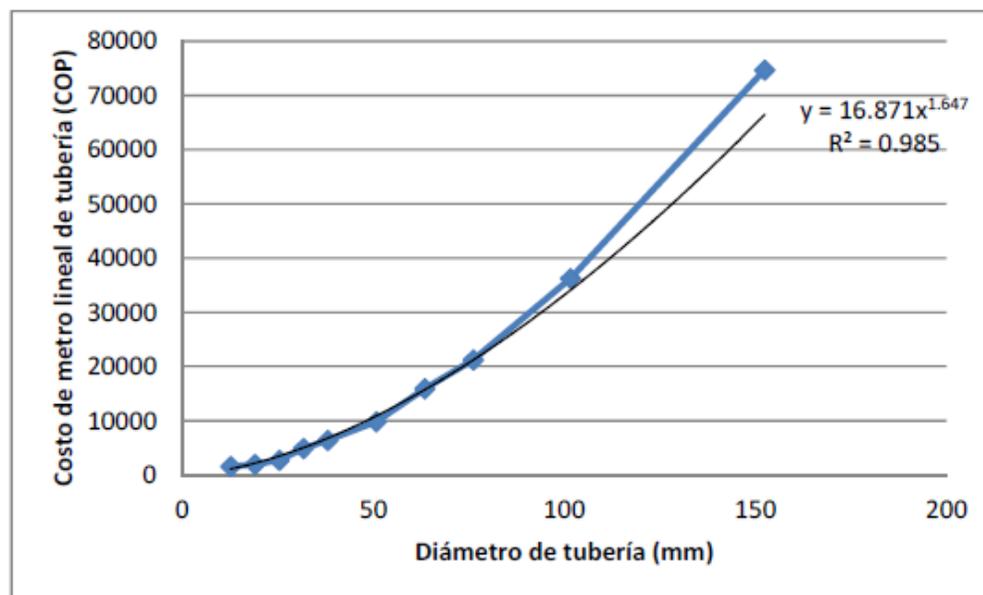
Gráfica 1 Coeficiente de Uniformidad Resultante vs PES, Caso de estudio 1.

Para el diseño, se tiene la siguiente lista de diámetros comerciales disponibles:

Tabla 14 Diámetros Comerciales Disponibles, Caso de Estudio 1.

Diámetros (mm)	6.2	9.5	12.7	19.05	25.4	31.75	38.1	50.8	63.5	76.2	101.6	152.4	200
-----------------------	------------	------------	-------------	--------------	-------------	--------------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------------	--------------	------------

Adicionalmente, se usará un exponente de 1.647 y un coeficiente de 16.871 para la ecuación de costos. Estos fueron obtenidos por David Hernández en su trabajo según los costos de tuberías en pesos colombianos (COP):



Gráfica 2 Curva Costo vs Diámetros de tubería. Tomado de Hernández (2012).

Siguiendo la metodología propuesta por Hernández, se realizaron los diseños del submódulo por medio de Programación Lineal para las Superficies de Gradiente Hidráulico obtenidas con una flecha de 0 y 0.25. Posteriormente, estos diseños son modelados mediante emisores y se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 15 Resultados Caso de Estudio 1.

Diseño	Caudal Total del submódulo (L/s)	CUr	Presión Mínima (m)	Nudos con Presión < Presión mínima	Costo submódulo (COP)
Flecha 0	1.848045	0.9075	7.16	0	\$ 259,741.69
Flecha 0.25	1.819442	0.9055	6.909	12	\$ 252,201.88

En la tabla anterior se puede evidenciar los dos diseños para el submódulos obtenidos por medio de una flecha 0 y una flecha de 0.25. Tal como explica Hernández, el caudal que es transportado por el diseño obtenido por la flecha de 0.25 (D2) es mayor al caudal transportado por el diseño obtenido por la flecha 0 (D1). Esto se debe a que un aumento en la flecha significa una mayor curvatura en la SGH, y por consiguiente, una disminución en el caudal total. Se puede apreciar también como en el diseño D2 se incumplen restricciones de presión mínima, teniendo 12 nudos donde este requerimiento no es cumplido.

Se procede entonces a realizar el promedio del caudal para cada uno de los nudos, y se vuelve a diseñar el submódulo por medio de Programación Lineal. Este proceso se repite hasta que todos los nudos tengan una presión menor o igual a la presión mínima permitida. Se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 16 Resultados Caso de Estudio 1.

Diseño	Caudal Total del submódulo (L/s)	CUr	Presión Mínima (m)	Nudos con Presión < Presión mínima	Costo submódulo (COP)
Promedio 1	1.837013	0.9075	7.074	4	\$ 258,055.50
Promedio 2	1.848045	0.9075	7.16	0	\$ 259,741.69

En los resultados anteriores se puede apreciar como a medida que se hacen más iteraciones en el proceso de diseño, los nudos con presión menor a la presión mínima disminuyen. Sin embargo, este caso en especial, el diseño obtenido con el segundo promedio de caudales es el mismo diseño obtenido con una flecha diseño de 0. Esto quiere decir que éste sería el diseño óptimo de la red, teniendo un costo final de \$259,741.69 (COP). Este valor se compara con el costo obtenido para la red diseñada por medio de SOGH:

Tabla 17 Diseño obtenido por SOGH, Caso de Estudio 1.

Diseño	Caudal Total del submódulo (L/s)	CUr	Presión Mínima (m)	Nudos con Presión < Presión mínima	Costo submódulo (COP)
Diseño SOGH	1.87531	0.911	7.429	0	\$ 280,199.67

Acorde con los resultados planteados, el diseño obtenido por medio de la metodología propuesta por Bermúdez y Hernández es aproximadamente un 7.3% más económica en comparación con el diseño obtenido usando la metodología SOGH. De igual forma, los dos diseños cumplen los requisitos de presión mínima y Coeficiente de Uniformidad.

2.7.2 Caso de estudio 2, Submódulo Asimétrico con topografía planta

Este caso corresponde a un submódulo asimétrico de 7 laterales, los cuales contienen 5 nudos de demanda cada uno. La topografía del terreno es plana, mientras que la distancia entre laterales es de 5 metros y la longitud entre plantas es de 2 metros. Se usará un emisor por planta, teniendo en

cuenta un exponente de 0.3, con un coeficiente de 0.01 (L/s)(m^x). A continuación se presenta una vista del submódulo y los requerimientos agronómicos del cultivo:

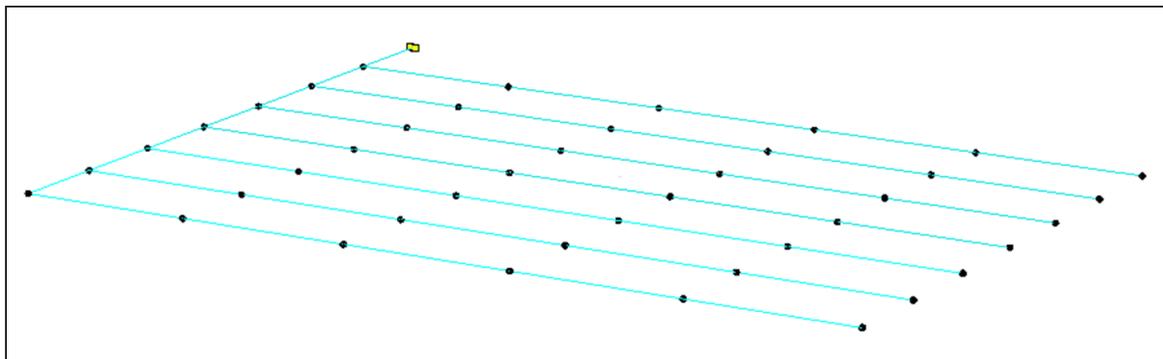


Figura 11 Caso de Estudio 2, red asimétrica con topografía plana.

Tabla 18 Datos Agronómicos, Caso de Estudio 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)
()	()	(m)	(L/h)
0.85	1	9.18	70

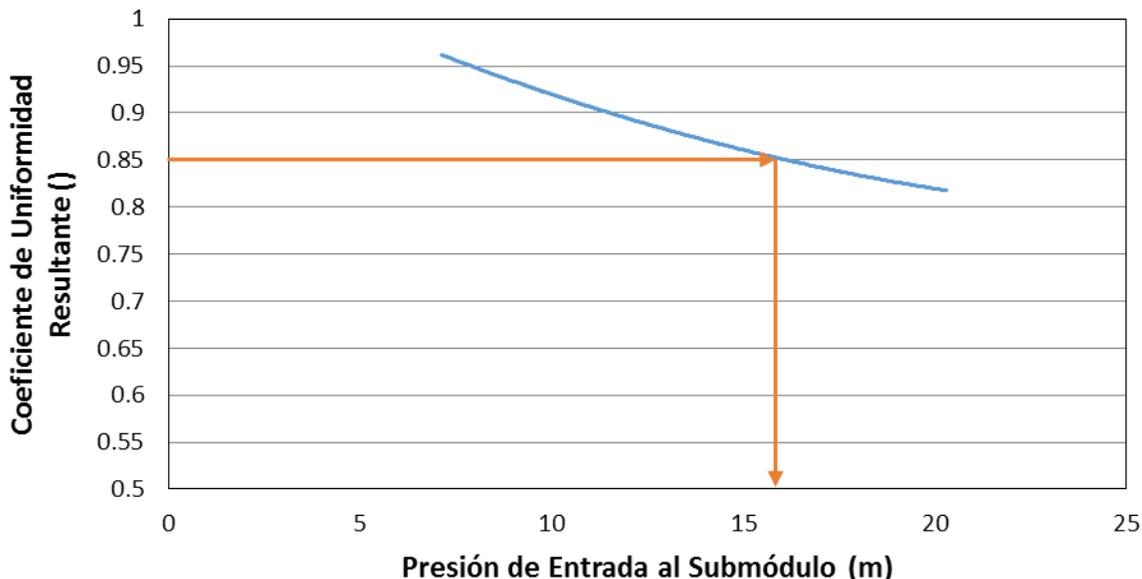
Coefficiente de variación del emisor (CV)	0.04
Exponente del emisor	0.3
Coefficiente del emisor (L/s)/(mx)	0.01

Por medio de la metodología propuesta por Bermúdez (2011), se obtiene el siguiente resultado para la Presión de Entrada (PES) y la presión mínima permisible:

Tabla 19 Resultados para PES y Pmin Caso de Estudio 2.

Presión mínima en el submódulo (m)	6.98
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	16.10

Curva PES vs CU_R



Gráfica 3 Curva CU vs PES, Caso de Estudio 2.

Para este diseño se utilizará la misma lista de diámetros comerciales disponibles que se usó en el Caso de Estudio 1. Se procede entonces al diseño del submódulo por medio de las SGH con una flecha de 0 y 0.25:

Tabla 20 Resultados Flecha 0 y Flecha 0.25 Caso de Estudio 2.

Diseño	Caudal Total del submódulo (L/s)	CU_R	Presión Mínima (m)	Nudos con Presión < Presión mínima	Costo submódulo (COP)
Flecha 0	0.823281	0.9181	7.212	0	\$ 105,990.84
Flecha 0.25	0.796922	0.9281	6.71	6	\$ 103,750.16

En los resultados anteriores se evidencia nuevamente como el diseño D2 incumple con 6 nudos donde la presión es menor a la presión mínima. Por otro lado, el diseño D1 satisface la presión mínima en todos los nudos. En los dos casos el Coeficiente de Uniformidad es superior al establecido por el diseño agronómico (0.85). Se continúa entonces con promedio de los caudales en cada uno de los nudos y se vuelve a diseñar mediante Programación Lineal:

Tabla 21 Resultados Metodología CIACUA y SOGH, Caso de Estudio 2.

Diseño	Caudal Total del submódulo (L/s)	CUr	Presión Mínima (m)	Nudos con Presión < Presión mínima	Costo submódulo (COP)
Promedio 1	0.82261	0.9034	7.06	0	\$ 105,296.42
Diseño SOGH	0.832984	0.9113	7.315	0	\$ 117,019.80

En la tabla anterior se muestra el diseño final obtenido por medio de la metodología propuesta por Bermúdez y Hernández para el diseño del submódulo. En ésta se obtiene un Coeficiente de Uniformidad de 0.9034, cumpliendo con el Coeficiente de Uniformidad requerido. De igual forma, cumple con la presión mínima en todos los nudos asegurando que todas las plantas reciban más del caudal mínimo especificado por el diseño agronómico. Este diseño tiene un valor de \$105,296.42 COP, resultando un 10.01% más económico que el diseño encontrado por medio de la metodología SOGH, el cual tiene un costo de \$117,019.80 COP.

Por medio de estos casos de estudio se demuestra que la metodología propuesta por Hernández y Bermúdez ofrece diseños más económicos que los encontrados por medio de SOGH, y que cumplen con los requerimientos agronómicos e hidráulicos necesarios para obtener un correcto crecimiento y producción del cultivo.

3. DISEÑO DE LA RED MATRIZ PARA SISTEMAS DE RIEGO LOCALIZADO DE ALTA FRECUENCIA

Por medio de los trabajos realizados por Bermúdez y Hernández se establece una metodología para diseñar submódulos de sistemas de riego localizado de alta frecuencia. Esto quiere decir que partiendo desde un diseño agronómico (establecido por el tipo de cultivo que se va a regar), una topografía establecida y una lista de diámetros comerciales, es posible encontrar el diseño óptimo para un submódulo. Este diseño comprende desde la válvula reguladora de presión hasta cada lateral que compone en el submódulo. Hernández establece que este diseño final cumplirá con los requisitos de presión mínima establecida por medio de la tolerancia de caudales y presiones.

Para este punto, resta entonces diseñar la red Matriz del sistema, la cual corresponde a las tuberías que comunican la fuente de abastecimiento con los submódulos que conforman el sistema. Esta red matriz está compuesta por la tubería primera y las tuberías secundarias:

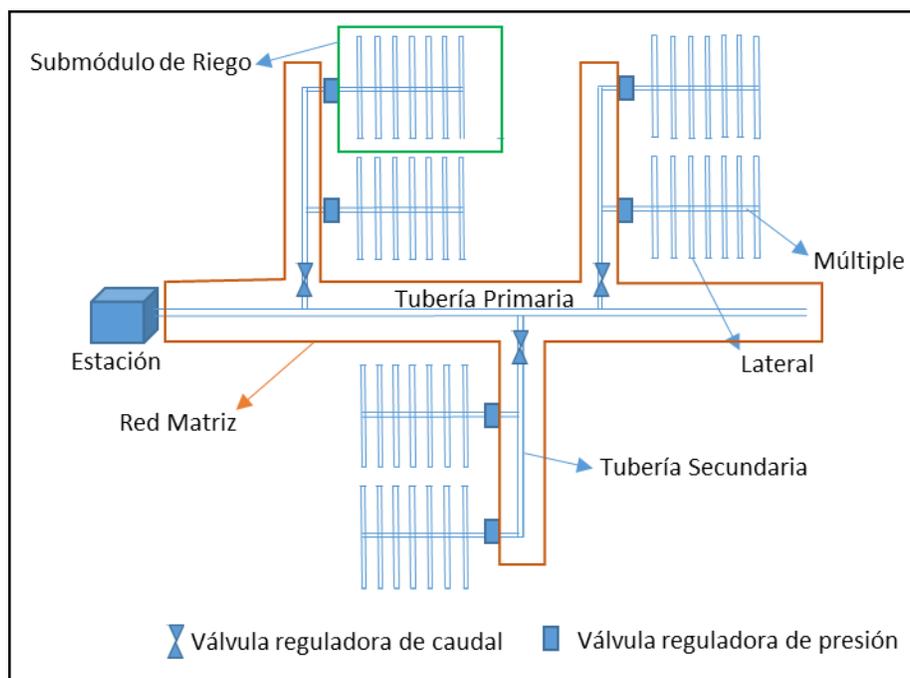


Figura 12 Esquema Red Matriz de Sistemas de Riego Localizado de Alta Frecuencia.

Como se puede ver en la figura anterior, la red Matriz no se compara en cantidad de tuberías con respecto a los submódulos de riego. En ésta, únicamente se están teniendo en cuenta la tubería primaria, la cual es la encargada de entregar el caudal a cada una de las tuberías secundaria y por lo tanto recorre todo el sistema, y las tuberías secundarias, las cuales se encargan de llevar el agua

desde las tuberías primarias hasta la válvula reguladora de presión, lugar donde empieza el submódulo de riego.

Aunque la cantidad de tuberías que componen la red Matriz es mucho menor a la cantidad de tuberías que componen cada uno de los submódulos de riego, ésta no es menos importante. El correcto diseño de la tubería principal es fundamental para que el sistema de riego sea eficiente y óptimo. Esta tubería tiene la obligación de transportar la totalidad del caudal que es demandado por cada una de las plantas que conforman el cultivo; esto hace que el tamaño de ésta sea bastante considerable. Adicionalmente, esta tubería debe recorrer todo el largo del sistema, por lo que es la tubería más larga de toda la red. Estos dos aspectos hacen que el costo de la tubería primera sea bastante elevado. Las tuberías secundarias tampoco dejan de ser importantes, ya que aunque no transportan todo el caudal total, si transporta el caudal demandado por los submódulos que alimentan. Igualmente, las longitudes de estas pueden ser considerables dependiendo de la distribución del cultivo y el terreno donde se llevará a cabo.

La presente investigación consiste entonces, en encontrar la forma de diseño óptima de la red Matriz, partiendo desde los avances de Bermúdez y Hernández para el diseño óptimo de los submódulos. Para esto, en primera instancia es necesario explicar el software con el cual se trabajara para lograr el objetivo.

3.1 Programa REDES

El Programa REDES es un software especializado en el diseño de redes de distribución de agua potable (RDAP) desarrollado por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Consiste en una herramienta de simulación de sistemas de tuberías con flujo a presión, por medio de la cual es posible diseñar redes nuevas, o ampliar redes existentes. Este software está enfocado al diseño optimizado de redes, para lo cual hace uso de diversas metodologías de diseño. Dentro de estas se encuentran: Algoritmos Genéticos aplicados al diseño de redes, Superficie Óptima de Presiones (SOP), Programación por Restricciones, Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico (SOGH), Búsqueda de Armonía, y Optimal Power Use Surface (OPUS), siendo esta última la metodología que se usará para el análisis de la red Matriz:

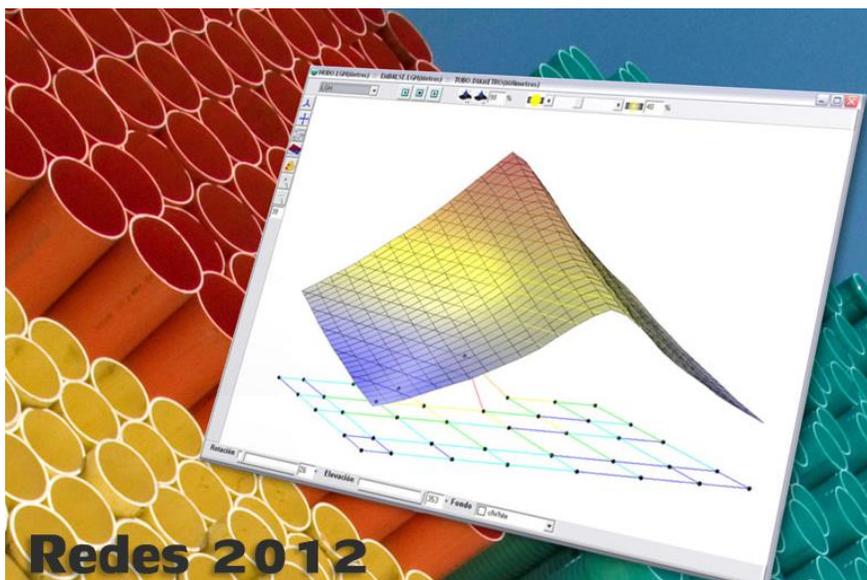


Figura 13 Programa Redes, desarrollado por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, CIACUA.

