

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE**

---



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**Diseño óptimo de sistemas de riego a presión  
para su explotación a turnos**

**TESIS DOCTORAL**

Autora:

D.<sup>a</sup> Carmen Mireya Lapo Pauta

Directores:

Dr. D. Francisco Javier Martínez Solano

Dr. D. Ricardo Aliod Sebastián

**Valencia, septiembre 2019**



*A mi familia*

*“Solo hay dos maneras de vivir tu vida. Una es como si nada fuera un milagro. La otra es como si todo fuera un milagro”*

*Albert Einstein*

*Un corazón que ha recibido debe ser agradecido.*

*A Dios, ya que su favor me afianzó sobre fuertes montañas, y con su sabiduría ha sido posible concluir este trayecto de mi formación.*

*A mis amados: Max mi esposo y Daniela mi hija quienes siempre creyeron en mí, me acompañaron en todo el camino en donde hubo obstáculos y llanos, y con su amor llenaron esta etapa de mi vida de alegría y optimismo.*

*A mis queridos padres, hermanos, tíos, primos que con su oración y palabras de aliento hicieron este trajinar más llevadero.*

*De manera especial al añorado y querido Dr. Rafael Pérez (+) quien fue el mentor inicial de este trabajo. De igual manera agradezco al Dr. Ricardo Aliod por su paciencia, su calidad humana, sus sabias enseñanzas y por haber sido la guía efectiva hasta culminar esta investigación. Al Dr. Javier Martínez Solano por sus acertadas orientaciones, confianza y generosidad al tomar las riendas de la dirección de este trabajo.*

*A la Universidad Técnica Particular de Loja, en el Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil.*

*A todos mis amigos y compañeros por su estímulo constante.*

## RESUMEN

El diseño acertado de las redes presurizadas de riego constituye la fase preliminar de una buena gestión de estos sistemas. La posibilidad de que, en ciertas condiciones, sea ventajoso el diseño de estas redes para su explotación mediante riego a turnos motiva este trabajo. El factor económico juega un papel fundamental en el diseño de las redes de presurizadas de riego en general y en particular en la concepción de aquellas pensadas para operar a turnos que es el campo de aplicación que nos atañe, en el que se han encontrado muy pocas investigaciones precedentes.

La primera etapa del trabajo desarrollado ha consistido en la formulación e implementación completa de un Algoritmo Híbrido (AG-PNL) para el diseño óptimo de redes de riego a presión operando a turnos con topología dada, para lo cual se ensambla un algoritmo evolutivo, Algoritmo Genético (AG), y un algoritmo determinístico, basado en Programación No Lineal (PNL). Este Algoritmo Híbrido permite asignar los turnos a los hidrantes y los diámetros a las conducciones, de manera que el costo del diseño resultante sea mínimo.

El problema de diseño económico de la red se formula en términos de una función objetivo que minimice los costos asociados a la red de conducciones para una asignación de turnos dada, satisfaciendo las restricciones y las leyes físicas que gobiernan el funcionamiento del sistema. La función objetivo se evalúa por un método explícito como el Algoritmo de Programación No Lineal de Gradiente Reducido Generalizado (GRG). Las otras variables que el Algoritmo Híbrido determina son las asignaciones de turnos a cada hidrante que conduce al mínimo costo de la red. Para ello se recurre al uso de un Algoritmo Genético donde la función objetivo que evalúa el fitness de la población es precisamente el costo mínimo de la red, calculado mediante el algoritmo PNL-GRG asociado a cada individuo en el espacio de asignaciones de turnos.

En la segunda parte se validan los resultados de diseño del AG-PNL con otros métodos alternativos de diseño óptimo en un conjunto de 9 Casos de Estudio, extraídos de proyectos reales con una amplia diversidad de condiciones operativas, topográficas, y dimensión. Paralelamente se analiza la capacidad de las redes diseñadas para poder encajar cambios posteriores en la asignación de turnos, caracterizando esta flexibilidad con un nuevo indicador, IFCT. Este análisis también se realiza considerando diseños alternativos de las mismas redes

para operar a la demanda, con la precaución de adoptar parámetros y condiciones de diseño que hagan significativa la comparación.

Los resultados de diseño de las redes de riego a presión operando a turnos mediante el AG-PNL una vez que se normalizan conducen a redes con un costo menor en hasta 10.3 % que el método alternativo “clásico” más eficiente considerado, método en donde los turnos se definen de formas heurística. A la vez estas redes gozan de un mayor IFCT en hasta 8.5 %. Se observó una elevada variabilidad de las diferencias de costos entre diseños a la demanda y a turnos en cada Caso de Estudio, con unos ahorros en el diseño a turnos respecto a la demanda situados entre el 4.5% y el 48%. Se ha señalado una posible aplicación adicional del indicador de flexibilidad (IFCT) como criterio de ayuda a la decisión sobre la conveniencia de selección de un diseño a turnos o la demanda.

# ABSTRACT

The successful design of pressurized irrigation networks is the preliminary phase of good management of these systems. The possibility that, in certain conditions, it is advantageous to design these networks for exploitation through turn-based irrigation motivates this work. The economic factor plays a fundamental role in the design of networks of pressurized irrigation in general and in particular in the conception of those designed to operate in shifts that is the field of application that concerns us, in which they have found very few previous investigations.