REDES ofrece la posibilidad de simular y diseñar redes de tuberías, contando con elementos como embalses, tanques, válvulas, bombas, tuberías, emisores, y nudos de demanda. Adicionalmente, el programa permite múltiples opciones de cálculo al usuario; entre estas se encuentran el cálculo hidráulico estático (cálculo de alturas piezométricas y presiones), cálculo hidráulico en periodo extendido (cálculo hidráulico a diferentes horas del día), cálculo de calidad del agua (concentración, edad, trazadores y porcentaje de procedencia), diseño de RDAP con métodos modernos y sumamente óptimos, calibración de redes y cálculo del Índice de Resiliencia. Todo esto en conjunto con una interfaz gráfica bastante clara, donde es posible ver desde parámetros como la presión, el caudal y líneas de gradiente hidráulico ideales y reales, hasta curvas de nivel y superficies.

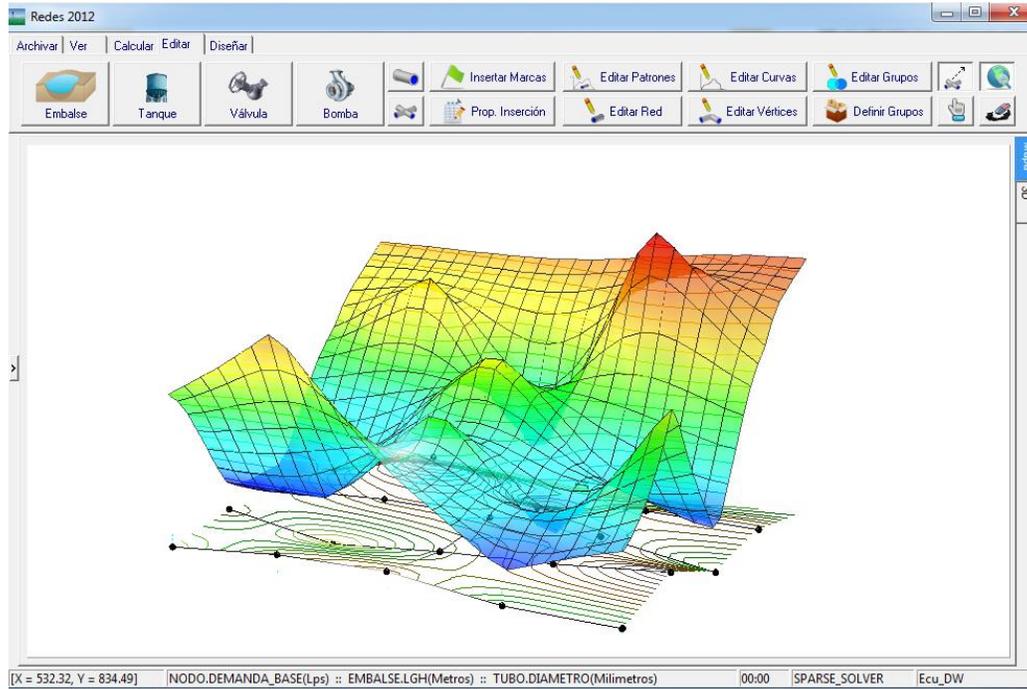


Figura 14 Interfaz REDES. Elementos de diseño.

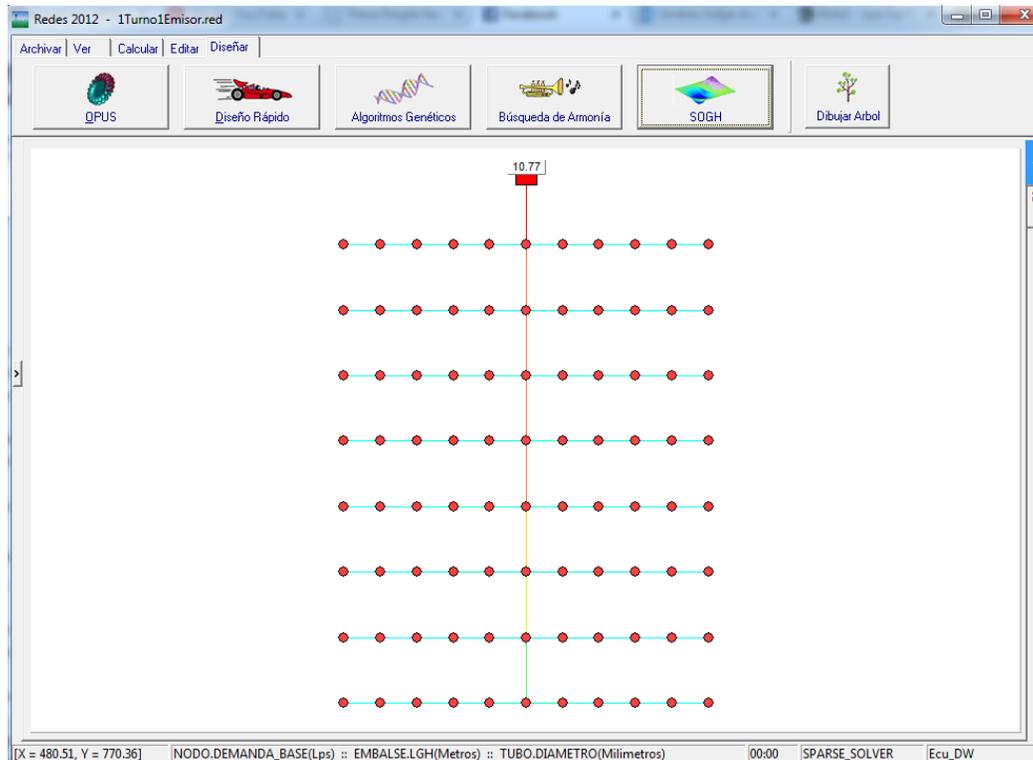


Figura 15 Interfaz REDES. Metodologías de diseño.

3.2 Planteamiento de la Red Matriz

Por medio de los avances logrados por Bermúdez y Hernández es posible diseñar óptimamente un submódulo de sistema RLAF; resta ahora diseñar la red matriz optimizando el diseño para que se obtenga el menor costo constructivo. Para este fin, es necesario simplificar un poco el sistema de riego. Dado que para este punto ya se conoce una metodología óptima de diseño de submódulos de sistemas de Riego Localizado de Alta Frecuencia, se podría pensar en simplificar estos componentes de la red.

Al finalizar el diseño de un submódulo de RLAF, se deben obtener los diámetros de cada una de las tuberías que componen el múltiple y los laterales. De igual forma, se debe conocer cuál es la Presión de Entrada al Submódulo (PES), la cual se obtiene mediante la metodología de Bermúdez (2011). Esta presión de entrada es controlada por la válvula reguladora de presión, ubicada a la entrada de cada submódulo. Esta válvula se encarga de controlar la presión que entra al submódulo para que se ajuste a la deseada, teniendo claramente, aguas arriba de está, una presión de llegada más alta o igual a la presión deseada. Adicionalmente, al finalizar el diseño de un submódulo, se conoce también el caudal total que es demandado por éste.

Teniendo en cuenta estas dos premisas, es posible modelar el submódulo como un nudo de demanda constante y presión constante. Esta suposición será fundamental para poder analizar correctamente el diseño óptimo de la red Matriz.

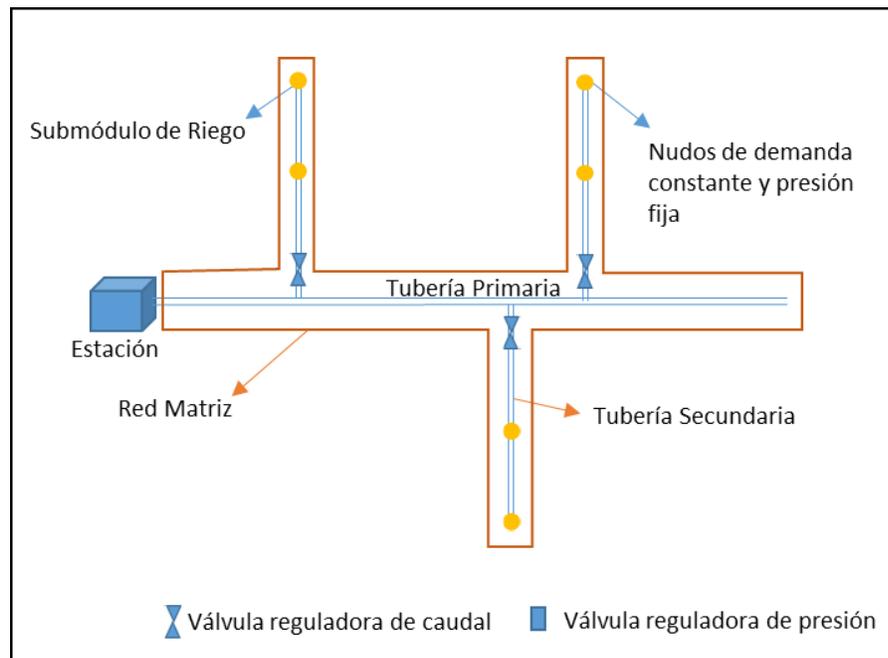


Figura 16 Modelación Red Matriz.

Haciendo estas dos suposiciones y realizando la modelación anteriormente propuesta, la red Matriz se convierte en una red abierta con nudos de demanda constante y presión fija, por lo cual se podría comparar con una red abierta de distribución de agua potable (RDAP). Como se explicó anteriormente, el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes, CIACUA, ha desarrollado diversas metodologías para el óptimo diseño de este tipo de redes, de las cuales sobresalen la metodología SOGH (Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico, Saldarriaga & Ochoa 2009) y la metodología OPUS (Optimal Power Use Surface, Saldarriaga et al., 2012).

Se podría pensar entonces que el problema queda reducido a encontrar el diseño óptimo de la red Matriz usando las metodologías de diseño propuestas por el CIACUA. Sin embargo, existen ciertas variables que pueden llegar a modificar el diseño de la red Matriz debido a que éstas pueden alterar tanto el caudal demandado y transportado, como la Presión a la Entrada del Submódulo. Dentro de estas variables se encuentran los turnos de riego, la distribución de turnos de riego y los números de emisores que se usen por planta.

Antes de explicar en qué consisten estas variables es necesario explicar la metodología de diseño con la que se trabajará para entenderlas. La metodología OPUS ha sido un gran avance del CIACUA para el diseño de redes de distribución de agua potable (RDAP), ofreciendo diseños óptimos los cuales cumplen con todos los requerimientos de demanda e hidráulicos. A continuación se explica brevemente en que consiste esta metodología.

3.3 Metodología OPUS (Optimal Power Use Surface)

Como se explicó anteriormente, la metodología OPUS nació como una solución al problema de diseño de redes de distribución de agua potable (RDAP). El objetivo de esta metodología es obtener un diseño de mínimo costo haciendo uso de un número reducido de iteraciones. Esto lo consigue haciendo uso de principios hidráulicos deterministas, obtenidos por medio del análisis de la distribución del caudal y de la forma en que la energía es usada en estos sistemas. La metodología consiste en 6 subprocesos que son explicados a continuación:

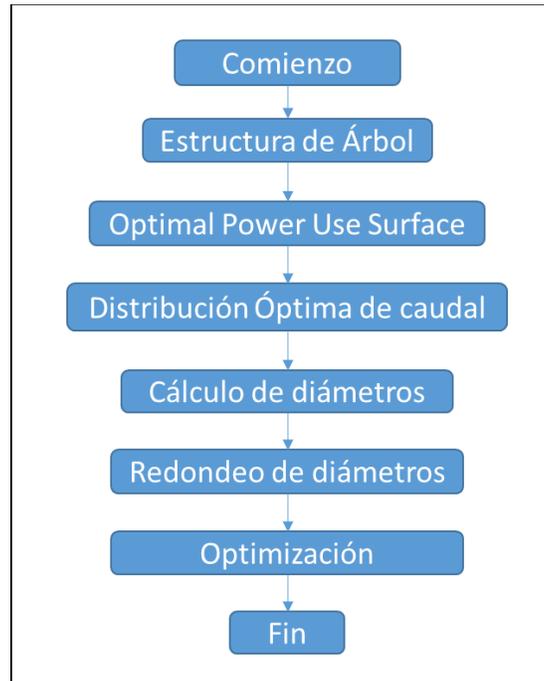


Figura 17 Esquema Metodología OPUS, tomado de Saldarriaga et al (2012).

- Estructura de Árbol:** Este paso está basado en dos principios fundamentales: El primero establece que una red de distribución de agua de mínimo costo es aquella que transporta el caudal demandado a cada nudo desde la fuente de abastecimiento por medio de una sola ruta. Esto conlleva a que las redes abiertas puedan ser más económicas que las redes cerradas. Es por esto que la metodología propone convertir la red cerrada en una red abierta, la cual es modelada con una estructura tipo árbol. El segundo principio se deriva de la ecuación de Darcy – Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook – White. Dejando los demás parámetros constantes, el caudal presenta una relación aproximadamente proporcional al diámetro a una potencia de 2.6, lo que significa que a medida que aumenta el caudal de diseño de las tuberías, los costos marginales disminuyen. El Árbol es construido por medio de pares tubería – nudo, los cuales son establecidos por medio de su valor Costo – Beneficio. Este valor es calculado como el cociente entre la demanda del nudo y el costo marginal que conlleva conectar el par a la fuente de abastecimiento.
- Optimal Power Use Surface:** Una vez el Árbol es construido se procede a proponer una altura piezométrica objetivo para cada nudo, formando una Superficie de Gradiente Hidráulico. Esta superficie depende de la relación entre caudal demandado y longitud de las tuberías, al igual que de función de costos. Se debe tener en cuenta que la flecha

objetivo debe ser modificada a medida que se está moviendo por el árbol. Al finalizar este paso todos los nudos deben tener una altura piezométrica objetivo.

3. **Distribución Óptima del Caudal:** Este paso tiene como fin encontrar un esquema de distribución de flujo único, el cual respete la conservación de la masa y se ajuste a la Optimal Power Use Surface, anteriormente calculada. El caudal demandado se encuentra dividido entre el caudal transportado por la tubería principal y el caudal transportado por las otras tuberías. Para identificar la tubería principal del sistema se usan varios criterios dentro de los cuales se encuentra función H/L^2 . Al finalizar este paso, todas las tuberías deben tener un caudal objetivo que va a ser transportado por ellas.
4. **Cálculo de diámetros:** Por medio de este paso se asigna un diámetro continuo a todas las tuberías. Este diámetro es obtenido por medio de las ecuaciones hidráulicas de acuerdo con la altura piezométrica objetivo y caudal objetivo transportado, calculados anteriormente. El diseño obtenido en este paso es diseño teórico con un costo muy cercano al mínimo. El siguiente paso corresponde a volver este diseño óptimo teórico en un diseño óptimo factible.
5. **Redondeo de diámetros:** Este paso consiste básicamente en asignar un valor de diámetro discreto a los diámetros continuos obtenidos en el paso anterior. Para esto existen varios criterios que pueden ser utilizados, sin embargo, este redondeo afecta drásticamente el comportamiento hidráulico del sistema y puede que el diseño deje de ser óptimo.
6. **Optimización:** Este último paso tiene dos finalidades principales: La primera consiste en asegurarse de que todos los nudos tengan una presión igual o mayor a la presión mínima, mientras que el segundo consiste en buscar una posible reducción de costos. Para esto se deben realizar numerosas iteraciones el fin de obtener un diseño de bajo costo que cumpla con todos los requerimientos de presión.

Al finalizar la metodología se obtiene un diseño de bajo costo, mediante el cual se obtiene una presión mayor o igual a la presión mínima en todos los nudos. Es importante resaltar que el tiempo computacional que es requerido por esta metodología es bastante inferior al costo computacional que requiere obtener un diseño de bajo costo usando heurísticas como Algoritmos Genéticos, Búsqueda de Armonía, Colonia de Hormigas, entre otras.

3.4 Turnos de Riego

En los grandes cultivos existe la necesidad de tener un esquema de turnos de riego, ya que sería muy costoso transportar toda el agua necesaria por todas las plantas que componen cada uno de los submódulos de riego. De ser así, las tuberías primarias y secundarias tendrían que ser diseñadas con un caudal bastante considerable, y debido a la importante longitud que estas tienen, el costo constructivo que esto implicaría sería bastante elevado.

Otro ejemplo de la necesidad de turnos son los distritos de riego. Estos son los encargados de suministrar el caudal que necesitan los diferentes usuarios para el correcto crecimiento y producción de sus cultivos. El agua distribuida por el distrito proviene en la mayoría de casos de fuentes subterráneas, siendo necesario tener un esquema de turnos de riego para que todos los usuarios reciban el caudal requerido. Por otro lado, los costos energéticos que puede llegar a tener el uso de bombas dependiendo de la hora del día en que se use, hace que sea también necesario tener turnos de riego, con el fin de disminuir estos costos.

En este orden de ideas, los turnos de riego son una variable importante dentro del diseño de una red RLAF. Los turnos de riego se definen como los periodos de tiempo en los que está dividido el tiempo operacional total del sistema de riego. Estos periodos suelen ser de la misma duración y se debe poder entregar el agua necesaria para las plantas en ese tiempo. Tomando como ejemplo una red de riego compuesta por varios submódulos, la variable de turnos de riego consiste en saber cuáles de estos submódulos van a estar funcionando al mismo tiempo, de forma que se logre obtener un diseño final de la red más económico. Se debe recordar que cada planta necesita un volumen de agua, ya sea diario, semanal o mensual, establecido por el diseño agronómico. El caudal que es necesario suministrar a la planta va a depender de la cantidad de tiempo que se tenga por turno para poder suministrar el volumen requerido. Si se tiene poco tiempo, el caudal que tendrá que ser suministrado va a ser mayor, mientras que si se dispone de un mayor tiempo, el caudal transportado por las tuberías será menor.

Consecuentemente con lo planteado, el diseño de la red matriz está fuertemente relacionado con los turnos de riego. A continuación se presenta un ejemplo donde es más fácil visualizar esta dependencia.

3.4.1 Ejemplo de diseño mediante turnos de riego

Como se expuso anteriormente, uno de los objetivos del presente trabajo consiste en comprender en qué medida los turnos de riego pueden llegar a modificar el diseño de la red Matriz, y

consecuentemente, llegar a modificar los costos constructivos de ésta. Esto con el fin de establecer cuál sería la forma óptima de diseño del sistema riego según este criterio. A continuación se plantea un ejemplo con el fin de explicar más detalladamente este criterio:

3.4.1.1 Caso de Estudio 3

Se dispone de un cultivo de manzanos compuesto de cuatro submódulos; de los cuales cada uno suministra agua a 100 plantas. El diseño agronómico establece que cada árbol necesita un volumen diario de 40 litros para poder tener un crecimiento y producción correcta. Adicionalmente, debido a los costos de energía, se dispone de un tiempo total de riego de 8 horas diarias.

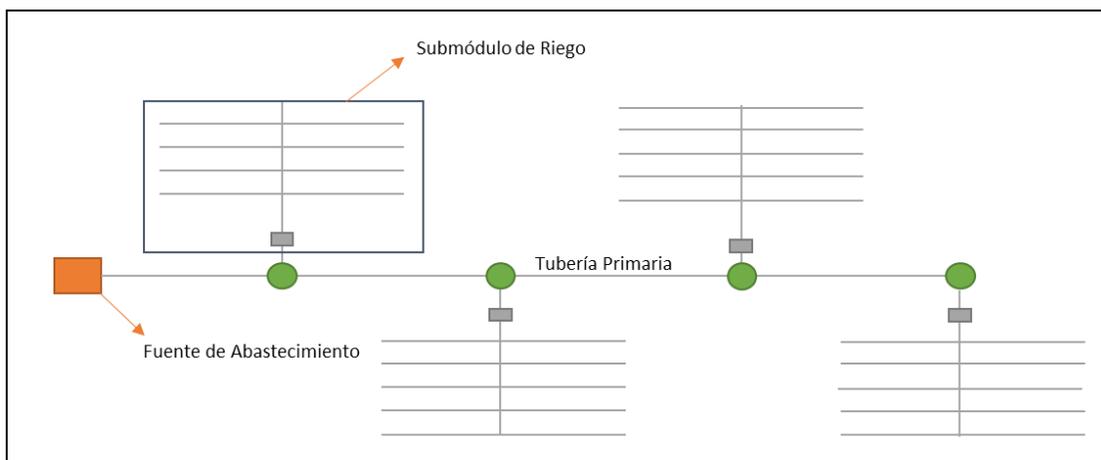


Figura 18 Caso de Estudio 3, Análisis de turnos de riego.

Se desea calcular el caudal que debe ser transportado por la tubería principal para uno, dos y cuatro turnos de riego. De esta forma se tiene:

- **Un turno de Riego:** En este caso, todos los submódulos están suministrando agua a sus plantas durante las 8 horas totales disponibles. El caudal que debe ser entregado a cada planta se obtiene mediante el siguiente cálculo:

$$Caudal = \frac{Volumen\ requerido}{Tiempo\ de\ riego\ disponible} \quad (Ecuación\ 33)$$

Reemplazando para este caso se tiene:

$$Q_{planta} = \frac{40 L}{8 horas} = 5 L/h$$

Realizando el cálculo del caudal por submódulo se tiene:

$$Q_{submódulo} = Q_{planta} * \text{Número de Plantas por submódulo}$$

$$Q_{submódulo} = 5 L/h * 100 = 500 L/h$$

Según este resultado, se calcula el caudal total que debe ser suministrado por la fuente de abastecimiento, y el volumen total de agua entregado a las plantas:

$$Q_{total} = Q_{submódulo} * \text{Número de submódulos} \quad (\text{Ecuación 34})$$

$$Q_{total} = 500 L/h * 4 = 2000 L/h$$

$$\text{Volumen}_{total} = Q_{total} * \text{Número de horas de riego} \quad (\text{Ecuación 35})$$

$$\text{Volumen}_{total} = 2000 L/h * 8 horas = 16000 L$$

Por medio de estos resultados se puede suponer el siguiente esquema de distribución de caudal para la red matriz:

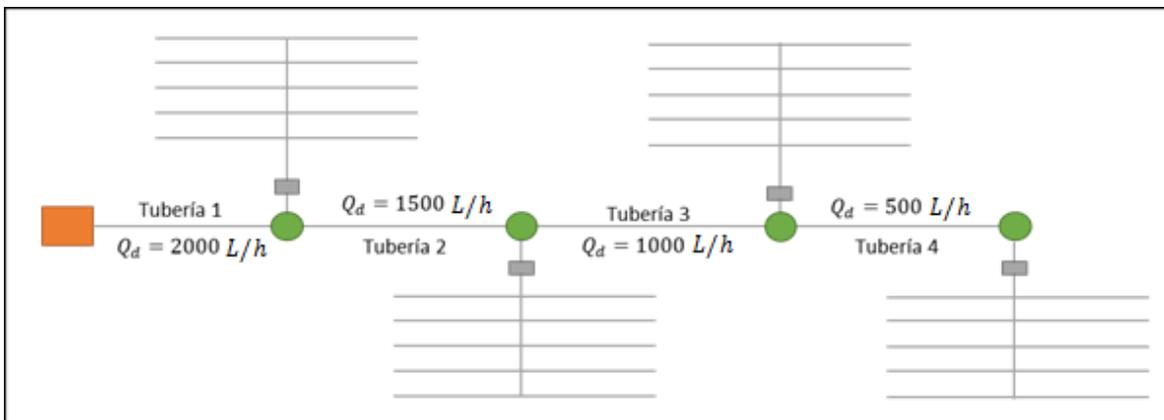


Figura 19 Distribución de caudales para 1 turno de riego, Caso de Estudio 3.

De esta forma se obtiene un caudal diseño para cada tubería:

Tabla 22 Caudales de diseño para 1 turno de riego, Caso de Estudio 3

Red Matriz	
Tubería	$Q_{diseño}$ (L/h)
1	2000
2	1500
3	1000
4	500

- **Dos turnos de Riego:** Para este caso se establecen dos turnos de riego, lo que quiere decir que dos de los cuatro submódulos van a estar suministrando agua a sus plantas, mientras que los otros dos van a estar apagados. Se debe tener en cuenta que ahora cada submódulo no tendrá las 8 horas totales disponibles, sino que ahora cada submódulo contará únicamente con 4 horas para que pueda suministrar el volumen diario requerido por la planta. Para este caso, se debe tener en cuenta la distribución de turnos, variable que consiste en definir cuáles serán los dos submódulos que estarán prendidos en el mismo turno y cuales apagado. Para este ejemplo, solo se tomará en cuenta una distribución de turnos de las varias que pueden existir; sin embargo, más adelante esta variable será analizada más a fondo. Se procede entonces a calcular los caudales de diseño de las respectivas tuberías:

$$Q_{planta} = \frac{40 L}{4 \text{ horas}} = 10 L/h$$

$$Q_{submódulo} = 10 L/h * 100 \text{ plantas por submódulo} = 1000 L/h$$

$$Q_{total} = 1000 L/h * 2 \text{ submódulos prendidos simultaneamente} = 2000 L/h$$

$$Volumen_{total} = 2000 L/h * 4 \text{ horas} + 2000 L/h * 4 \text{ horas} = 16000 L$$

Suponiendo que los dos primeros submódulos son aquellos que se prenden en el primer turno, y los dos siguientes se prenden en el segundo turno, se obtienen los siguientes esquemas de distribución de caudales:

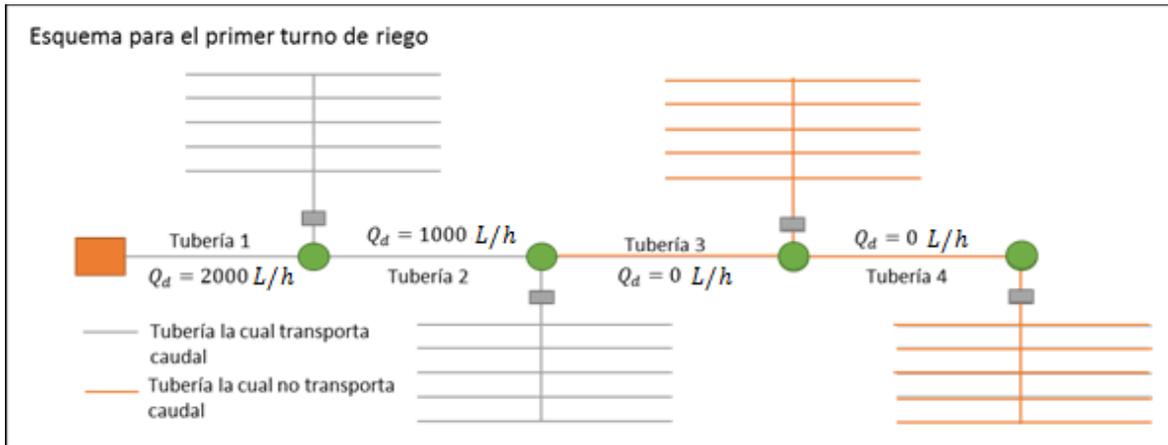


Figura 20 Distribución de caudales para el primer turno de riego, Caso de Estudio 3.

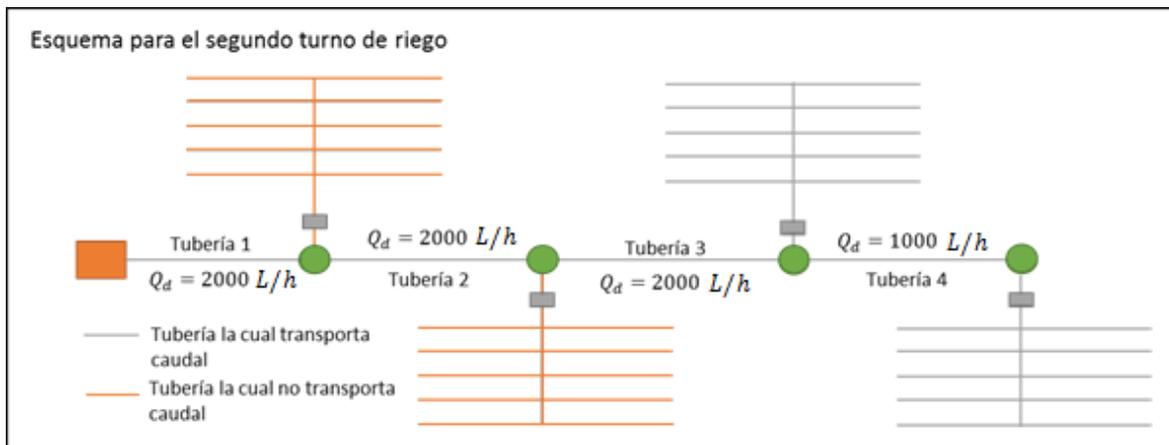


Figura 21 Distribución de caudales para el segundo turno de riego, Caso de Estudio 3.

Por medio de los esquemas de distribución de riego presentados anteriormente, y sabiendo que las tuberías deben diseñarse para cumplir el máximo caudal demandado, se puede establecer los siguientes caudales de diseño para cada tubería:

Tabla 23 Caudales de diseño para 2 turnos de riego, Caso de Estudio 3.

Red Matriz	
Tubería	$Q_{diseño}$ (L/h)
1	2000
2	2000
3	2000
4	1000

- **Cuatro turnos de Riego:** Este es el mayor número de turnos que se puede tener en este ejemplo, ya que se cuenta únicamente con cuatros submódulos de riego. Esto quiere decir que cada submódulo de riego estará suministrando agua en un turno diferente. Cada submódulo cuenta entonces con 2 horas para poder suministrar el volumen de agua propuesto por el diseño agronómico. Para este caso se tiene entonces:

$$Q_{planta} = \frac{40 L}{2 \text{ horas}} = 20 L/h$$

$$Q_{submódulo} = 20 L/h * 100 \text{ plantas por submódulo} = 2000 L/h$$

$$Q_{total} = 2000 L/h * 1 \text{ submódulo prendido} = 2000 L/h$$

$$Volumen_{total} = 2000 L/h * 2 \text{ horas} * 4 \text{ submódulos} = 16000 L$$

A continuación se muestra el esquema de distribución de caudales para el turno en el que el último submódulo del sistema está suministrando agua. Este caso es el más crítico ya que el caudal total debe ser transportado por toda la red primaria.

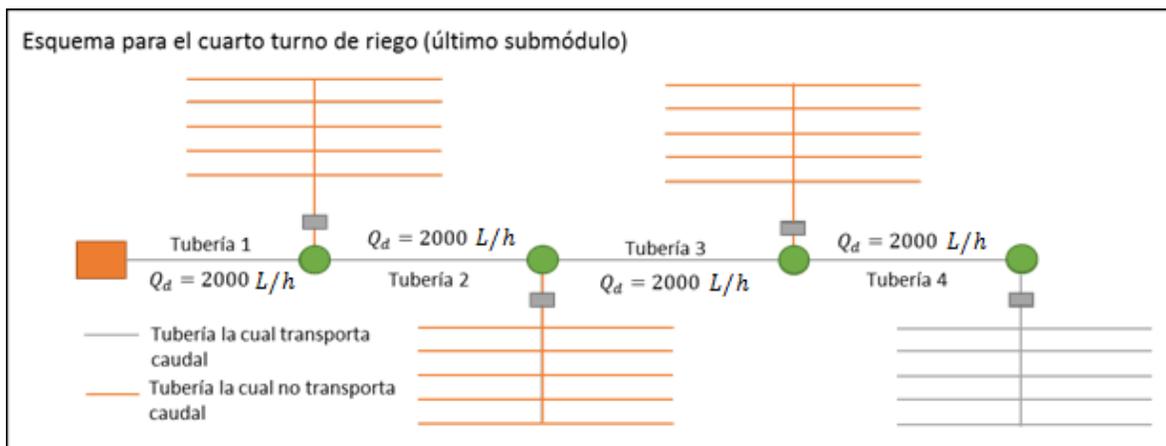


Figura 22 Distribución de caudales para cuatro turnos de riego, último submódulo, Caso de Estudio 3.

Por medio de este análisis se obtienen los siguientes caudales de diseño para cada tubería:

Tabla 24 Caudales de diseño para cuatro turnos de riego, Caso de Estudio 3.

Red Matriz	
Tubería	$Q_{diseño}$ (L/h)
1	2000
2	2000
3	2000
4	2000

Por medio de los diferentes resultados obtenidos para los caudales de diseño en cada turno de riego, se puede evidenciar que a medida que aumenta el número de turnos de riego, también aumentan los caudales de diseño para cada tubería de la red matriz. Esto se debe a que al aumentar los turnos de riego, disminuyen las horas disponibles, por turno, que se tiene para poder suministrar el volumen de agua requerido por la planta. Para cumplir con este volumen, el caudal debe aumentar considerablemente, lo que a su vez se traduce en un aumento del diámetro de las tuberías y a un aumento en el costo total de la red.

Aunque los resultados obtenidos en este ejemplo demuestran que con un turno de riego se puede obtener el diseño óptimo, no se desea sacar conclusiones apresuradas. Es por esta razón que se realizaron más pruebas, teniendo en cuenta las otras dos variables que pueden llegar también a modificar el diseño de la red matriz: la distribución de turnos y el número de emisores. Los resultados de las pruebas son presentados a continuación.

3.5 Distribución de turnos

Como se explicó anteriormente, los turnos de riego consisten en periodos de tiempo en los cuales los submódulos de riego están suministrando el caudal necesario a las plantas para su correcto crecimiento y producción. El uso de turnos de riego conlleva también a definir una distribución de turnos. Esta distribución de turnos consiste en determinar cuáles son los submódulos que van a estar suministrando agua a sus plantas en cada turno.

La distribución de turnos es una variable de total importancia ya que dependiendo de cómo estén organizados los turnos de riego, el caudal que debe ser transportado por la red matriz puede aumentar o disminuir. El fin de una correcta distribución consiste en disminuir el caudal transportado por la red matriz, logrando de esta forma, un diseño con diámetros menores y un ahorro en los costos constructivos. A continuación se presentan las posibles distribuciones de turnos para el Caso de Estudio 3, teniendo 3 turnos de riego:

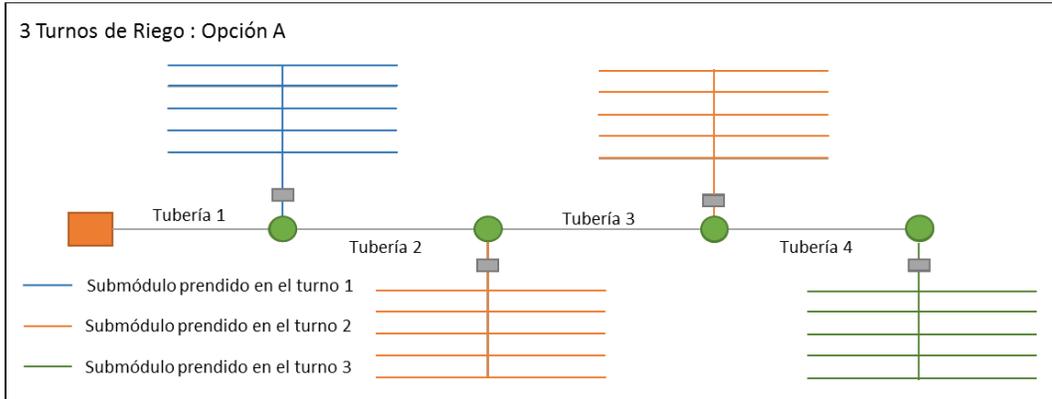


Figura 23 Opción A Distribución de riego con 3 turnos, Caso de Estudio 3.

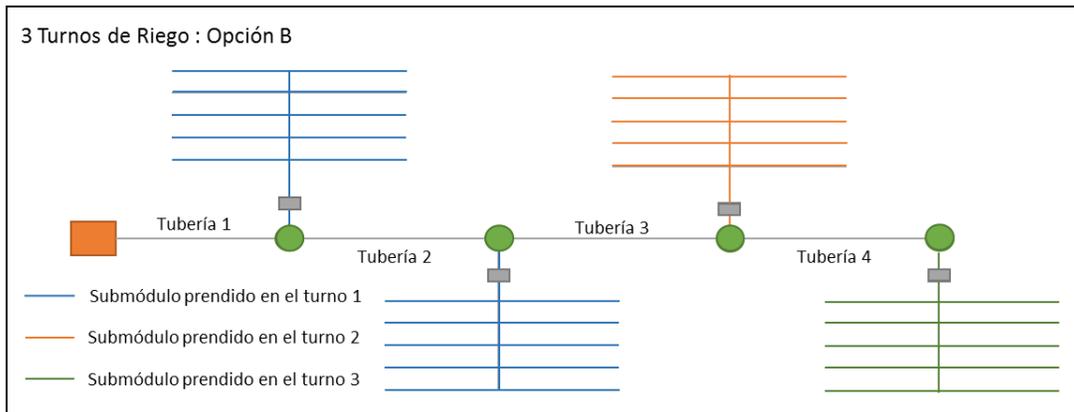


Figura 24 Opción B Distribución de riego con 3 turnos, Caso de Estudio 3.