The first stage of the work developed has been the formulation and complete implementation of a Hybrid Algorithm (GA-NLP) for the optimal design of irrigation networks under pressure operating with given topology, for which an evolutionary algorithm is assembled, Genetic Algorithm (GA), and a deterministic algorithm, based on Nonlinear Programming (NLP). This Hybrid Algorithm allows you to assign the hydrant shifts and the diameters to the pipes, so that the resulting design cost is minimal.

The problem of economic design of the network is formulated in terms of an objective function that minimizes the costs associated with the network of pipelines for a given shift assignment, satisfying the restrictions and physical laws that govern the operation of the system. The objective function is evaluated by an explicit method such as the Generalized Reduced Gradient Nonlinear Programming Algorithm (GRG). The other variables that the Hybrid Algorithm determines are the shift assignments to each hydrant that leads to the minimum cost of the network. For this, the use of a Genetic Algorithm is used, where the objective function that evaluates the fitness of the population is precisely the minimum cost of the network, calculated by means of the NLP-GRG algorithm associated to each individual in the space of shift assignments.

In the second part the GA-NLP design results are validated with other alternative optimal design methods in a set of 9 Case Studies, extracted from real projects with a wide diversity of operational, topographic, and dimension conditions. At the same time, the capacity of the networks designed to fit later changes in the allocation of shifts is analyzed, characterizing this flexibility with a new indicator, IFCT. This analysis is also done considering alternative designs of the same networks to operate on demand, with the precaution of adopting parameters and design conditions that make the comparison meaningful.

The design results of pressure irrigation networks operating in turn using GA-NLP once they are normalized lead to networks with a lower cost in up to 10.3% than the more efficient "classic" alternative method considered, a method where shifts are defined in heuristic ways. At the same time, these networks enjoy a higher IFCT in up to 8.5%. We observed a high variability of the cost differences between designs to the demand and to shifts in each Case Study, with savings in the design in turns with respect to the demand located between 4.5% and 48%. A possible additional application of the flexibility indicator (IFCT) has been pointed out as a criterion to help decide on the convenience of selecting a shift design or demand.



# RESUM

El disseny encertat de les xarxes pressuritzades de reg constitueix la fase preliminar d'una bona gestió d'aquests sistemes. La possibilitat que, en certes condicions, sigui avantatjós el disseny d'aquestes xarxes per a la seva explotació mitjançant reg a torns motiva aquest treball. El factor econòmic juga un paper fonamental en el disseny de les xarxes de pressuritzades de reg en general i en particular en la concepció d'aquelles pensades per operar a torns que és el camp d'aplicació que ens pertoca, en el qual s'han trobat molt poques investigacions precedents.

La primera etapa del treball desenvolupat ha consistit en la formulació i implementació completa d'un Algorisme Híbrid (AG-PNL) per al disseny òptim de xarxes de reg a pressió operant a torns amb topologia donada, per a això s'acobla un algorisme evolutiu, Algorisme genètic (AG), i un algorisme determinístic, basat en Programació No Lineal (PNL). Aquest Algorisme Híbrid permet assignar els torns als hidrants i els diàmetres a les conduccions, de manera que el cost del disseny resultant sigui mínim.

El problema de disseny econòmic de la xarxa es formula en termes d'una funció objectiu que minimitzi els costos associats a la xarxa de conduccions per a una assignació de torns donada, satisfent les restriccions i les lleis físiques que governen el funcionament del sistema. La funció objectiu s'avalua per un mètode explícit com el Algorisme de Programació No Lineal de Gradient Reduït Generalitzat (GRG). Les altres variables que l'Algorisme Híbrid determina són les assignacions de torns a cada hidrant que condueix al mínim cost de la xarxa. Per a això es recorre a l'ús d'un Algorisme Genètic on la funció objectiu que avalua el fitness de la població és precisament el cost mínim de la xarxa, calculat mitjançant l'algorisme PNL-GRG associat a cada individu en l'espai d'assignacions de torns.

A la segona part es validen els resultats de disseny de l'AG-PNL amb altres mètodes alternatius de disseny òptim en un conjunt de 9 Casos d'Estudi, extrets de projectes reals amb una àmplia diversitat de condicions operatives, topogràfiques, i dimensió. Paral·lelament s'analitza la capacitat de les xarxes dissenyades per a poder encaixar canvis posteriors en l'assignació de torns, caracteritzant aquesta flexibilitat amb un nou indicador, IFCT. Aquesta anàlisi també es realitza considerant dissenys alternatius de les mateixes xarxes per operar a la demanda, amb la precaució d'adoptar paràmetres i condicions de disseny que facin significativa la comparació.

Els resultats de disseny de les xarxes de reg a pressió operant a torns mitjançant el AG-PNL una vegada que es normalitzen condueixen a xarxes amb un cost

menor en fins 10.3% que el mètode alternatiu "clàssic" més eficient considerat, mètode on els torns es defineixen de formes heurística. Alhora aquestes xarxes gaudeixen d'un major IFCT en fins a 8.5%. Es va observar una elevada variabilitat de les diferències de costos entre dissenys a la demanda i als torns en cada cas d'estudi, amb uns estalvis en el disseny a torns que fa a la demanda situats entre el 4.5% i el 48%. S'ha assenyalat una possible aplicació addicional de l'indicador de flexibilitat (IFCT) com a criteri d'ajuda a la decisió sobre la conveniència de selecció d'un disseny a torns o la demanda.

## CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1.    PRESENTACIÓN .....	1
1.2.    OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	7
1.3.    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
1.4.    ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	10
<b>CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES.....</b>	<b>15</b>
2.1.    ALGORITMOS ANALÍTICOS .....	16
2.2.    ALGORITMOS EVOLUTIVOS .....	17
2.3.    DISEÑOS A TURNOS VS DEMANDA.....	19
2.4.    ALGORITMOS HÍBRIDOS .....	20
2.5.    INDICADORES DE SERVICIO.....	21
<b>CAPÍTULO 3: FUNDAMENTOS HIDRÁULICOS REDES DE RIEGO A PRESIÓN .....</b>	<b>27</b>
3.1.    INTRODUCCIÓN.....	27
3.2.    VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL RIEGO A LÁMINA LIBRE Y RIEGO PRESURIZADO	28
3.3.    SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADOS .....	30
3.3.1.    ECUACIONES FUNDAMENTALES.....	33
3.3.2.    REDES COLECTIVAS DE RIEGO A PRESIÓN (RCRP).....	35
3.3.3.    CAUDALES CIRCULANTES .....	37
3.3.4.    NECESIDADES HÍDRICAS, $N_H$ .....	38
3.3.5.    CAUDAL FICTICIO CONTINUO [ $Q_{fc}$ ] .....	38
3.3.6.    TIEMPOS CARACTERÍSTICOS.....	39
3.3.7.    CAUDALES DE DISEÑO EN OPERACIÓN A LA DEMANDA .....	41
3.3.7.1    PRIMER MODELO DE CLÉMENT .....	41
3.3.7.2    PROBABILIDAD DE APERTURA ( $pi$ ).....	42
3.3.8.    CAUDALES DE DISEÑO EN OPERACIÓN A TURNOS.....	44
3.3.9.    COMPARACIÓN DE DISEÑOS A LA DEMANDA VS. TURNOS .....	45
3.4.    PLANTEAMIENTO ESPECÍFICO DEL PROBLEMA .....	48
3.4.1.    RESTRICCIONES.....	49
3.4.2.    CONSIDERACIONES ECONÓMICAS EN EL DISEÑO DE REDES HIDRÁULICAS .....	50
3.4.2.1    TUBERÍAS .....	51

<b>CAPÍTULO 4 : MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN.....</b>	<b>53</b>
4.1.	INTRODUCCIÓN..... 53
4.2.	CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE DISEÑO ..... 54
4.2.1.	DISEÑO FUNCIONAL ..... 54
4.2.1.1	CRITERIO DE VELOCIDAD ..... 54
4.2.1.2	CRITERIO DE PENDIENTE HIDRÁULICA..... 55
4.2.2.	DISEÑO ECONÓMICO..... 57
4.3.	OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO ECONÓMICO..... 60
4.3.1.	OPTIMIZACIÓN ANALÍTICA..... 62
4.3.1.1	PROBLEMA DEL DISEÑO..... 64
4.3.2.	PROGRAMACIÓN LINEAL (PL)..... 66
4.3.3.	PROGRAMACIÓN NO LINEAL (PNL) ..... 68
4.3.4.	SERIE ECONÓMICA MEJORADA (SEM) ..... 80
4.3.5.	OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA ..... 90
4.3.6.	ALGORITMO GENÉTICO (AG) ..... 90
4.3.6.1	INDIVIDUOS ..... 92
4.3.6.2	TAMAÑO DE POBLACIÓN (N)..... 93
4.3.6.3	CRITERIOS DE TERMINACIÓN ..... 93
4.3.6.4	OPERADOR REPRODUCCIÓN (REPRODUCCIÓN/SELECCIÓN) ..... 93
4.3.6.5	OPERADOR CRUCE (CRUZAMIENTO) ..... 95
4.3.6.6	OPERADOR MUTACIÓN (MUTACIÓN)..... 97
4.4.	VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS DESCRITOS..... 99
4.4.1.	PROGRAMACIÓN LINEAL ..... 99
4.4.2.	PROGRAMACIÓN NO LINEAL Y MSE ..... 99
4.4.3.	ALGORITMO GENÉTICO AG..... 100
4.5.	CONCLUSIONES:..... 100
<b>CAPÍTULO 5 : FORMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL AG-PNL .....</b>	<b>103</b>
5.1.	INTRODUCCIÓN..... 103
5.2.	ARQUITECTURA Y FORMULACIÓN DEL ALGORITMO HÍBRIDO..... 104
5.2.1.	ARQUITECTURA DEL MODELO HÍBRIDO ..... 104
5.2.2.	FORMULACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO (AG) ..... 106
5.2.3.	FORMULACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO DEL AG (EVALUACIÓN FITNESS) .... 110
5.3.	IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO HÍBRIDO..... 117
5.3.1.	BLOQUE 1: INTRODUCCIÓN DE DATOS ..... 119