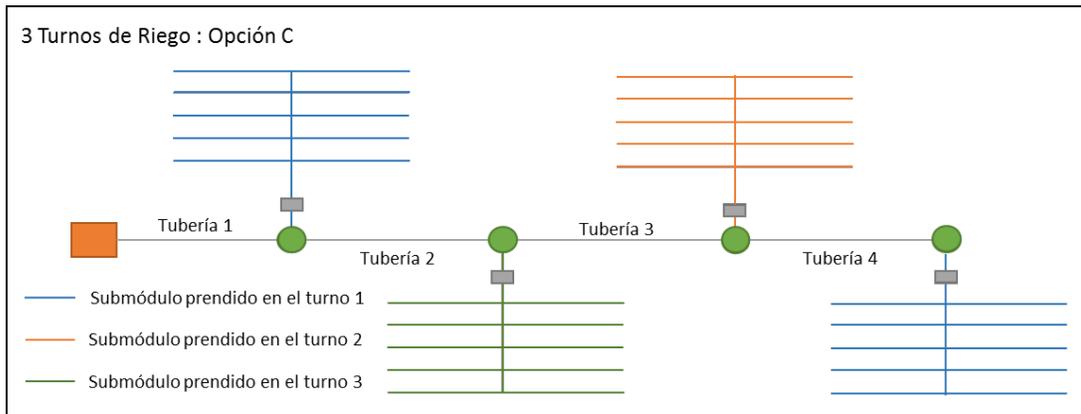


Figura 25 Opción C Distribución de riego con 3 turnos, Caso de Estudio 3.

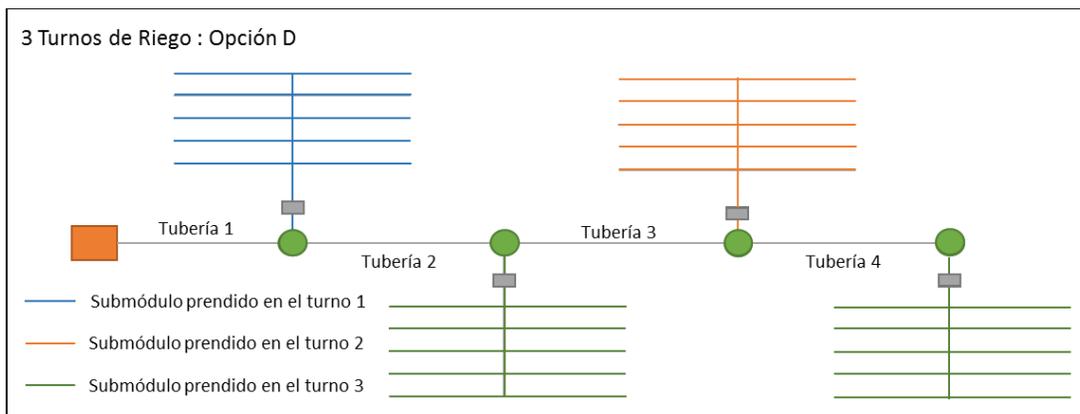


Figura 26 Opción D Distribución de riego con 3 turnos, Caso de Estudio 3.

Estos son solo algunas de las opciones de distribuciones de turnos que se pueden tener para el caso de 3 turnos de riego. El número de posibles distribuciones es directamente proporcional de la cantidad de turnos que se tengan y la cantidad de submódulos con los que cuente el sistema de riego, siendo ésta una relación exponencial. Es por esta razón que es difícil realizar un análisis exhaustivo de todas las distribuciones de riego.

Con el fin de poder establecer conclusiones acerca de cómo afecta la distribución de turnos el costo total de la red, se realizaron pruebas con algunas posibles distribuciones de riego, intentando que estas fueran lo suficientemente representativas. Sin embargo se resalta que hacerlo de forma exhaustiva demandaría un costo computacional importante. Los resultados de estos análisis son presentados más adelante.

3.6 Número de Emisores por planta

El número de Emisores por planta es una variable que puede llegar a modificar el diseño de un submódulo. Esto se debe a que dependiendo del número de emisores que se tenga por planta, la presión que se requiere en los laterales puede llegar a aumentar o disminuir. Para explicar esto mejor se debe hacer uso de la ecuación del emisor:

$$Q_{emisor} = kh^x$$

Si se tiene un solo emisor por planta, éste debe encargarse de suministrar todo el caudal que la planta necesita. Esto conlleva a que se requerirá una altura de presión bastante considerable para poder lograr este propósito. Si por otro lado, se dispone de un número mayor de emisores por planta, el caudal que debe ser entregado a planta se reparte entre estos emisores y por lo tanto la presión que se necesita en cada uno de ellos es menor.

El hecho de que se necesite una presión menor a medida que se tenga un número mayor de emisores por planta hace que el diseño pueda ser más económico (sin tener en cuenta los costos de los emisores). Esto se debe a que a medida que se tiene una presión mínima más pequeña, es posible reducir los diámetros de las tuberías, logrando así, un diseño más económico. Sin embargo, se debe tener en cuenta que así como disminuye la presión mínima admisible, es muy factible que se reduzca también la Presión de Entrada al Submódulo propuesta mediante la metodología de Bermúdez.

Esta reducción de la Presión de Entrada al Submódulo puede tener pros y contras para los costos del sistema. Por un lado, si se tiene una Presión de Entrada al Submódulo menor, se tendrá igualmente unas presiones fijas menores cuando se vaya a realizar el diseño de la red matriz. Esto significará un uso diámetros menores y por consiguiente, un ahorro en los costos constructivos. Por otro lado, si la PES disminuye, significa que se va a tener una menor energía disponible para recorrer todo el Submódulo. Esto puede conllevar a que sean necesarias tuberías de diámetro más grande, lo cual conduce a un aumento en los costos constructivos.

Con el fin de entender claramente cuáles son los efectos que tienen los números de emisores por planta en el diseño de la red matriz y los submódulos, se plantean varios casos de estudio. Estos son presentados y analizados a continuación.

3.7 Pruebas y análisis para el número de turnos, la distribución de turnos y el número de emisores por planta

Con el fin de entender como estas variables modifican el diseño final tanto de la red matriz como de los submódulos, se plantea el siguiente escenario y la siguiente metodología:

3.7.1 Caso de Estudio 4

Se tiene un sistema de riego localizado de alta frecuencia compuesto por 12 submódulos distribuidos de la forma indicada en el siguiente esquema. Cada submódulo tiene 16 laterales de riego, los cuales suministran agua a 5 plantas cada uno, obteniendo un total de 80 plantas por submódulo y 960 plantas en todo el sistema de riego. La distancia entre lateral y lateral es de 10 metros, mientras que la distancia entre planta y planta es de 5 metros. Adicionalmente, se tiene una distancia entre submódulos de 80 metros y una longitud de 100 metros para las tuberías que componen la red primaria.

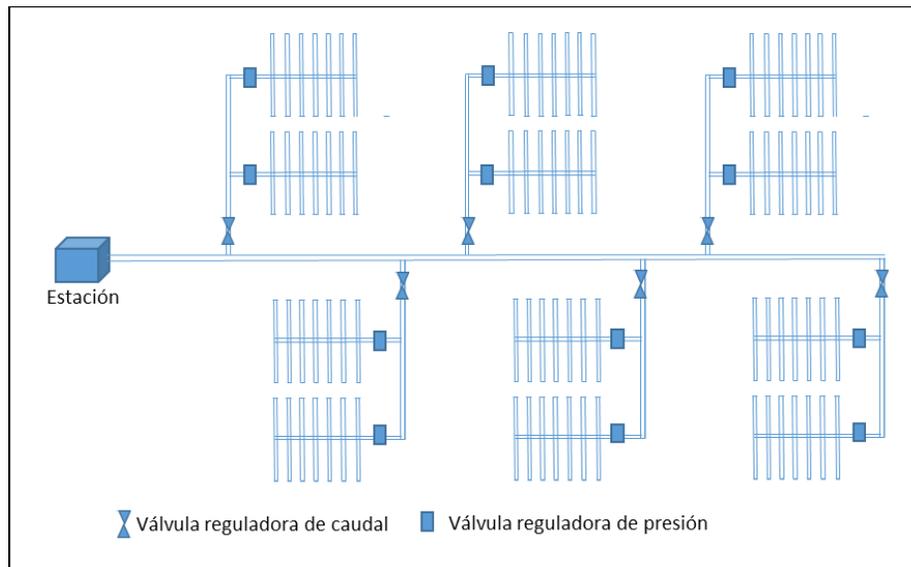


Figura 27 Configuración sistema de riego, Caso de Estudio 4.

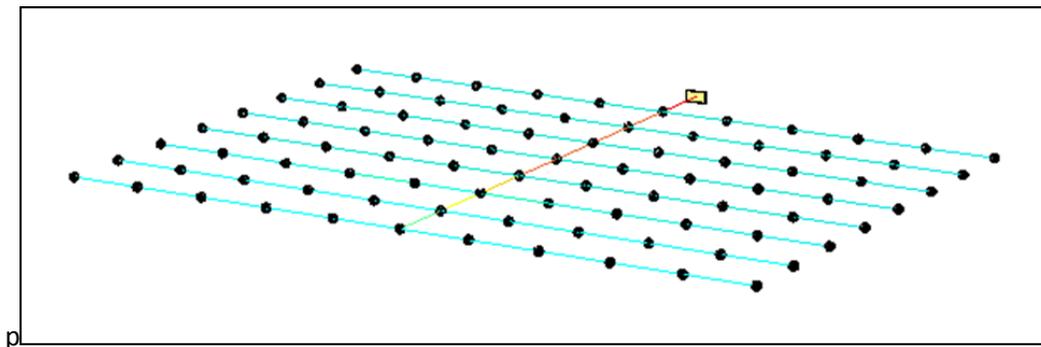


Figura 28 Submódulo de Riego, Caso de Estudio 4.

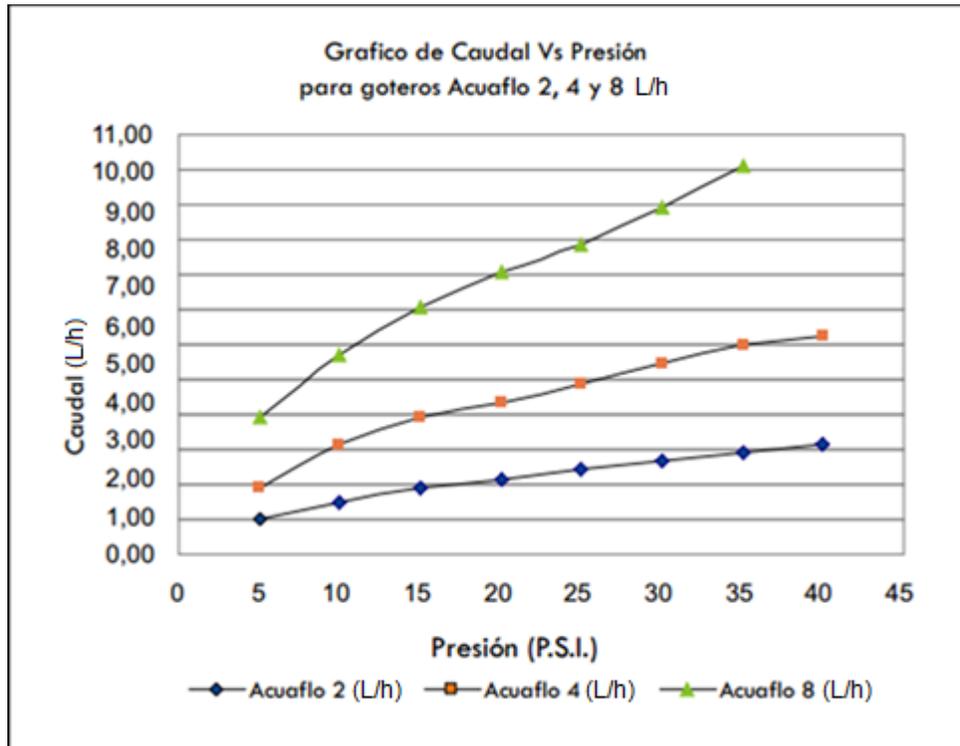
El diseño agronómico establece que cada planta necesita en promedio 34 litros de agua diarios, de tal forma que esta pueda desarrollarse y crecer adecuadamente. El diseño agronómico estipula además un Coeficiente de Uniformidad (CU) de 0.80. La fuente de abastecimiento está disponible 12 horas diarias para suministrar el caudal que sea necesario. Se desea conocer el costo de diseño de cada submódulo, así como de la red matriz, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Uso de 1, 2 y 3 turnos de riego.
- Uso de 1, 2 y 3 emisores de riego por planta.
- Uso de 3 tipos de distribuciones de turnos de riego.

Para encontrar los diferentes diseños requeridos variando cada una de las variables se usó la siguiente metodología:

1. Encontrar el caudal que debe ser suministrado por el emisor para cumplir con el volumen requerido, dependiendo de la cantidad de turnos de riego y el número de emisores que se disponga por planta.
2. Obtener por medio de la metodología propuesta por Bermúdez la Presión de Entrada al Submódulo y la presión mínima admisible para cada una de las combinaciones de turnos de riego y números de emisores por planta.
3. Calcular por medio de la metodología propuesta por Hernández el diseño óptimo del submódulo para cada una de los casos. Se tendrá de esta forma, un costo constructivo del submódulo, su Coeficiente de Uniformidad Resultante, el caudal total requerido por éste.
4. Modelar la red matriz con nudos a presión (PES) y demanda constante (Caudal total requerido por el submódulo). Utilizar la metodología de diseño OPUS por medio del programa REDES para diseñar la red matriz teniendo en cuenta las diferentes distribuciones de riego.
5. Comparar los resultados de los costos de la red matriz con los costos de los submódulos y poder establecer conclusiones sobre el uso de los turnos de riego, la distribución de turnos y el número de emisores por planta para obtener el diseño de menor costo del sistema de riego.

Para poder tener resultados cercanos a los reales, se decidió utilizar un emisor real, el cual puede ser encontrado en el mercado local. Se utilizará un emisor ACUAFLO de 4 L/h, fabricado por la empresa AGRIFIM. Las características de este emisor fueron sustraídas del catálogo ofrecido por la empresa. Para obtener el coeficiente y el exponente del emisor se hizo uso de la gráfica Q vs h ofrecida por el fabricante:



Gráfica 4 Curva Q vs Presión para emisor ACUAFLOR fabricado por AGRIFIM. Tomada del catálogo de emisores de AGRIFIM.

Se obtiene entonces un coeficiente (k) de 0.00033987 y un exponente (x) de 0.49298 para este emisor. Adicionalmente, tiene que tenerse en cuenta la presión mínima de seguridad propuesta por el fabricante para evitar problemas de sedimentación y obturaciones. Esta presión mínima de seguridad es de 5 PSI, siendo aproximadamente 3.52 m.

Se presentan los respectivos cálculos para el caudal que deben suministrar el emisor, así como la presión media de estos. Posteriormente, se muestra la PES y la presión mínima para cada uno de los casos, obtenidas por medio de la metodología de Bermúdez:

- Para 1 Turno de Riego con 1 Emisor por planta:

$$Q_{\text{medio por emisor}} = \frac{34 L}{12 \text{ horas}} = 2.83333 L/h$$

$$H_{\text{media por emisor}} = \left(\frac{Q}{k}\right)^{1/x} = \left(\frac{2.83333/3600}{0.00033987}\right)^{1/0.49298} = 5.4922 m$$

Tabla 25 Resultados 1 Turno de Riego 1 Emisor, Caso de Estudio 4.

Presión mínima en el submódulo (m)	3.88
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	10.77

- Para 1 Turno de Riego con 2 Emisores por planta:

$$Q_{\text{medio por emisor}} = \frac{34 L}{\frac{12 \text{ horas}}{2 \text{ Emisores}}} = 1.4166 L/h$$

$$H_{\text{media por emisor}} = \left(\frac{(1.4166/3600)}{0.00033987} \right)^{1/0.49298} = 1.34622 m$$

Tabla 26 Resultados 1 Turno de Riego 2 Emisores, Caso de Estudio 4.

Presión mínima en el submódulo (m)	0.92
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	2.75

Como se puede apreciar en la tabla anterior, la presión mínima es menor a la presión mínima de seguridad establecida por el fabricante para evitar taponamiento por sedimentación en los emisores (0.92 m < 3.52 m). Esto quiere decir que no tiene caso usar dos emisores en este escenario, ya que con uno es suficiente.

- Para 1 Turno de Riego con 3 Emisores por planta: No se tiene en cuenta ya que como se explicó anteriormente, en este caso es suficiente usar un emisor por planta.
- Para 2 Turnos de Riego con 1 Emisores por planta:

$$Q_{\text{medio por emisor}} = \frac{34 L}{6 \text{ horas}} = 5.66667 L/h$$

$$H_{\text{media por emisor}} = \left(\frac{(5.66667/3600)}{0.00033987} \right)^{1/0.49298} = 22.407 m$$

Tabla 27 Resultados 2 Turnos de Riego 1 Emisor, Caso de Estudio 4.

Presión mínima en el submódulo (m)	15.84
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	32.52

- Para 2 Turnos de Riego con 2 Emisores por planta:

$$Q_{\text{medio por emisor}} = \frac{34 L}{\frac{6 \text{ horas}}{2 \text{ Emisores}}} = 2.83333 L/h$$

$$H_{\text{media por emisor}} = \left(\frac{(2.8333/3600)}{0.00033987} \right)^{1/0.49298} = 5.4922 m$$

Tabla 28 Resultados 2 Turnos de Riego 2 Emisores, Caso de Estudio 4.

Presión mínima en el submódulo (m)	3.76
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	10.77

- Para 2 Turnos de Riego con 3 Emisores por planta:

$$Q_{\text{medio por emisor}} = \frac{34 L}{\frac{6 \text{ horas}}{3 \text{ Emisores}}} = 1.8888 L/h$$

$$H_{\text{media por emisor}} = \left(\frac{(1.8888/3600)}{0.00033987} \right)^{1/0.49298} = 2.4129 m$$

Tabla 29 Resultados 2 Turnos de Riego 3 Emisores, Caso de Estudio 4.

Presión mínima en el submódulo (m)	1.63
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	3.55

En este caso se vuelve a observar que la presión mínima en el submódulo es menor a la presión mínima de seguridad (1.63 m < 3.52 m), lo que significa que no es conveniente usar tres emisores de riego en este caso; con dos emisores o uno, sería suficiente.

- Para 3 Turnos de Riego con 1 Emisores por planta:

$$Q_{\text{medio por emisor}} = \frac{34 L}{4 \text{ horas}} = 8.5 L/h$$

$$H_{\text{media por emisor}} = \left(\frac{(8.5/3600)}{0.00033987} \right)^{1/0.49298} = 51 m$$

Tabla 30 Resultados 3 Turnos de Riego 1 Emisor, Caso de Estudio 4.

Presión mínima en el submódulo (m)	36.05
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	38.29

- Para 3 Turnos de Riego con 2 Emisores por planta:

$$Q_{\text{medio por emisor}} = \frac{34 \text{ L}}{\frac{4 \text{ horas}}{2 \text{ Emisores}}} = 4.25 \text{ L/h}$$

$$H_{\text{media por emisor}} = \left(\frac{(4.25/3600)}{0.00033987} \right)^{1/0.49298} = 12.50 \text{ m}$$

Tabla 31 Resultados 3 Turnos de Riego 2 Emisores, Caso de Estudio 4.

Presión mínima en el submódulo (m)	8.56
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	18.37

- Para 3 Turnos de Riego con 3 Emisores por planta:

$$Q_{\text{medio por emisor}} = \frac{34 \text{ L}}{\frac{4 \text{ horas}}{3 \text{ Emisores}}} = 2.83333 \text{ L/h}$$

$$H_{\text{media por emisor}} = \left(\frac{(2.83333/3600)}{0.00033987} \right)^{1/0.49298} = 5.4922 \text{ m}$$

Tabla 32 Resultados 3 Turnos de Riego 3 Emisores, Caso de Estudio 4.

Presión mínima en el submódulo (m)	3.71
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	10.77

Resumiendo los resultados anteriores se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 33 Resultados PES y Pmin para Caso de Estudio 4.

Número de Turnos	Número de Emisores por Planta	Caudal por emisor (L/h)	Presión media (m)	Presión mínima (m)	PES (m)
1 Turno	1 Emisor	2.8333	5.4922	3.88	10.77
	2 Emisores	-	-	-	-
	3 Emisores	-	-	-	-
2 Turnos	1 Emisor	5.6667	22.407	15.84	32.52
	2 Emisores	2.8333	5.4922	3.76	10.77

	3 Emisores	-	-	-	-
3 Turnos	1 Emisor	8.5	51	36.05	38.29
	2 Emisores	4.25	12.5	8.56	18.37
	3 Emisores	2.8333	5.4922	3.71	10.77

En esta tabla se puede ver cómo, a medida que se usa un mayor número de emisores por planta, tanto la Presión de Entrada al Submódulo (PES) como la presión mínima admisible disminuyen. Sin embargo, en algunos casos es más favorable que en otros. Un ejemplo de esto se puede ver en el uso de 2 turnos de riego. En este caso, usando un emisor se obtiene una PES de 32.52 m y una presión mínima de 15.84 m, lo que quiere decir que se cuenta con aproximadamente 16.68 m disponibles de energía. Por otro lado, si se usan dos emisores por planta se obtiene una PES de 10.77 m y una presión mínima de 3.76, lo que significa que solo se cuenta con 7.01 m de presión para recorrer el submódulo.

Por medio de estos resultados se precede a diseñar el submódulo, para cada uno de los casos, según la metodología propuesta por Hernández, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 34 Resultados diseño submódulo mediante la metodología de Hernández.

Número de Turnos	Número de Emisores	Costo Submódulo (COP)	CUr	PES (m)	Q por Submódulo (L/s)
1 Turno	1 Emisor	\$ 184,307.56	0.84	10.77	0.072722
	2 Emisores	-	-	-	-
	3 Emisores	-	-	-	-
2 Turnos	1 Emisor	\$ 191,996.00	0.861	32.52	0.139233
	2 Emisores	\$ 208,863.00	0.8	10.77	0.147244
	3 Emisores	-	-	-	-
3 Turnos	1 Emisor	\$ 276,936.00	0.9848	38.29	0.181798
	2 Emisores	\$ 216,551.00	0.883	18.37	0.198441
	3 Emisores	\$ 237,630.00	0.802	10.77	0.227782

Se puede apreciar por medio de los resultados obtenidos, que a medida que aumentan los números de turno, aumentan igualmente los caudales que deben ser suministrados a las plantas, aspecto que se había explicado anteriormente. Al aumentar los caudales que necesitan ser transportados por el submódulo, aumentan también los costos constructivos del submódulo ya que se necesitan tuberías más grandes. Por otro lado, en todos los casos se cumple el Coeficiente de Uniformidad requerido por el diseño agronómico, lo que quiere decir que cualquiera de estos diseños es viable y cumple con los requerimientos hidráulicos y agronómicos.

Aunque por medio del análisis de estos resultados se pueden ir estableciendo conclusiones, se debe verificar primero el diseño de la red matriz para verificar que tanto afectan el número de turnos y el número de emisores por planta el costo constructivo de la red primaria y secundaria.

Para comprobar esto, se hace uso de del planteamiento de la red Matriz anteriormente explicado. Este consiste en definir los submódulos de riego como nudos de demanda contaste y presión fija. Posteriormente, se realiza el diseño de la red matriz haciendo uso de la metodología OPUS y el programa REDES. Es en estas pruebas donde se comienza a tener en cuenta las distribuciones de turnos de riego, ya que como se explicó anteriormente, esta variable puede modificar el caudal de diseño de las tuberías y por lo tanto, el costo constructivo de la red. A un mayor caudal de diseño se necesitará un diámetro mayor para poder satisfacerlo.

Dado que para este Caso de Estudio se tienen muchas posibilidades de distribuciones de turnos de riego, se escogieron algunas con el fin de acotar un poco el proceso de diseño. A continuación se presentan las distribuciones de riego que se probaron para este caso:

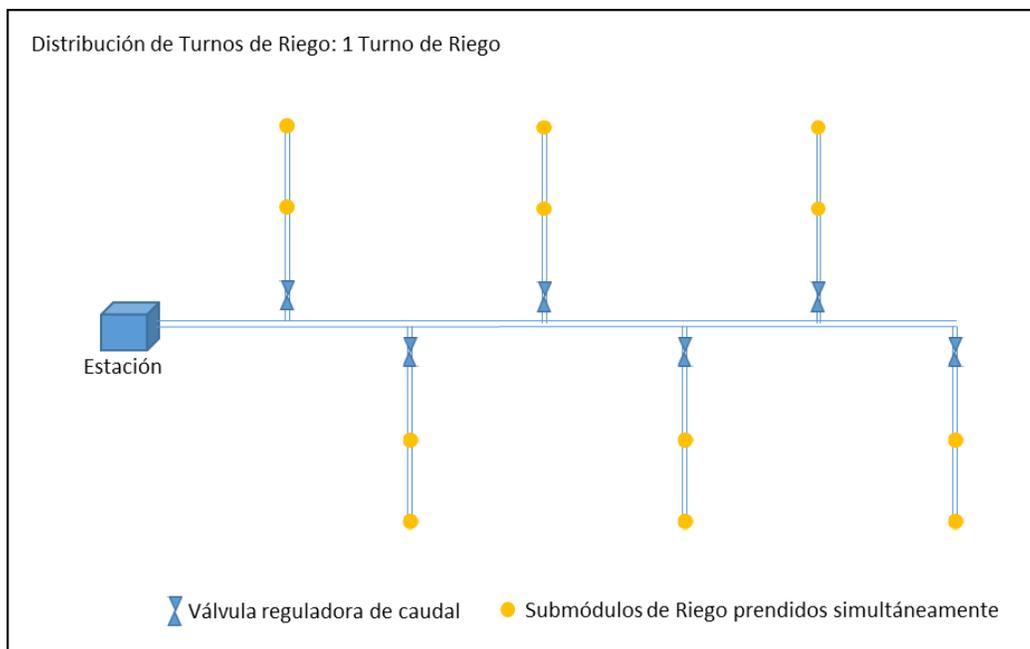


Figura 29 Distribución de turnos con 1 turno de riego, Caso de Estudio 4.

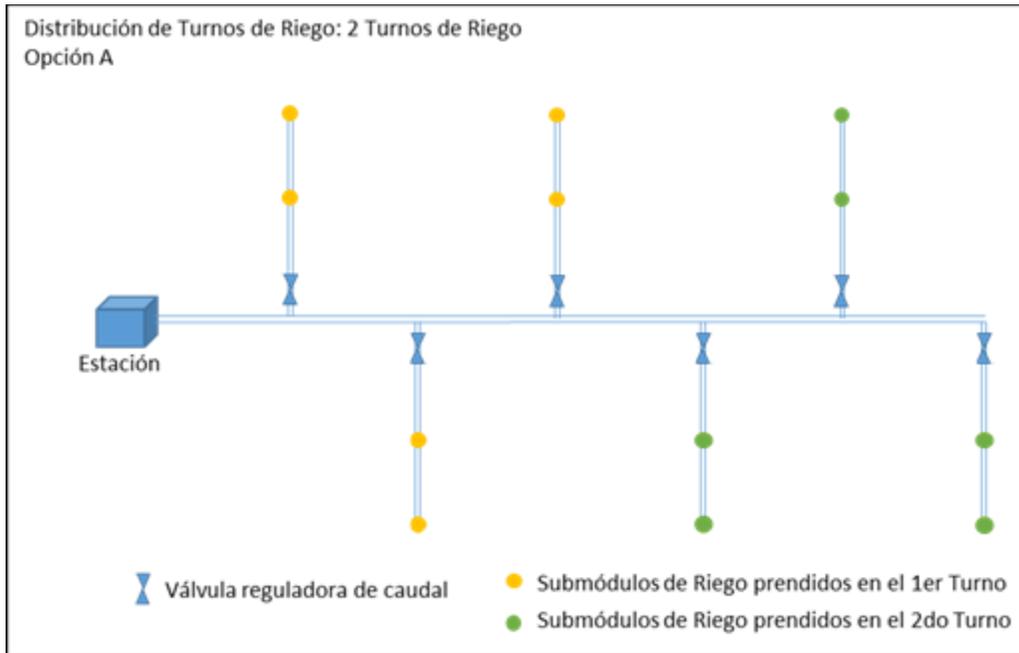


Figura 30 Distribución de turnos con 2 turnos de riego Opción A, Caso de Estudio 4.

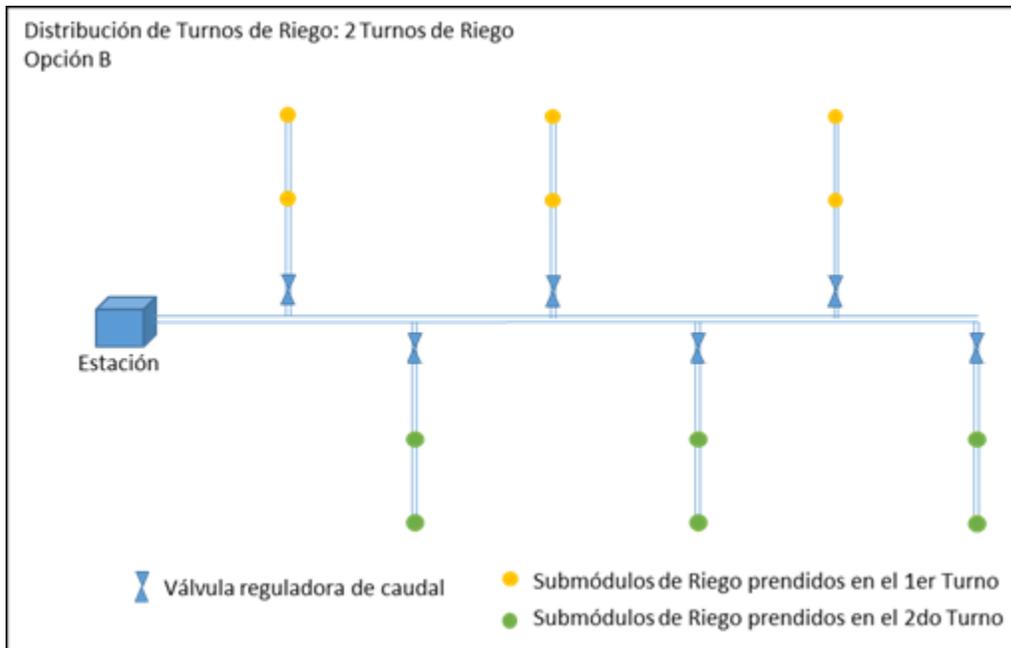


Figura 31 Figura 30 Distribución de turnos con 2 turnos de riego Opción B, Caso de Estudio 4.

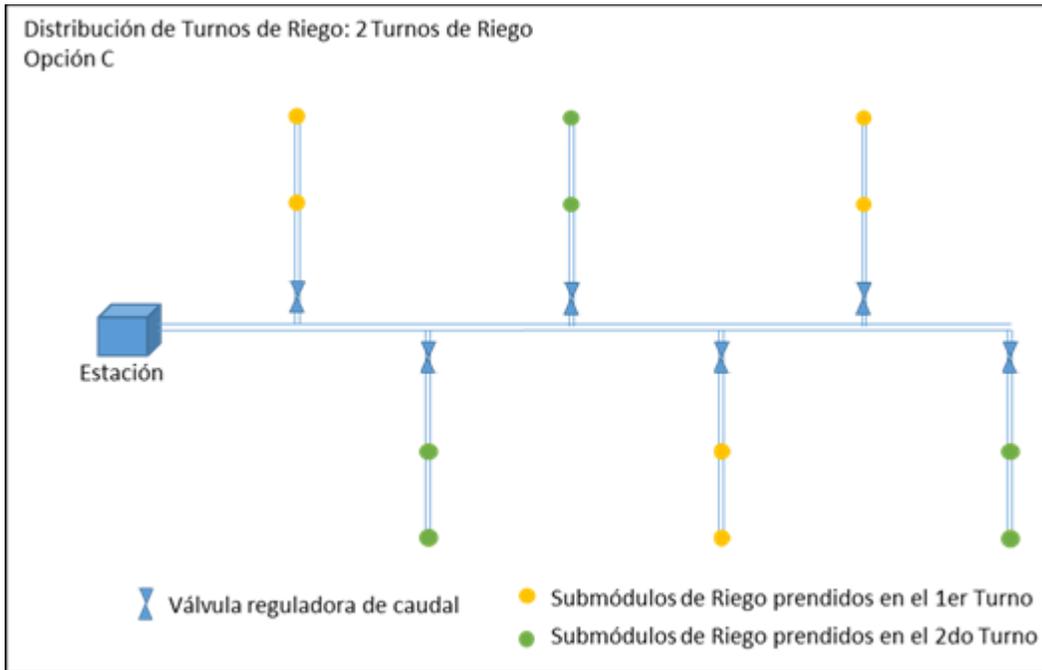


Figura 32 Figura 30 Distribución de turnos con 2 turnos de riego Opción C, Caso de Estudio 4.

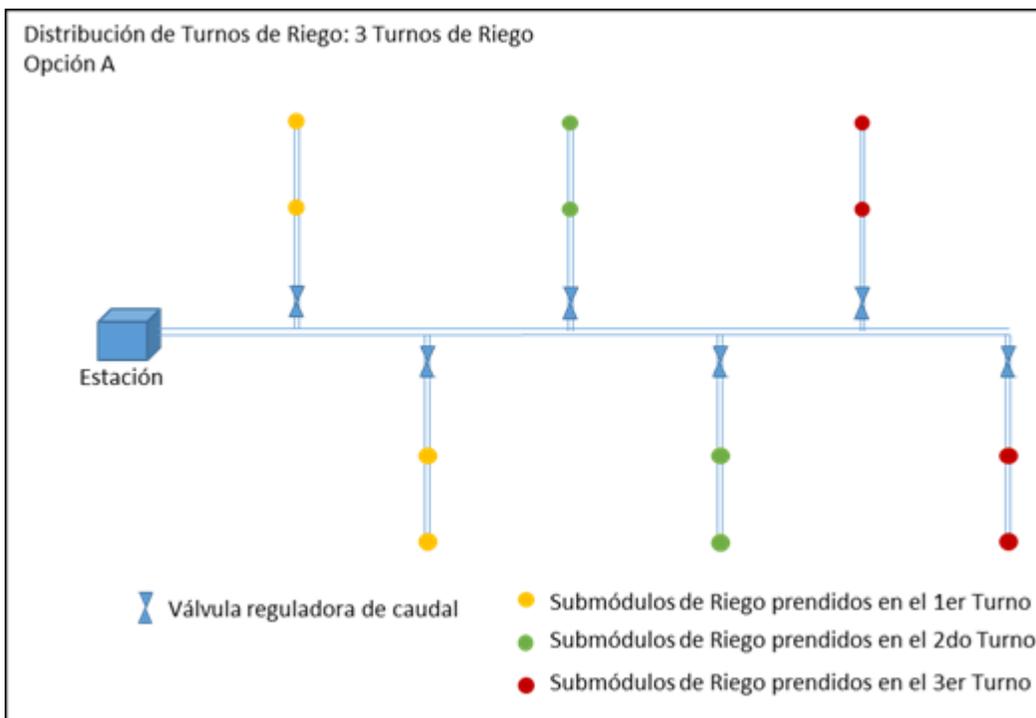


Figura 33 Figura 30 Distribución de turnos con 3 turnos de riego Opción A, Caso de Estudio 4.

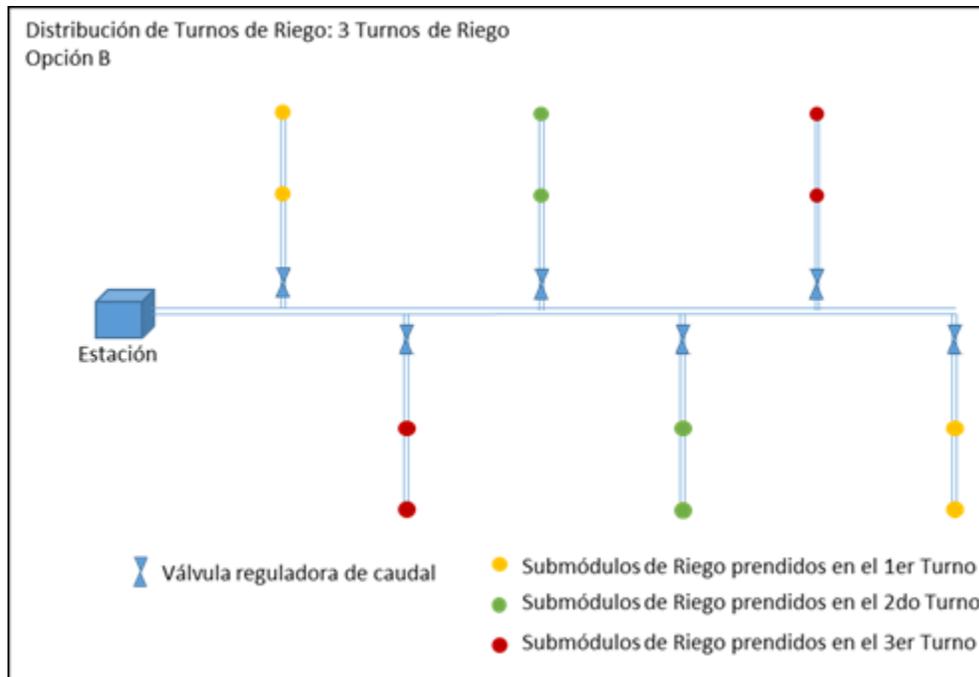


Figura 34 Distribución de turnos con 3 turnos de riego Opción B, Caso de Estudio 4.