5.3.2.	BLOQUE 2: CONFIGURACIÓN DE LOS ALGORITMOS AG-PNL .....	119
5.3.3.	BLOQUE 3: EJECUCIÓN .....	119
5.4.	EJEMPLO DE IMPLEMENTACIÓN .....	120
5.4.1.	PRESENTACIÓN RED CARIYACU .....	120
5.4.2.	CARACTERÍSTICAS TOPOLÓGICAS DE LA RED.....	121
5.4.3.	RESULTADOS.....	124
5.4.3.1	BLOQUE 1 .....	124
5.4.3.2	BLOQUE 2 .....	127
5.4.3.3	BLOQUE 3 (EJECUCIÓN AG-PNL) .....	130
5.5.	NORMALIZACIÓN DE CONDUCTOS.....	132
<b>CAPÍTULO 6 : COMPARACIÓN CON MÉTODOS ALTERNATIVOS Y FLEXIBILIDAD .....</b>		<b>135</b>
6.1.	INTRODUCCIÓN.....	135
6.2.	BÚSQUEDA Y SELECCIÓN DE CASOS DE ESTUDIO .....	136
6.3.	CASOS DE ESTUDIO SELECCIONADOS.....	141
6.3.1.	RED CALLÉN INFERIOR .....	141
6.3.2.	RED TUNCARTA .....	144
6.3.3.	RED CARIYACU .....	146
6.3.4.	RED VALCUERNA.....	148
6.3.5.	RED CENICERO .....	150
6.3.6.	RED MOLINAR I.....	152
6.3.7.	RED NAVARRA.....	154
6.3.8.	RED CALLÉN SUPERIOR .....	156
6.3.9.	RED SAN RAFAEL.....	158
6.4.	CRITERIOS DE DISEÑO .....	160
6.5.	AJUSTE DE PARÁMETROS DEL AG .....	162
6.6.	ÍNDICE DE FLEXIBILIDAD .....	166
6.7.	INDICADOR DE FLEXIBILIDAD EN PRESIONES EN RCRP .....	166
6.8.	ESCENARIOS PROPUESTOS.....	168
6.8.1.	NÚMERO DE ESCENARIOS ALEATORIOS ( $N_T$ ).....	169
6.9.	MÉTODOS ALTERNATIVOS DE COMPARACIÓN .....	172
<b>CAPÍTULO 7 : RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>		<b>179</b>
7.1.	INTRODUCCIÓN.....	179

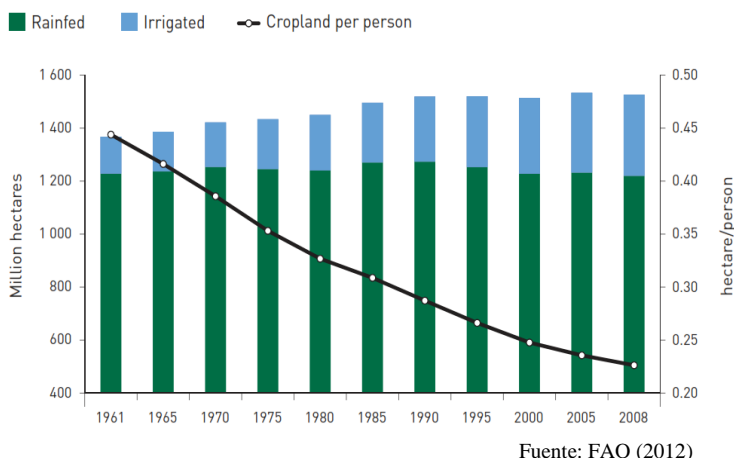
7.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE COSTOS CON MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN .....	180
7.3.	ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES Y COSTOS DE DIÁMETROS .....	184
7.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE IFCT Y COSTO CON MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN	196
<b>CAPÍTULO 8 : CONCLUSIONES.....</b>		<b>207</b>
8.1.	PRESENTACIÓN .....	207
8.2.	APORTACIONES.....	208
8.2.1.	ALGORITMO HÍBRIDO AG-PNL. ....	208
8.2.2.	CARACTERIZACIÓN DE LA FLEXIBILIDAD DE LAS REDES A TURNOS.....	210
8.2.3.	COMPARACIÓN DE LAS PRESTACIONES DEL ALGORITMO HÍBRIDO AG-PNL. ...	210
8.2.4.	SISTEMAS A TURNOS VS SISTEMAS A LA DEMANDA.....	213
8.3.	TRABAJOS FUTUROS.....	215
8.3.1.	DESARROLLOS RELACIONADOS CON EL DISEÑO DE LA RED .....	215
8.3.2.	DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA FLEXIBILIDAD / FIABILIDAD:.....	216
<b>CAPÍTULO 9 : BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>217</b>
<b>CAPÍTULO 10 : INDICADORES DE CALIDAD .....</b>		<b>233</b>
ANEXOS .....		235
A)	EJEMPLO DE IMPLEMENTACIÓN CALLÉN INFERIOR .....	236
B)	EJEMPLO DE IMPLEMENTACIÓN TUNCARTA.....	250
C)	EJEMPLO DE IMPLEMENTACIÓN CARIYACU.....	264
D)	EJEMPLO DE IMPLEMENTACIÓN VALCUERNA .....	274
E)	EJEMPLO DE IMPLEMENTACIÓN CENICERO.....	289
F)	EJEMPLO DE IMPLEMENTACIÓN MOLINAR I .....	303
G)	EJEMPLO DE IMPLEMENTACIÓN NAVARRA .....	336
H)	EJEMPLO DE IMPLEMENTACIÓN CALLÉN SUPERIOR .....	380
I)	EJEMPLO DE IMPLEMENTACIÓN SAN RAFAEL.....	391
ÍNDICES .....		413
ÍNDICE DE FIGURAS .....		413
ÍNDICE DE TABLAS .....		416
ÍNDICE DE ECUACIONES.....		419

# Capítulo 1 : Introducción

## 1.1. Presentación

Si se cumplen las previsiones de la FAO la población actual de la Tierra, 7000 millones de personas aproximadamente aumentará a unos 9000 millones en 2050, lo que significaría que la agricultura tendría que producir un 60% más de alimentos a nivel mundial, y un 100% en los países en desarrollo (Alexandratos y Bruinsma, 2012). En este entorno es imperativo garantizar la seguridad alimentaria y hacerla compatible con un crecimiento agrícola sostenible. Este crecimiento implica que la agricultura se mantenga como sustrato del desarrollo económico, y que a la vez permita disminuir los índices de pobreza (FAO, 2012). En los últimos 50 años la superficie cultivada en el mundo ha crecido sólo un 12%, como se observa en la Figura 1.1, mientras la superficie con riego se ha duplicado durante este tiempo, lo que ha implicado un notable incremento de su productividad. No obstante, la distribución de los recursos de tierras y agua no favorecen por igual a todos los países. Los países que poseen bajos ingresos disponen de menos recursos para adoptar prácticas de riego, y deberán vigilar que

el desarrollo del regadío se realice mediante la adopción de prácticas sostenibles. Estas prácticas se refieren a la ordenación de tierra, extracción de agua evitando la sobreexplotación de los sistemas superficiales y subterráneos, e impedir la contaminación difusa. Para ello la incorporación de la tecnología más adecuada bajo la dirección de una buena gobernanza resulta una pieza clave (FAO, 2012).



Fuente: FAO (2012)

**Figura 1.1. Evolución de la tierra bajo cultivos de regadío y de secano**

Con miras a afrontar estos desafíos, los sistemas tecnificados de riego posibilitan una mayor eficacia en la distribución y aplicación del agua al usar sistemas a presión, y son la única alternativa posible en zonas de sierra con grandes desniveles y pendientes.

El diseño, la gestión y la operación óptimos de estos sistemas es de singular importancia para el uso racional del agua, el desarrollo económico de la agricultura y la sostenibilidad ambiental (Holzapfel et al., 2009). El avance de los sistemas de riego tecnificados facilita su gestión efectiva. Uno de los parámetros de decisión para la implementación de éstos, constituye el aspecto económico relacionado con la inversión requerida. En este sentido el empleo de Redes Colectivas de Riego a Presión (RCRP) para la distribución de agua desde ciertas fuentes hasta las parcelas en nuevos regadíos como en la modernización de los existentes, es de especial interés en el sector de la agricultura. Esto facilita promover rendimientos altos en las explotaciones haciendo compatibles los



---

costos de inversión y de operación; así como la mitigación de aspectos ambientales y sociales (Zapata et al., 2007).

La mayoría de los sistemas de riego tradicionales tienen un rendimiento de aplicación, entendido como el volumen utilizado por la actividad de la planta respecto al servido a la parcela, relativamente pequeño, entre el 50 al 70%. Si bien el agua que se suministra a la parcela que el cultivo no aprovecha, no es en sí una pérdida a nivel de cuenca hidrológica, dado que ésta acaba en percolación y escorrentías que devuelve el agua a la cuenca hidrológica. Actualmente se busca reducir estas escorrentías que son causas de la contaminación difusa, habitualmente para mantener dichos volúmenes disponibles aguas arriba del sector de riego.

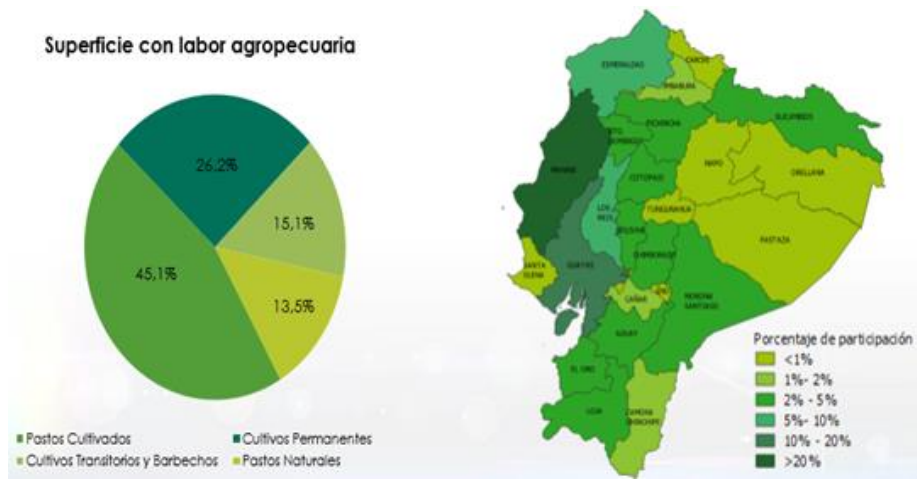
Los volúmenes que se disponen se destinan al mantenimiento de la salud de los ríos, o asignándolos a otros usos. Considerando este factor asociado a su ineficiente gestión, produce pérdidas respecto a la eficiencia en el uso de recursos y rentabilidad económica.

Si se vincula la mejora de la gestión de los sistemas de riego, la inversión en tecnología adecuada, el desarrollo de los conocimientos y la formación; es posible mejorar la eficiencia en el aprovechamiento del agua e incrementar la oferta en poblaciones vulnerables.

También es necesaria la intervención de las diversas partes interesadas que busquen un desarrollo que se refleje el enfoque participativo. De esta manera se logra empoderar a los agricultores que constituyen los actores fundamentales en la participación, planificación y toma de decisiones.

En la mayoría de países la financiación de las infraestructuras hídricas procede de los gobiernos. Aunque en aquellos, en vías de desarrollo se requieren todavía de las ayudas externas para financiar la gestión de los recursos hídricos y los servicios públicos (FAO, 2012).