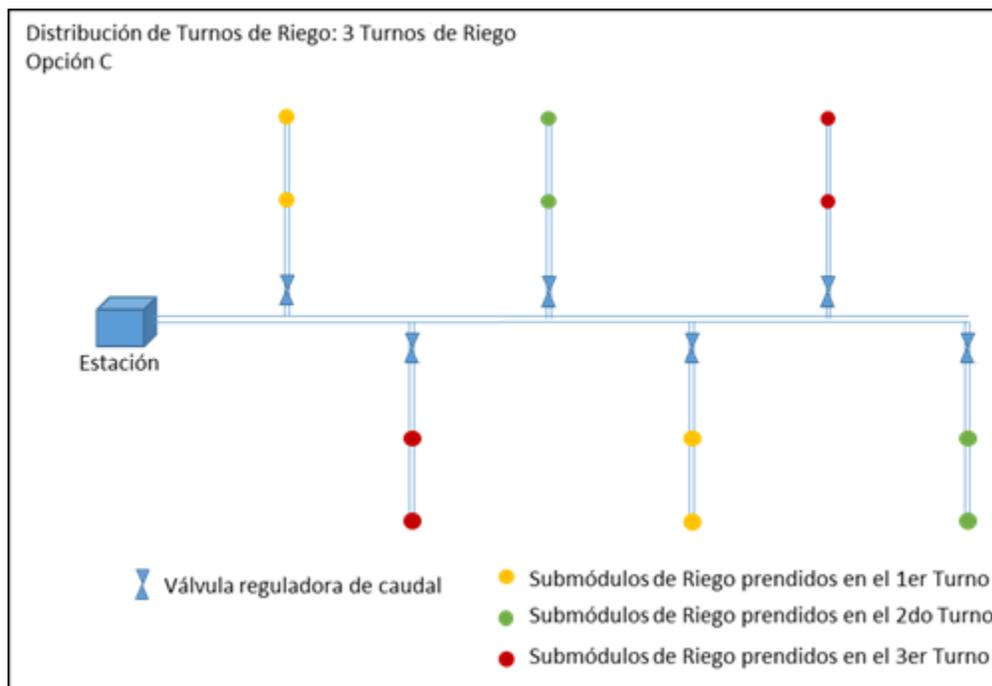


Figura 35 Distribución de turnos con 3 turnos de riego Opción C, Caso de Estudio 4.

Teniendo en cuenta cada una de las opciones de distribuciones de turnos de riego, se procede a realizar el diseño de la red matriz. Se debe tener en cuenta que cuando se está diseñando la red matriz, se debe diseñar la red completa turno por turno, escogiendo al final, los mayores diámetros. En todos los casos se usó una LGH en el embalse de 50 metros. Los resultados son presentados a continuación:

Tabla 35 Resultados diseños finales, Caso de Estudio 4.

Turnos	Emisores	Distribución Riego	Costo Red Matriz (COP)	Costo de un Submódulo (COP)	Costo Total (COP)
1 Turno	1 Emisor	Uniforme	\$ 3,297,371.71	\$ 184,307.56	\$ 5,509,062.43
2 Turnos	1 Emisor	A	\$ 5,741,049.24	\$ 191,996.00	\$ 8,045,001.24
		B	\$ 5,059,495.55	\$ 191,996.00	\$ 7,363,447.55
		C	\$ 5,059,495.55	\$ 191,996.00	\$ 7,363,447.55
	2 Emisores	A	\$ 4,441,602.28	\$ 208,863.00	\$ 6,947,958.28
		B	\$ 4,191,047.53	\$ 208,863.00	\$ 6,697,403.53
		C	\$ 4,217,271.97	\$ 208,863.00	\$ 6,723,627.97
3 Turnos	1 Emisor	A	\$ 6,823,958.60	\$ 276,936.00	\$ 10,147,190.60
		B	\$ 6,244,115.52	\$ 276,936.00	\$ 9,567,347.52
		C	\$ 6,367,572.80	\$ 276,936.00	\$ 9,690,804.80
	2 Emisores	A	\$ 5,142,970.86	\$ 216,551.00	\$ 7,741,582.86
		B	\$ 4,729,429.92	\$ 216,551.00	\$ 7,328,041.92
		C	\$ 4,729,429.92	\$ 216,551.00	\$ 7,328,041.92
	3 Emisores	A	\$ 5,142,970.86	\$ 237,630.00	\$ 7,994,530.86
		B	\$ 4,834,327.67	\$ 237,630.00	\$ 7,685,887.67
		C	\$ 4,834,327.67	\$ 237,630.00	\$ 7,685,887.67

Como se puede apreciar en los resultados mostrados, el diseño final más económico se obtiene por medio de un solo turno de riego y haciendo uso de un emisor por planta (ésta se observa en color verde). Con esta configuración se obtiene un costo de la Red Matriz (tuberías primarias y secundarias) de \$3'297,371.71 COP, y un costo por submódulo de \$184,307.56 COP, obteniendo un costo total de la red (tuberías primarias, secundarias, múltiples y laterales totales) de \$5'509,062.43 COP. Por otro lado, el diseño más costoso se consigue por medio de tres turnos de riego y un emisor por planta (fila de color rojo).

Debido a toda la información que se tiene por medio de los resultados, es necesario verificar como se ve afectado cada uno de los costos por cada una de las variables:

Análisis de Turnos de Riego

Como se explicó anteriormente, a medida que aumentan los turnos de riego, aumentan también el caudal que debe ser transportado tanto por la red matriz, como por el múltiple y laterales del submódulo. Esto hace que los costos constructivos de éstos, se vean aumentados

considerablemente. En el caso de un turno de riego, se tiene el menor costo para la red matriz, mientras que para dos turnos y tres turnos, el costo podría llegar a aumentar más de un 100%; como es el caso específico de 3 turnos usando 1 emisor por planta.

Para los costos constructivos de los submódulos se puede evidenciar la misma tendencia, aunque en menores proporciones. El diseño más económico para los submódulos corresponde al diseño con un turno de riego y un solo emisor por planta, mientras que nuevamente el diseño más costoso se consigue con tres turnos de riego y un solo emisor. Este último caso es el escenario más crítico de los probados en el Caso de Estudio. Al tener tres turnos de riego se está estableciendo que el submódulo solo tendrá un tercio de las horas totales disponibles para poder entregar el volumen diario de agua que cada planta necesita. Además de esto, se está usando un solo emisor, lo que quiere decir que todo el caudal que la planta necesita va a ser entregado por éste. Para poder entregar todo este caudal, el emisor necesita una altura de presión bastante considerable, y por lo tanto, el diseño se ve obligado a tener unos diámetros más grandes con el fin de evitar perder energía y poder cumplir con la presión mínima.

Análisis de número de emisores por planta

El número de emisores por planta juega un papel crucial en el costo final de las redes RLAF. Por medio de los resultados se puede evidenciar que, en la mayoría de los casos, a medida que aumenta el número de emisores por planta, disminuye también el costo la red matriz. Esto se debe a que al aumentar el número de emisores, el caudal que debe ser entregada a la planta se reparte entre éstos, haciendo que la presión que se necesite en los laterales sea menor. Esta disminución en la presión mínima permitida, conlleva a que la PES obtenida mediante la metodología de Bermúdez se vea reducida y por lo tanto, el diseño de la Red Matriz sea más económico.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que a medida que aumenta el número de emisores por planta y la PES disminuye, se va a tener una menor energía disponible para el diseño del submódulo. Debido a esto, puede ser que el costo constructivo del submódulo se vea incrementado.

Análisis de distribuciones de Turno

Dentro del Caso de Estudio se realizaron pruebas con 3 diferentes distribuciones de turno para cada uno de los casos. Para el escenario con un turno de riego, no tiene caso hablar de distribuciones de turno ya que todos los submódulos van a estar suministrando agua a las plantas. Sin embargo, en los escenarios de dos y tres turnos de riego si es posible evidenciar un comportamiento en los costos de la Red Matriz.

Para el escenario de dos turnos de riego, el mayor costo constructivo de la Red Matriz se consiguió mediante la opción A de distribución de turnos, independiente del número de emisores por

planta. Usando un emisor por planta, el valor de la red matriz para la distribución A tiene un costo de \$5'741,049.24 COP, mientras que la red matriz para las distribuciones B y C tiene un costo de \$5'059,495.55 COP. El aumento en el costo de la red matriz para la distribución A se debe a que la distribución de caudal en esta no se encuentra distribuida correctamente. En el primer turno, los 6 submódulos más cercanos a la fuente de abastecimiento se encuentran encendidos, haciendo que el caudal que pasa por las primeras tuberías de la red principal sea excesivo. Por otra parte, en las distribuciones B y C los submódulos que son prendidos simultáneamente se encuentran más alejados unos de otros, lo que hace que el caudal se encuentre mejor distribuido y las tuberías de la red matriz necesiten de un diámetro menor.

En el escenario de tres turnos de riego, se presenta el mismo comportamiento. La distribución A presenta un costo más alto que la distribución B y C, sin importar el número de emisores que se use. Para el escenario de 2 emisores por planta, la red matriz tiene un costo de \$5'142,970 COP, mientras que para la distribución B y C tiene un costo de \$4'729,429.92 COP, aproximadamente un 8% más económico, lo que es un ahorro importante.

Se puede establecer de esta forma, que a medida que la distribución de turnos logre optimizar la distribución del caudal, es decir, que minimice el caudal que debe ser transportado por las tuberías primarias, se obtendrá un mejor diseño de la red matriz. Para estar más seguro de las premisas expuestas anteriormente, se realizó otro Caso de Estudio presentado a continuación.

3.7.2 Caso de Estudio 5

Se desea diseñar un sistema RLAF compuesto por 6 submódulos. Cada submódulo contiene 10 laterales, donde cada uno suministra agua a 5 plantas. La distancia entre lateral y lateral es de 5 metros, mientras que la distancia entre plantas es de un metro. La longitud entre submódulos es de 20 metros. El diseño agronómico establece que las plantas necesitan un volumen diario de 15 litros, y el riego debe tener un Coeficiente de Uniformidad igual o mayor a 0.85. La fuente de abastecimiento provee agua únicamente 6 horas diarias, por lo que es el tiempo total que se tiene disponible para el riego.

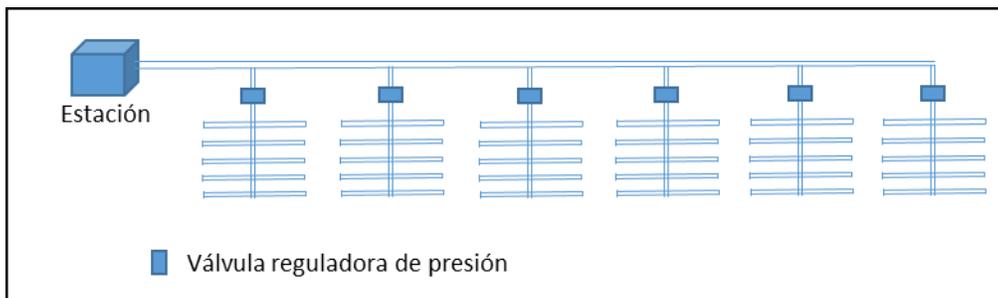


Figura 36 Esquema sistema de riego, Caso de Estudio 5.

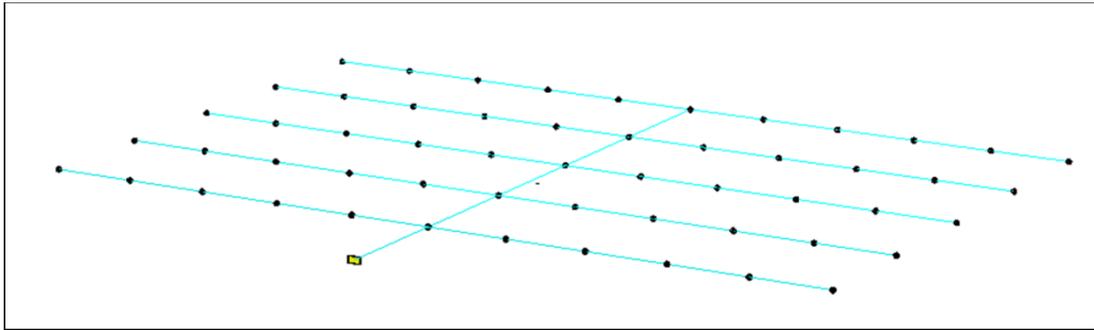


Figura 37 Diseño Submódulo, Caso de Estudio 5.

Se usará el mismo emisor fabricado por AGRIFIM, utilizado en el Caso de Estudio 4. Se diseñará para un, dos y tres turnos de riego, variando nuevamente el número de emisores por planta. Se procede al cálculo de los caudales por emisor y presiones medias para cada uno de los casos:

- Para 1 Turno de Riego con 1 Emisor por planta:

$$Q_{\text{medio por emisor}} = \frac{16 \text{ L}}{6 \text{ horas}} = 2.666 \text{ L/h}$$

$$H_{\text{media por emisor}} = \left(\frac{Q}{k}\right)^{1/x} = \left(\frac{2.666/3600}{0.00033987}\right)^{1/0.49298} = 4.8567 \text{ m}$$

Tabla 36 Resultados 1 Turno de Riego 1 Emisor, Caso de Estudio 5.

Presión mínima en el submódulo (m)	3.88
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	6.43

- Para 1 Turno de Riego con 2 Emisores por planta:

$$Q_{\text{medio por emisor}} = \frac{16 \text{ L}}{6 \text{ horas} \cdot 2 \text{ Emisores}} = 1.333 \text{ L/h}$$

$$H_{\text{media por emisor}} = \left(\frac{1.333/3600}{0.00033987}\right)^{1/0.49298} = 1.1904 \text{ m}$$

Tabla 37 Resultados 1 Turno de Riego 2 Emisores, Caso de Estudio 5.

Presión mínima en el submódulo (m)	0.95
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	2.08

Al igual que en Caso de Estudio 4, la presión mínima en el submódulo que se obtiene es menor a la presión de seguridad establecida por el fabricante de emisores (0.95 m < 3.52 m). Esto demuestra que para este transportar el caudal necesario es suficiente con un emisor.

- Para 2 Turnos de Riego con 1 Emisor por planta:

$$Q_{\text{medio por emisor}} = \frac{16 \text{ L}}{3 \text{ horas}} = 5.333 \text{ L/h}$$

$$H_{\text{media por emisor}} = \left(\frac{(5.333/3600)}{0.00033987} \right)^{1/0.49298} = 19.8141 \text{ m}$$

Tabla 38 Resultados 2 Turnos de Riego 1 Emisor, Caso de Estudio 5.

Presión mínima en el submódulo (m)	15.84
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	26.81

- Para 2 Turnos de Riego con 2 Emisores por planta:

$$Q_{\text{medio por emisor}} = \frac{16 \text{ L}}{2 \text{ Emisores}} = 2.666 \text{ L/h}$$

$$H_{\text{media por emisor}} = \left(\frac{(2.666/3600)}{0.00033987} \right)^{1/0.49298} = 5.8567 \text{ m}$$

Tabla 39 Resultados 2 Turnos de Riego 2 Emisores, Caso de Estudio 5.

Presión mínima en el submódulo (m)	3.76
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	6.43

- Para 2 Turnos de Riego con 3 Emisores por planta:

$$Q_{\text{medio por emisor}} = \frac{16 \text{ L}}{3 \text{ Emisores}} = 1.777 \text{ L/h}$$

$$H_{\text{media por emisor}} = \left(\frac{(1.777/3600)}{0.00033987} \right)^{1/0.49298} = 2.1337 \text{ m}$$

Tabla 40 Resultados 2 Turnos de Riego 3 Emisores, Caso de Estudio 5.

Presión mínima en el submódulo (m)	1.63
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	3.33

En este caso se vuelve a observar que la presión mínima en el submódulo es menor a la presión mínima de seguridad (1.63 m < 3.52 m), lo que significa que no es conveniente usar tres emisores de riego en este caso, con dos emisores o uno, sería suficiente.

- Para 3 Turnos de Riego con 1 Emisores por planta:

$$Q_{\text{medio por emisor}} = \frac{16 \text{ L}}{2 \text{ horas}} = 8 \text{ L/h}$$

$$H_{\text{media por emisor}} = \left(\frac{(8/3600)}{0.00033987} \right)^{1/0.49298} = 45.099 \text{ m}$$

Tabla 41 Resultados 3 Turnos de Riego 1 Emisor, Caso de Estudio 5.

Presión mínima en el submódulo (m)	36.05
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	37.50

- Para 3 Turnos de Riego con 2 Emisores por planta:

$$Q_{\text{medio por emisor}} = \frac{16 \text{ L}}{2 \text{ horas} \cdot 2 \text{ Emisores}} = 4 \text{ L/h}$$

$$H_{\text{media por emisor}} = \left(\frac{(4/3600)}{0.00033987} \right)^{1/0.49298} = 11.054 \text{ m}$$

Tabla 42 Resultados 3 Turnos de Riego 2 Emisores, Caso de Estudio 5.

Presión mínima en el submódulo (m)	8.56
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	14.79

- Para 3 Turnos de Riego con 3 Emisores por planta:

$$Q_{\text{medio por emisor}} = \frac{16 \text{ L}}{2 \text{ horas} \cdot 3 \text{ Emisores}} = 2.666 \text{ L/h}$$

$$H_{\text{media por emisor}} = \left(\frac{(2.666/3600)}{0.00033987} \right)^{1/0.49298} = 5.8567 \text{ m}$$

Tabla 43 Resultados 3 Turnos de Riego 3 Emisores, Caso de Estudio 5.

Presión mínima en el submódulo (m)	3.71
Presión de Entrada al Submódulo (PES), (m)	6.43

Resumiendo los resultados anteriores se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 44 Resultados PES y Pmin, Caso de Estudio 5.

Número de Turnos	Número de Emisores por Planta	Caudal por emisor (L/h)	Presión media (m)	Presión mínima (m)	PES (m)
1 Turno	1 Emisor	2.666	4.8567	3.88	6.43
	2 Emisores	-	-	-	-
	3 Emisores	-	-	-	-
2 Turnos	1 Emisor	5.333	19.8141	15.84	26.81
	2 Emisores	2.666	5.8567	3.76	6.43
	3 Emisores	-	-	-	-
3 Turnos	1 Emisor	8	45.099	36.05	37.5
	2 Emisores	4	11.054	8.56	14.79
	3 Emisores	2.666	5.8567	3.71	6.43

Por medio de estos datos se procede al diseño del submódulo para cada una de las combinaciones turnos de riego – número de emisores por planta, siguiendo la metodología de Hernández.