En el caso de Ecuador, el país ha vivido un histórico problema estructural en el agro, cuya característica central es la significativa concentración en pocas manos de los recursos productivos. Este fenómeno se ha dado en especial en la tierra y el agua lo que ocasionó una gran cantidad de familias productoras con inmensas limitaciones de acceso a estos recursos. El efecto de esta problemática tiene que ver con un desarrollo desigual de la agricultura en el país. En la Figura 1.2 se ve reflejado este aspecto.



Fuente: INEC – ESPAC (2018)

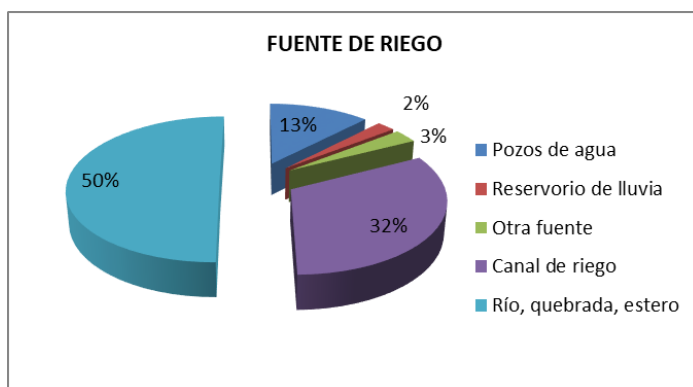
**Figura 1.2. Superficie y Producción Agropecuaria**

En la Tabla 1.1 se realiza una síntesis de los problemas detectados en la gestión del riego en el país, que no permiten que las labores de riego y su gestión sea exitosa.

Tabla 1.1. Síntesis de problemáticas detectadas en la gestión del riego

Socio-organizativos	Físico-Técnicos	Ambientales	Económico-productivos
Debilidades organizativas para la gestión integral del riego.	Deterioro de la infraestructura, infraestructura inconclusa, falta de mantenimiento.	Pérdida de caudales	Inversión pública limitada para la gestión de los sistemas de riego
Inexistencia o falta de actualización de herramientas de gestión: estatutos, reglamentos, tarifas, padrones de usuarios, catastros	Limitada infraestructura de drenaje en el Litoral y carencia de la misma en la Amazonía	Falta de protección de fuentes de agua.	Carencia de coordinación entre entidades del sector para acceder a otros servicios para la producción.
Tarifas bajas, insuficiente nivel de recaudación	Carencia de obras de almacenamiento y regulación de caudales	Contaminación de agua usada para riego, originada por diversos factores.	
Conflictos en y entre sistemas de riego	Carencia de tecnificación e innovación en el riego	Avance de frontera agrícola	
Falta legalizar los derechos de agua (Costa)		Deterioro de suelos derivados de aplicación de riego	

Otra particularidad que se encuentra en los sistemas de riego es que en su mayoría se encuentran funcionando con flujo a superficie libre (ver Figura 1.3), y aquí se debe considerar que los canales de aducción, conducción y redes terciarias en la mayoría son construidos en tierra y sólo las partes más críticas son revestidas en forma parcial. Adicionalmente existe el problema de anomalías en su construcción, dando como resultado canales amplios y planos o profundos y estrechos. Otra situación que se deberá considerar es que en la región Sierra del país la mayoría de sistemas tienen pendiente y sección transversal muy variable.



Fuente: III CNA, CESA (2011)

**Figura 1.3. Distribución de fuentes para riego en Ecuador**

La implementación de sistemas de distribución de agua para riego mediante RCRP permite que el agua esté siempre presente y presurizada en la toma que da acceso a la parcela. Característica, que en los sistemas tradicionales de transporte en lámina libre es imposible. Esto posibilita la introducción de una organización del riego, denominada “a la demanda” en donde el agricultor puede disponer de agua en cualquier momento, con total libertad, y sin aviso previo a los gestores. El riego a la demanda está limitado por un máximo caudal a extraer instantáneamente, constituyendo la dotación de caudal (Espinosa B., Flores M., Ascencio G. y Carrillo F., 2016). Ello implica que el caudal total demandado en las conducciones será muy variable, y alcanzará ciertas puntas que la red debe poder encajar. Esta modalidad de operación permite una gran flexibilidad en la explotación y en los cultivos adoptados y la más frecuente en muchos países como España, Italia, Francia, Portugal. No obstante, los caudales circulantes por las conducciones alcanzan valores punta que se traducen en un costo más elevado que otras alternativas, y en la necesidad de elementos de control para su operación y gestión correcta.

Sin embargo, en las RCRP se encuentran también sistemas de explotación en donde los usuarios disponen de un caudal asignado a la toma de riego en un horario fijo que se determina anticipadamente, denominado a turnos. Esta modalidad heredada de los sistemas en lámina libre, es una práctica que se encuentra en muchas comunidades agrarias debido a su simplicidad de gestión y

presumible mayor economía (Alduán y Monserrat, 2009). Este tipo de operación se localiza especialmente en explotaciones de pequeña entidad, con alta dispersión de tomas e irregularidad de parcelas y cotas (García, 2013). El menor costo de las RCRP operando a turnos está condicionado a que la configuración de turnos sea adecuada. Por ejemplo, se aleje del esquema de asignar de forma mimética a los sistemas en lámina libre el mismo turno a todas las tomas de un ramal. Por otra parte, la formulación de los propios turnos en el diseño de las RCRP operando a turnos admite múltiples variantes. Una vez que se fijan los turnos y se materializa el diseño de la RCRP el sistema obtenido puede resultar rígido para encajar cambios de turnos posteriores.