Tabla 45 Resultados Diseño Submódulo, Caso de Estudio 5

Número de Turnos	Emisores	Costo Submódulos (COP)	CUr	PES (m)	Q por Submódulo (L/s)
1 Turno	1 Emisor	\$ 174,091.80	0.9213	6.43	0.04167
	2 Emisores	-	-	-	-
	3 Emisores	-	-	-	-
2 Turnos	1 Emisor	\$ 174,091.80	0.934	26.81	0.08216
	2 Emisores	\$ 194,922.96	0.9242	6.43	0.07789
	3 Emisores	-	-	-	-
3 Turnos	1 Emisor	\$ 255,938.64	0.9901	38.29	0.11016
	2 Emisores	\$ 194,922.96	0.92	14.79	0.11936
	3 Emisores	\$ 230,638.98	0.9202	6.43	0.12148

Resta ahora realizar el diseño de la red matriz definiendo la distribución de turnos de riego que se va a usar. Se proponen 3 distribuciones de riego para acotar el espacio muestra que se tiene, intentando que esta sean representativas:

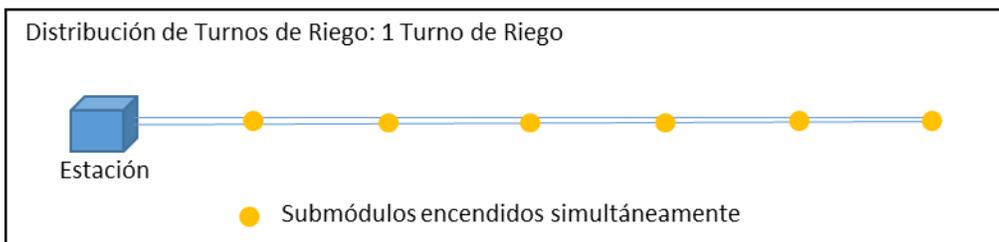


Figura 38 Distribución de Turnos, 1 turno, Caso de Estudio 5.

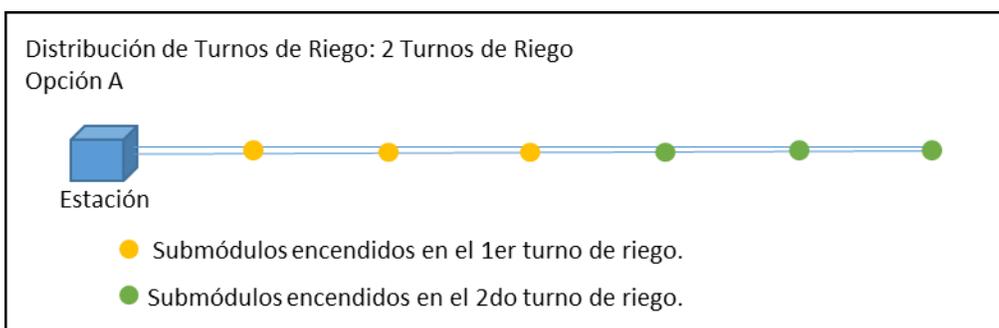


Figura 39 Distribución de Turnos, 2 turnos Opción A, Caso de Estudio 5.

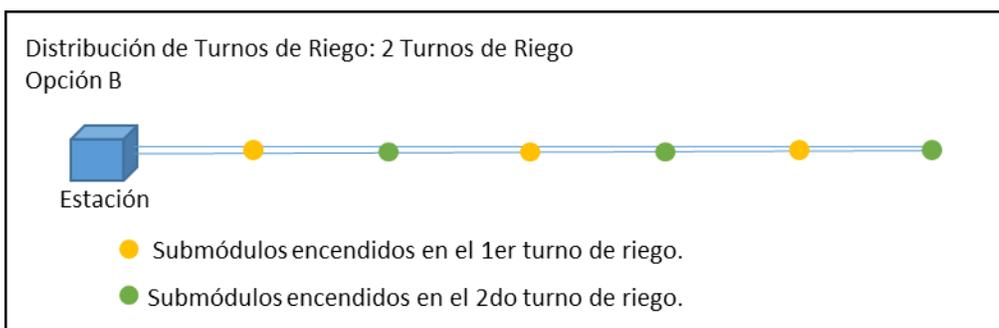


Figura 40 Distribución de Turnos, 2 turnos Opción B, Caso de Estudio 5.

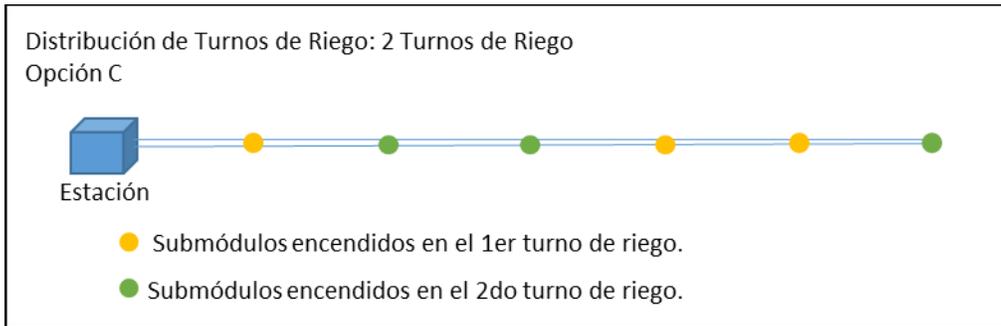


Figura 41 Distribución de Turnos, 2 turnos Opción C, Caso de Estudio 5.

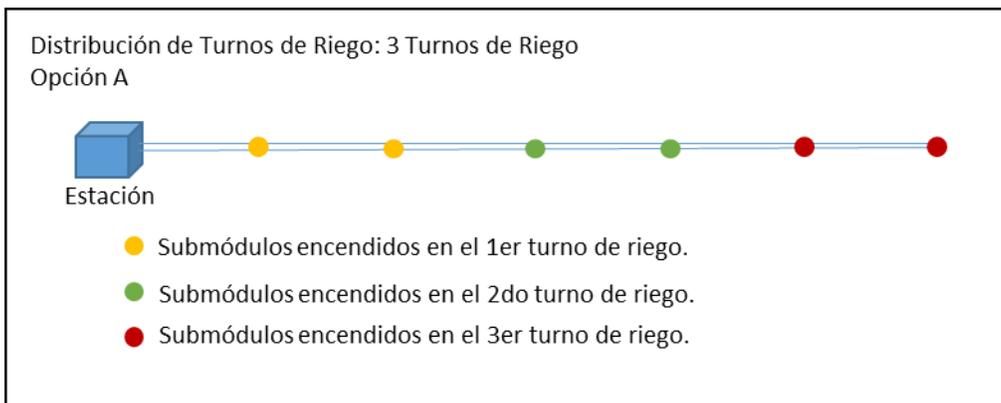


Figura 42 Distribución de Turnos, 3 turnos Opción A, Caso de Estudio 5.

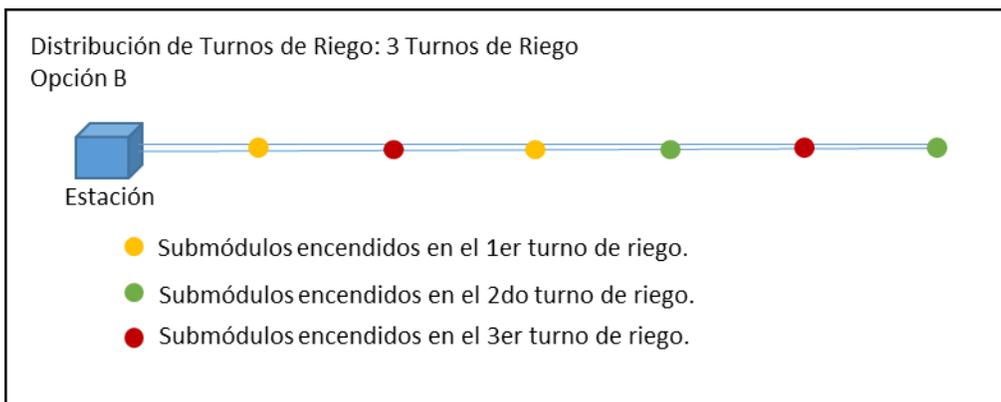


Figura 43 Distribución de Turnos, 3 turnos Opción B, Caso de Estudio 5.

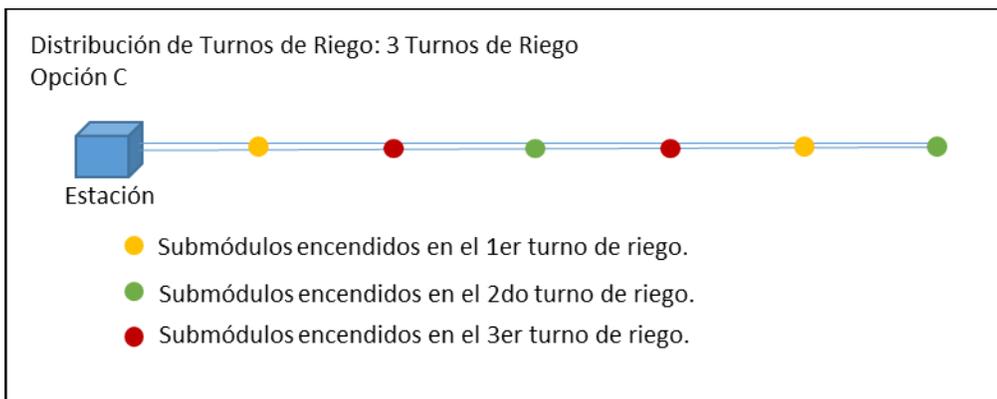


Figura 44 Distribución de Turnos, 3 turnos Opción C, Caso de Estudio 5.

Teniendo en cuenta estas distribuciones de turnos de riego se procede a diseñar la red matriz haciendo uso de la metodología OPUS y REDES. A la fuente de abastecimiento se le asigna una LGH suficientemente alta para poder ser usada en todos los escenarios; se le asigna entonces 40 metros. A continuación se presentan los resultados para los diferentes costos de cada escenario:

Tabla 46 Resultados diseños Finales Caso de Estudio 5.

Turno	Emisores	Distribución Riego	Costo Red Matriz (COP)	Costo Submódulos (COP)	Costo Total (COP)
1	1	Uniforme	\$ 107,833.66	\$ 174,091.80	\$ 281,925.46
2	1	A	\$ 209,012.98	\$ 174,091.80	\$ 383,104.78
		B	\$ 175,289.77	\$ 174,091.80	\$ 349,381.57
		C	\$ 196,367.99	\$ 174,091.80	\$ 370,459.79
	2	A	\$ 145,778.33	\$ 194,922.96	\$ 340,701.29
		B	\$ 116,266.88	\$ 194,922.96	\$ 311,189.84
		C	\$ 116,266.88	\$ 194,922.96	\$ 311,189.84
3	1	A	\$ 364,500.38	\$ 255,938.64	\$ 620,439.02
		B	\$ 338,275.95	\$ 255,938.64	\$ 594,214.59
		C	\$ 312,051.51	\$ 255,938.64	\$ 567,990.15
	2	A	\$ 196,367.99	\$ 194,922.96	\$ 391,290.95
		B	\$ 175,289.77	\$ 194,922.96	\$ 370,212.73
		C	\$ 154,211.55	\$ 194,922.96	\$ 349,134.51
	3	A	\$ 175,289.77	\$ 230,638.98	\$ 405,928.75
		B	\$ 154,211.55	\$ 230,638.98	\$ 384,850.53
		C	\$ 133,133.33	\$ 230,638.98	\$ 363,772.31

Aunque en este Caso de Estudio, los pesos para los costos de la red matriz y el costo de los submódulos son diferentes, debido a lo pequeño del sistema de riego, se puede apreciar nuevamente las conclusiones que se habían establecido por medio del Caso de Estudio 4:

- A medida que aumentan los turnos de riego, se incrementa el costo total del sistema de riego. Esto se puede comprobar al verificar que el diseño del sistema más económico fue encontrado mediante un turno de riego y un emisor por planta, tanto para los costos de la red matriz, como lo para los costos de los submódulos.
- Dependiendo del número de emisores por planta se puede encontrar un diseño más costoso o más económico, viendo únicamente costos de tuberías. Se puede ver nuevamente cómo a medida que aumenta los números de emisores por planta en un escenario de turnos definidos, el costo de la red matriz disminuye, mientras que el costo del submódulo aumenta. Que tan conveniente resulta usar un mayor número de emisores por planta va a depender de características propias del sistema de riego: qué tan largas son las tuberías de la red matriz, de qué tamaño es el submódulo, cuantos submódulos tiene el sistema, etc.
- La distribución de turnos juega también un papel importante en los costos de la red matriz. Dependiendo de cómo es distribuido el caudal en cada turno, el costo de la red matriz puede aumentar o disminuir. Esto se puede evidenciar en la tabla de resultados; para todos los turnos de riego y números de emisores por planta, el mayor costo de la red matriz se obtuvo con la distribución A. Esta distribución es la que peor distribuye el caudal de las tres distribuciones, ya que los submódulos prendidos están muy cerca unos de otros, haciendo que el caudal de diseño de la red matriz sea bastante alto, y por consiguiente, los diámetros de estas tuberías. De esta forma, a medida que se consiga una mejor distribución del caudal, se obtendrá también un menor costo de la red matriz.

4. REDES DE RIEGO LOCALIZADO DE ALTA FRECUENCIA ALIMENTADAS POR BOMBEO

El bombeo es una de las formas más comunes de proveer energía adicional a Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP), para que de esta forma, se pueda entregar el caudal y la presión requeridos en los nudos de demanda. Con el mismo fin, las bombas son usadas en los sistemas RLAF. Sin embargo, los costos energéticos de las bombas son altos, haciendo que en algunos casos, sea más económico aumentar el diámetro de las tuberías para así evitar perder energía, a pagar por toda la electricidad que puede consumir la(s) bomba(s) que se utilicen.

Con el fin de ver de una forma más clara esta relación, costos bombeo vs costos constructivos, se plantea usar una bomba en el Caso de Estudio 4, la cual proporcionará la LGH de la fuente de abastecimiento. La bomba aumentará gradualmente la energía en el embalse, para que de esta forma, el tamaño de los diámetros de las tuberías de la red matriz pueda ser disminuido. Sin embargo, se tendrá en cuenta los costos energéticos que se producen al tener funcionando la bomba y los costos comerciales de ésta. El análisis se llevará a cabo sobre la combinación: un turno de riego y un emisor por planta, ya que se comprobó que esta era la configuración con la que se obtenía el diseño más económico.

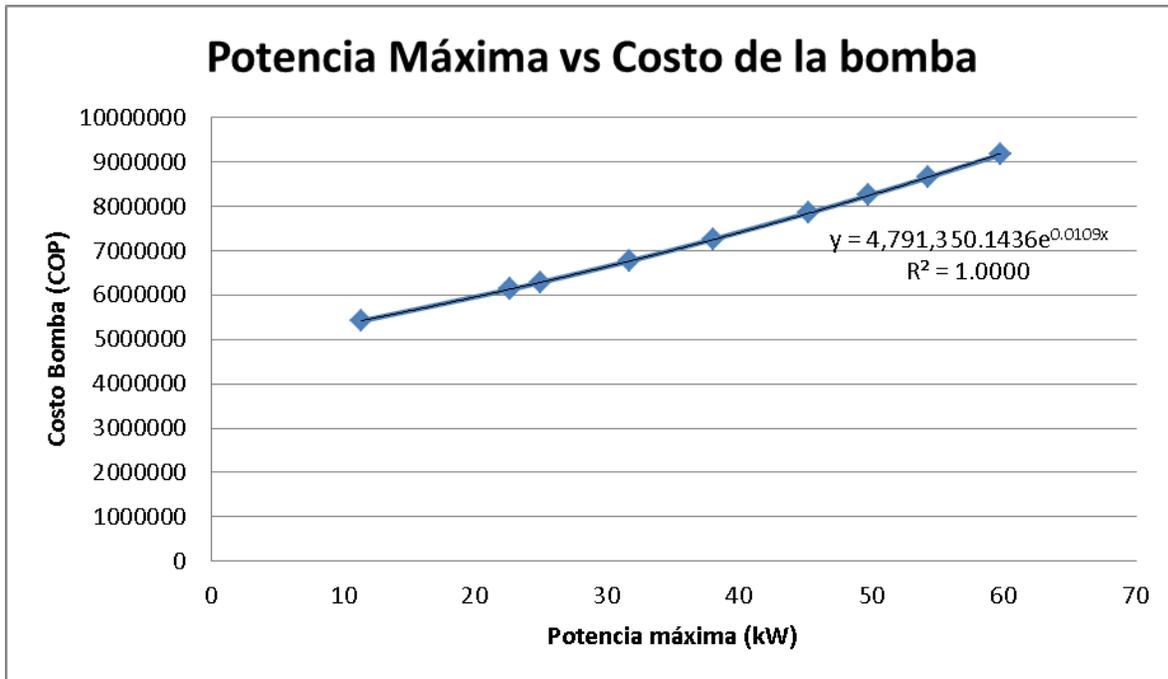
4.1 Costo comercial de la bomba

Para poder establecer un costo comercial de la bomba en función de la potencia que esta consuma se utilizó los costos establecidos por la competencia mundial *The Battle of the Water Networks II* (BWM-II), llevada a cabo Septiembre de 2012. A continuación se presenta la tabla para el costo de las bombas propuesta en la competencia:

Tabla 47 Costos comerciales de las bombas, tomado de BWM-II (2012).

Modelo de la Bomba	Potencia Máxima	Costo Comercial (COP)
8	45.24	\$ 8,025,211.42
9	31.67	\$ 6,918,419.62
10	49.76	\$ 8,425,209.86
11	22.62	\$ 6,262,111.50
8a	22.62	\$ 6,262,111.50
10a	24.88	\$ 6,421,334.18
11a	11.31	\$ 5,533,959.00
8b	54.28	\$ 8,842,683.96
9b	38	\$ 7,417,446.80
10b	59.71	\$ 9,365,012.02

De esta forma se puede graficar costo comercial de la bomba vs la potencia máxima de ésta, con el fin de encontrar una ecuación que relacione estas dos variables:



Gráfica 5 Potencia máxima vs costos bomba.

Se tiene entonces:

$$\text{Costo bomba} = 4'791.350,143 * e^{0.0109 * P} \quad (\text{Ecuación 36})$$

donde P equivale a la potencia máxima de la bomba. Para este caso se supondrá que la potencia que bomba necesite para mover el caudal del Caso de Estudio será la potencia máxima de ésta.

A su vez, la potencia requerida por la bomba para mover un caudal definido a una altura definida se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{\eta} \rho g * Q * H \quad (\text{Ecuación 37})$$

donde:

η corresponde a la eficiencia del sistema de bombeo (motor, bomba, etc)

Q es el caudal movilizado por la bomba, en m^3/s

H corresponde a la altura a la que se quiere llevar el caudal.