## **1.2. Objetivos de la Investigación**

La investigación pretende dar respuesta a ciertas interrogantes que surgen luego de analizar la problemática: ¿Existe algún algoritmo de optimización que permita obtener un diseño económico para una red de riego a presión con explotación a turnos?, ¿Cuál es la modalidad de explotación del riego más adecuada para el diseño de una red de riego?, ¿el sistema implementado es suficientemente flexible a la hora de explotar la red, debido a modificaciones de dotación, o reasignación de la franja horaria para aplicar el riego? ¿Qué es más conveniente para la comunidad de regantes?, ¿Existe algún indicador que señale la conveniencia de un diseño a turnos o a la demanda? ¿El sistema diseñado cumple con las características hidráulicas solicitadas? ¿Cuál es el mejor método de optimización para el diseño de estas redes?

Para dar respuesta a estas incógnitas se desarrolla este trabajo de investigación. Para lo cual, se implementó una secuencia cuyo eje central fue la formulación e implementación de un Algoritmo Híbrido para el diseño óptimo de RCRP para su explotación a turnos.

Paralelamente se estudió la influencia en el costo y la flexibilidad de los diseños resultantes y los criterios que deben considerarse a la hora de elegir una operación a turnos frente a la operación a la demanda.

## **1.3. Planteamiento del problema**

El componente económico será el criterio fundamental en el dimensionado de las redes en general (riego o abastecimiento). Un sistema hidráulico debe cumplir

con un conjunto de condiciones de funcionamiento que admita llegar con la demanda adecuada y en condiciones suficientes de presión. Sin embargo, existirán un número ilimitado de soluciones que resulten técnicamente válidas. En este caso el costo de las diversas soluciones será la característica que a la final identificará la “mejor” solución.

En redes de riego por lo general se opta por redes de topología ramificada. Concretamente cuando se trata del dimensionado óptimo de estas redes que tienen como características principales, una gran dispersión espacial de los puntos de consumo y elevado caudal demandado en los mismos, diversidad de presiones de consigna en hidrantes que se definen en función de los tipos de emisores a usar. Otra característica importante de las redes de riego será su forma de explotación y viene determinada por la modalidad de operación sea a turnos o a la demanda (Pérez, 1993). Por lo tanto, el aspecto económico resulta de gran importancia debido a la cuantiosa inversión que se realizará para poner en marcha estos sistemas hidráulicos, siendo necesarias implementar metodologías de optimización.

Se revisarán en esencia procedimientos de optimización para RCRP operando a turnos. En este tipo de problemas se cuentan con variables de decisión como el tamaño de tuberías y la asignación de turnos a las tomas de riego (hidrantes) que definirán los caudales de cabecera en cada turno, pérdidas de carga, etc. Si el sistema se dimensiona en forma óptima para unos turnos específicos se obtendrá un resultado de costo total de la red que corresponderá a este caso particular.

El diseño óptimo de redes de riego presurizadas con la modalidad a turnos se ha venido desarrollando mediante la asignación de turnos en forma heurística a los hidrantes. Una vez realizada esta asignación se ha usado algún método de optimización que permita encontrar el dimensionado de las conducciones de la red con los caudales respectivos. En ocasiones se ha optado por asignar como caudales de diseño en las conducciones el mayor caudal del turno, resultando un sobre costo de diseño de la red. Situación que lleva a revisar la influencia de los métodos de dimensionado de la red y su repercusión en los resultados. Con ello es posible contestar la interrogante de ¿cómo asignar los turnos en forma óptima? ¿qué repercusiones tiene la asignación de turnos en la flexibilidad y en el costo de la red? Para descifrar estas interrogantes se ha hecho hincapié en los procedimientos híbridos, que usan dos o más métodos de optimización para

---

resolver problemas de este tipo aprovechando las funcionalidades de las partes que lo componen.

En redes de riego ramificadas que tienen como nudo de cabecera un punto de alimentación, con los turnos asignados se conocen los caudales circulantes por todas las conducciones. El problema de diseño económico de la red se formula en términos de una función objetivo que contempla los costos asociados al sistema, las restricciones que representan las leyes físicas que gobiernan el funcionamiento del sistema. La función objetivo que se encuentra en este caso es posible resolverla por métodos explícitos o directos como la Serie Económica, Programación No Lineal (PNL), Programación Lineal (PL), método de Labye que no requieren de iteraciones genéticas puesto que en este caso existen soluciones analíticas.

Cuando la asignación del turno es una variable a determinar, el problema a resolver se identifica como una función no convexa, con soluciones que se encuentran localizados en varios óptimos locales. Se hace conveniente la aproximación al valor de la función objetivo a través del uso de Algoritmos Genéticos. Estos algoritmos forman parte de las técnicas de optimización evolutiva que, aunque no obtienen la solución global, sí consiguen mejorar una solución inicial mediante aproximaciones.

Se buscan resultados de diseño efectivos y robustos que encuentren soluciones optimizadas en tiempos razonables a pesar de contar con un elevado número de variables de decisión. Estas variables se manejarán en forma efectiva usando dos tipos de optimización para el diseño explícito (diámetro de tuberías) y el diseño evolutivo (asignación de turno); dando lugar al método híbrido que se enunció previamente de forma tentativa, y que este trabajo ha desarrollado y explotado de forma plena.