Para el Caso de Estudio 4 este caudal corresponde al caudal total solicitado por todos los submódulos. Se tiene entonces:

$$Q_{total} = Q_{submodulo} * \text{Número de Submódulos}$$

$$Q_{total} = 0.072722 * 12 = 0.872664 \text{ L/s} = 0.00087266 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.2 Costos energéticos

Para los costos energéticos que conlleva el uso de la bomba se debe tener en cuenta la potencia que necesita la bomba y los costos por energía a cargo de la empresa proveedora de electricidad. Para esto se usará un costo por kWh de \$329.436 COP, precio obtenido del boletín de Codensa para el año 2013. El costo energético diario de la bomba se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Costo energetico diario} = P * \$ 329.436 * N \quad (\text{Ecuación 38})$$

donde N corresponde al número de horas en las cuales la bomba se encuentra funcionando.

4.3 Costo de la red matriz

Para los costos de la red matriz se utilizará la metodología de diseño OPUS, modelando nuevamente la red como una red abierta con nudos de demanda y presión constantes. Lo único que variará será la LGH que se tendrá en la fuente de abastecimiento.

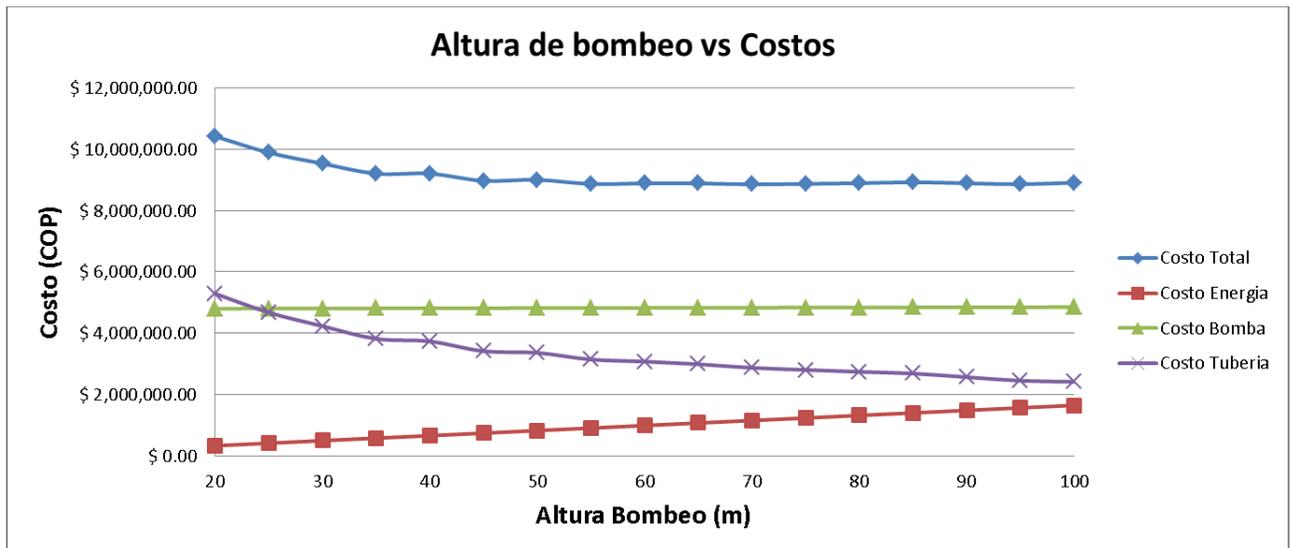
4.4 Resultados y Análisis

A continuación se presentan los resultados obtenidos para una proyección de un año:

Tabla 48 Costos totales Caso de Estudio 4.

Q (m ³ /s)	H (m)	P(kW)	Costo Energía Anual (COP)	Costo Bomba (COP)	Costo Tubería Red Matriz (COP)	Costo Total (COP)
0.00087266	20	0.2283	\$ 329,403.32	\$ 4,803,287.49	\$ 5,291,781.71	\$ 10,424,472.52
0.00087266	25	0.2854	\$ 411,754.15	\$ 4,806,276.47	\$ 4,675,343.75	\$ 9,893,374.37
0.00087266	30	0.3424	\$ 494,104.98	\$ 4,809,267.31	\$ 4,233,285.52	\$ 9,536,657.81
0.00087266	35	0.3995	\$ 576,455.82	\$ 4,812,260.01	\$ 3,818,907.20	\$ 9,207,623.02
0.00087266	40	0.4566	\$ 658,806.65	\$ 4,815,254.57	\$ 3,734,594.15	\$ 9,208,655.37
0.00087266	45	0.5136	\$ 741,157.48	\$ 4,818,251.00	\$ 3,415,417.48	\$ 8,974,825.95
0.00087266	50	0.5707	\$ 823,508.31	\$ 4,821,249.29	\$ 3,361,028.11	\$ 9,005,785.71
0.00087266	55	0.6278	\$ 905,859.14	\$ 4,824,249.45	\$ 3,143,050.12	\$ 8,873,158.70
0.00087266	60	0.6849	\$ 988,209.97	\$ 4,827,251.47	\$ 3,075,584.33	\$ 8,891,045.77
0.00087266	65	0.7419	\$ 1,070,560.80	\$ 4,830,255.36	\$ 2,988,728.52	\$ 8,889,544.68
0.00087266	70	0.7990	\$ 1,152,911.63	\$ 4,833,261.12	\$ 2,870,682.76	\$ 8,856,855.51
0.00087266	75	0.8561	\$ 1,235,262.46	\$ 4,836,268.75	\$ 2,803,216.97	\$ 8,874,748.19
0.00087266	80	0.9132	\$ 1,317,613.29	\$ 4,839,278.26	\$ 2,739,560.58	\$ 8,896,452.13
0.00087266	85	0.9702	\$ 1,399,964.12	\$ 4,842,289.63	\$ 2,685,171.20	\$ 8,927,424.96
0.00087266	90	1.0273	\$ 1,482,314.95	\$ 4,845,302.88	\$ 2,566,703.70	\$ 8,894,321.54
0.00087266	95	1.0844	\$ 1,564,665.78	\$ 4,848,318.01	\$ 2,448,657.93	\$ 8,861,641.72
0.00087266	100	1.1414	\$ 1,647,016.62	\$ 4,851,335.01	\$ 2,414,925.40	\$ 8,913,277.03

Se puede ver por medio de los resultados que a medida que aumenta la Línea de Gradiente Hidráulico de la fuente de abastecimiento, es decir, que aumenta la altura a la cual la bomba lleva el agua, los costos de la red matriz se van disminuyendo. Esto era de esperarse debido a que a una mayor una altura en el embalse, se dispondrá de una mayor energía para recorrer el sistema. Esto quiere decir que los diámetros de las tuberías podrían disminuir, haciendo que el costo de las tuberías decrezca. Por otro lado, se puede ver que a medida que aumenta la altura proporcionada por la bomba, aumentan también los costos de energía ya que ésta demandará una mayor potencia. Sin embargo, estos dos costos parecen equilibrarse en los costos totales de la red. Esto puede evidenciarse más fácilmente en la siguiente gráfica:



Gráfica 6 Altura de Bombeo vs Costos, Caso de Estudio 4.

A medida que aumenta la altura de bombeo aumentan los costos por energía, pero a su vez los costos por tubería disminuyen, esto hace que la línea de Costos Totales permanezca constante desde aproximadamente los 55 metros de altura. Debe tenerse en cuenta que para este Caso de Estudio, el caudal que se está moviendo por la bomba es sumamente pequeño y por lo tanto, los costos de energía parecen no ser tan importantes como se cree en la actualidad.

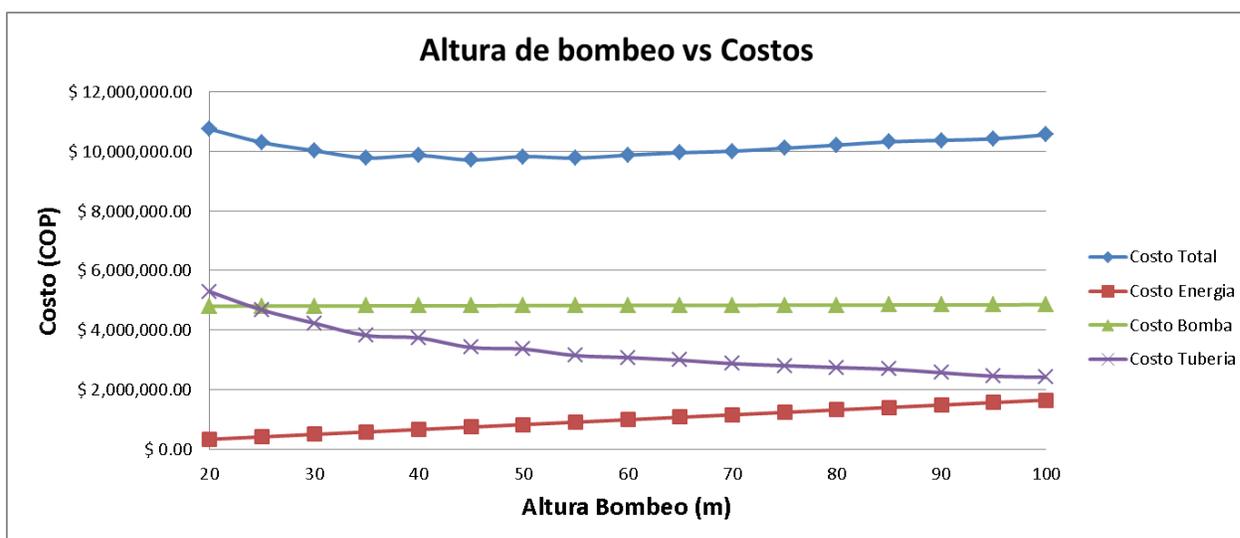
Para verificar que tan importante es el costo de energía dentro de los costos totales se decidió hacer el mismo análisis pero ahora a un horizonte de 2 años. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 49 Resultados Costos Bombeo a una proyección de 2 años, Caso de estudio 4.

Q (m ³ /s)	H (m)	P(kW)	Costo Energía 2 Años (COP)	Costo Bomba (COP)	Costo Tubería Red Matriz (COP)	Costo Total (COP)
0.00087266	20	0.2283	\$ 658,806.65	\$ 4,803,287.49	\$ 5,291,781.71	\$ 10,753,875.84
0.00087266	25	0.2854	\$ 823,508.31	\$ 4,806,276.47	\$ 4,675,343.75	\$ 10,305,128.52
0.00087266	30	0.3424	\$ 988,209.97	\$ 4,809,267.31	\$ 4,233,285.52	\$ 10,030,762.80
0.00087266	35	0.3995	\$ 1,152,911.63	\$ 4,812,260.01	\$ 3,818,907.20	\$ 9,784,078.84
0.00087266	40	0.4566	\$ 1,317,613.29	\$ 4,815,254.57	\$ 3,734,594.15	\$ 9,867,462.01
0.00087266	45	0.5136	\$ 1,482,314.95	\$ 4,818,251.00	\$ 3,415,417.48	\$ 9,715,983.43
0.00087266	50	0.5707	\$ 1,647,016.62	\$ 4,821,249.29	\$ 3,361,028.11	\$ 9,829,294.01
0.00087266	55	0.6278	\$ 1,811,718.28	\$ 4,824,249.45	\$ 3,143,050.12	\$ 9,779,017.84
0.00087266	60	0.6849	\$ 1,976,419.94	\$ 4,827,251.47	\$ 3,075,584.33	\$ 9,879,255.74
0.00087266	65	0.7419	\$ 2,141,121.60	\$ 4,830,255.36	\$ 2,988,728.52	\$ 9,960,105.48

Q (m3/s)	H (m)	P(kW)	Costo Energía 2 Años (COP)	Costo Bomba (COP)	Costo Tubería Red Matriz (COP)	Costo Total (COP)
0.00087266	70	0.7990	\$ 2,305,823.26	\$ 4,833,261.12	\$ 2,870,682.76	\$ 10,009,767.14
0.00087266	75	0.8561	\$ 2,470,524.92	\$ 4,836,268.75	\$ 2,803,216.97	\$ 10,110,010.65
0.00087266	80	0.9132	\$ 2,635,226.58	\$ 4,839,278.26	\$ 2,739,560.58	\$ 10,214,065.42
0.00087266	85	0.9702	\$ 2,799,928.25	\$ 4,842,289.63	\$ 2,685,171.20	\$ 10,327,389.08
0.00087266	90	1.0273	\$ 2,964,629.91	\$ 4,845,302.88	\$ 2,566,703.70	\$ 10,376,636.49
0.00087266	95	1.0844	\$ 3,129,331.57	\$ 4,848,318.01	\$ 2,448,657.93	\$ 10,426,307.51
0.00087266	100	1.1414	\$ 3,294,033.23	\$ 4,851,335.01	\$ 2,414,925.40	\$ 10,560,293.64

Para este caso, es más evidente el peso que tienen los costos de energía dentro de los costos totales del sistema de riego. Se puede ver como a medida que aumenta el horizonte de proyección, los costos energéticos comienzan a ser más altos y comienzan a tener una mayor participación y consecuencia sobre el costo final de la red. Si en la proyección a un año se veía que el costo por energía y el costo de tubería tendían a equilibrarse, para este caso el aumento en los costos por energía es mayor a la disminución en los costos de las tuberías, haciendo que los costos totales aumenten a medida que se aumenta la altura de bombeo. Se puede apreciar que también existe un valor mínimo para el Costo Total, el cual se consigue con una altura de bombeo de 45 metros. Esto se puede apreciar más claramente en la siguiente gráfica:



Gráfica 7 Altura de bombeo vs Costos proyección a 2 años, Caso de Estudio 4.

Se puede concluir entonces que el peso de los costos energéticos dentro de los costos totales de la red va a depender del horizonte de proyección en el cual se esté analizando el proyecto. A medida que aumenta el tiempo que se use la bomba, los costos por energía serán más altos, y por lo tanto, el ahorro que se obtuvo en la red matriz se verá reducido hasta ser sobrepasado por estos costos.

Dependiendo del horizonte de proyección y la estructura de la red matriz (qué tan largas son las tuberías) se puede encontrar una altura de bombeo la cual minimice los costos totales de la red. Esto quiere decir que a esta cierta altura de bombeo, el ahorro en la red matriz va a ser más importante que el aumento en los costos energéticos que se tienen para alcanzar esta altura.

5 CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se presentaron diferentes pruebas, análisis, metodologías y comparaciones, por medio de las cuales se obtuvieron importantes resultados y conclusiones acerca de la forma óptima en la que deben ser diseñados los sistemas RLAF. A continuación se presentan éstas:

- Por medio del análisis y comprensión de todas las características que componen un sistema RLAF, fue posible entender de manera amplia los diferentes problemas y dificultades que se tienen para poder establecer una forma óptima de diseño para este tipo de redes. Una vez entendidos los diferentes parámetros del diseño, fue posible verificar la metodología propuesta por David Hernández y Nataly Bermúdez para el diseño óptimo de submódulos. Se encontró que efectivamente esta metodología ofrece resultados más económicos que los encontrados mediante la metodología SOGH, llegando en algunos casos, hasta un 10% de ahorro. Estos diseños cumplen igualmente con los requerimientos hidráulicos y agronómicos: presión mínima, tolerancia de caudales y Coeficiente de Uniformidad Resultante.
- El diseño de la red matriz está fuertemente influenciado por las tres variables estudiadas en este trabajo: Los turnos de riego, el número de emisores por planta y la distribución de los turnos.
- Se estableció que a medida que aumentan los turnos de riego, aumenta también el caudal que debe ser transportado, tanto por los laterales y los múltiples, como por la red matriz. Esto hace que a un mayor número de turnos, se tenga un mayor costo tanto en la red matriz como en los submódulos. Por esta razón, se debe intentar usar el menor número de turnos posibles. De esta forma, se disminuirá el caudal que debe ser movilizado y los diámetros de las tuberías no requerirán un tamaño mayor.
- El número de emisores por planta juega un papel fundamental en el diseño óptimo de este tipo de redes. A medida que se usa un mayor número de emisores por planta, el caudal que debe ser entregado por cada uno de estos va a disminuir. Esto lleva a que la presión mínima en el submódulo se vea reducida y de igual forma, la PES sea menor. Al tener una PES menor, los requerimientos de presión mínima en la red matriz se verán disminuidos, haciendo que el diseño de esta resulte más económico. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que al tener una PES menor, el costo de los submódulos podrán aumentar, debido a que la energía disponible para recorrer éste va a ser menor.

- La distribución de turnos de riego también influenciara en cierta manera, el costo final de la red matriz del sistema de riego. Dependiendo de qué tan bien se distribuya el caudal entre las tuberías para cada turno de riego, el costo de la red matriz podrá aumentar o disminuir. Se quiere, entonces, que la distribución de turnos de riego que se utilice, sea aquella que logre la mejor distribución del caudal posible. De esta forma, el caudal de diseño de cada una de las tuberías de la red matriz podrá ser menor, logrando que la red sea más económica.
- Las bombas ofrecen una fuente importante de energía adicional cuando no se tiene una línea de gradiente hidráulico lo suficientemente alta para poder obtener un diseño adecuado de la red matriz. Sin embargo, debe tenerse en cuenta los costos energéticos que produce el uso de las bombas. Se encontró que el peso que tiene este costo energético dentro de los costos totales de la red dependerá del tiempo de proyección para el cual se analice el sistema. A medida que aumente el tiempo de uso de la bomba, aumentarán también los costos energéticos, y por consiguiente, llegará un momento en el cual el aumento en los costos energéticos sea mayor al ahorro que se obtiene en los costos de tuberías, logrados gracias al uso de la bomba. Es en este caso donde el usar una bomba deja de ser óptimo y se convierte una opción menos económica. De esta forma, se establece que dependiendo del tamaño de la red matriz, del caudal que se quiera mover y del tiempo de proyección del diseño, existe una altura de bombeo que minimiza los costos totales de la red, y es precisamente esta altura de bombeo que se debe usar.

6 BIBLIOGRAFÍA

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, C. (2012). Programa REDES. Bogotá: Universidad de los Andes.

Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de Tuberías. Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos*. Bogotá: Alfaomega, 978-958-682-680-8

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.

Hernández, D. (2012). *Diseño optimizado de submódulos de sistemas de riego localizado de alta frecuencia*. Bogotá: Universidad de los Andes.

Pizzaro, F. (1996). *Riegos Localizados de Alta Frecuencia. Goteo, microaspersión, exudación*. Madrid: Mundi-Prensa.

Wu, I. (1975). Design of Drip Irrigation Main Lines. *Journal of Irrigation and Drainage Division*, 265 - 278.

Ochoa, S. (2009). *Diseño Optimizado de Redes de Distribución de Agua Potable con Base en el Concepto Energético de Superficie Óptima de Gradiente Hidráulico*. Bogotá: Universidad de los Andes.

Saldarriaga, J., Paez, D., Cuero, P., & León, N. (2012). *Optimal power use surface for design of water distribution systems*. Adelaida: WDSA 2012: 14th Water Distribution Systems Analysis Conference, 24-27.