Se abordará de modo indirecto la importancia de la elección del turno, y cómo de significativa es la elección del algoritmo de optimización. ¿Qué influye más? Se presume que usando el algoritmo genético para elegir el turno que corresponde al hidrante, es posible trabajar conjuntamente con diversos algoritmos de dimensionado de la red de tipo explícito. Se empleó un conjunto de redes con diversidad de presión de consigna, cotas, dimensión, variables agronómicas, sociales, económicas, regional, etc. para que las conclusiones sean representativas.

Si es factible diseñar redes a turnos o a la demanda cabe preguntar qué modalidad será la más adecuada en cada contexto. Como respuesta a estas preguntas, se procede a comparar los costos a los que ascienden los diseños a la demanda con respecto a los costos de los diseños a turnos empleando diversos casos de diseño y de algoritmos de optimización. En la mayoría de los casos el diseño a la demanda suele ser más costoso que los diseños a turnos. Aunque se supone que si los turnos están mal asignados el costo de diseño puede ser más caro que para el caso de redes a la demanda. Se pretende comprobar estas suposiciones y los factores que influirán al respecto.

Para ello, cabe adoptar criterios o métodos para discriminar cómo de restrictivo puede ser el diseño a turnos, y de esta manera elegir la opción más conveniente para el diseño. Se considera que una limitación del sistema operando a turnos es que tiende a ser más rígido; ya que está ajustado para unas demandas concretas para lo cual los diámetros se han aquilatado. En tal razón su diseño será económico pero el efecto de la rigidez del sistema supone una dificultad para la explotación futura. Si en lo posterior existen cambios en la red sea de propietario, cultivo, etc. ¿qué sucederá...? Si el sistema se encuentra muy constreñido no será posible modificarlo; es aquí, en donde se introducirá el término flexibilidad a los cambios del sistema.

Parece razonable conjeturar que cuánto más costoso es el diseño de la red por usar mayores diámetros, ésta será más flexible. Sin embargo, esta correlación puede no ser siempre cierta, por lo que se estudiará cómo incide el criterio de flexibilidad en el costo del sistema. Se discernirán los criterios para determinar cuando el sobre costo que supone la red funcionamiento a la demanda supone una compensación con el incremento de la flexibilidad. Se analizará si esta premisa es sistemático o no.

#### **1.4. Estructura de la tesis**

Para el desarrollo de la investigación se organizó su contenido en 10 capítulos que se describen.

En el capítulo actual (**Capítulo 1**), se intenta presentar a modo preliminar las ideas que sustentan el interés del trabajo y sus objetivos. Adicionalmente, en este capítulo se exponen los aspectos abordados resaltando la importancia de éstos en



---

el contexto de las redes de riego. Se especifica la estructura del documento en el trabajo que se presenta.

**Capítulo 2**, en este apartado se revisa el estado del diseño óptimo de sistemas de riego con algoritmos analíticos y evolutivos, la combinación de los mismos para lograr los objetivos de diseño de estas redes. Se realiza una síntesis y análisis de las investigaciones que consideran la flexibilidad como criterio importante para actuar en los diferentes escenarios que correspondan a la hora de realizar la gestión de las redes de riego.

**Capítulo 3**, en este capítulo se inicia con una descripción básica de las ventajas e inconvenientes del riego a presión. Se definen las redes colectivas de riego a presión (RCRP) y sus partes constituyentes. Se enuncian las ecuaciones que modelan la circulación del flujo en las redes de riego operando a la demanda como a turnos y se comparan ambos tipos de explotación.

**Capítulo 4**, en esta sección se realiza una revisión de las técnicas de optimización orientadas a la resolución de los problemas propuestos en el capítulo 1. Se enuncian las partes que integran un problema de optimización y su aplicación. Se realiza la descripción y resumen de las ventajas e inconvenientes de los métodos de optimización que se han empleado en este trabajo de investigación. Se describe además el planteamiento general del problema que se pretende resolver.

**Capítulo 5**, como una parte fundamental de este capítulo se realiza una descripción detallada de la formulación, implementación y arquitectura del Algoritmo Híbrido. Se describe la metodología que se empleará para implementarlo. A través de un ejemplo se muestran los resultados obtenidos luego de aplicar la metodología señalada.

**Capítulo 6**, en este capítulo se desarrolla un procedimiento sistemático que tiene como finalidad validar la correcta implementación del algoritmo híbrido AG-PNL propuesto e investigar las prestaciones que suministra usando una batería de redes de riego. Mediante estos mismos casos de estudio se procede a ajustar los parámetros que influyen en los resultados del AG y en la definición del Índice de Flexibilidad.

**Capítulo 7**, en este apartado se muestran los resultados obtenidos y su análisis una vez implementado el algoritmo AG-PNL, su aplicación en casos de estudio y la comparación con otros métodos alternativos de optimización utilizando la metodología descrita en el capítulo anterior.

**Capítulo 8**, en este capítulo se evidencian las conclusiones y aportes de la presente investigación. De esta manera será posible evaluar bajo qué condiciones las diversas variantes de diseño a turnos y de diseño a la demanda conviene ser adoptadas, en función de ratios y umbrales que permitan tomar decisiones racionales. Así como determinar cuál es el nivel de flexibilidad máximo obtenible para un determinado presupuesto.

**Capítulo 9**, se realiza el inventario del material bibliográfico empleado en este trabajo.

**Capítulo 10**, se ajunta la evidencia de documentación que acredita la importancia y alcance de la investigación desarrollada.

La organización de los capítulos se presenta en la Figura 1.4

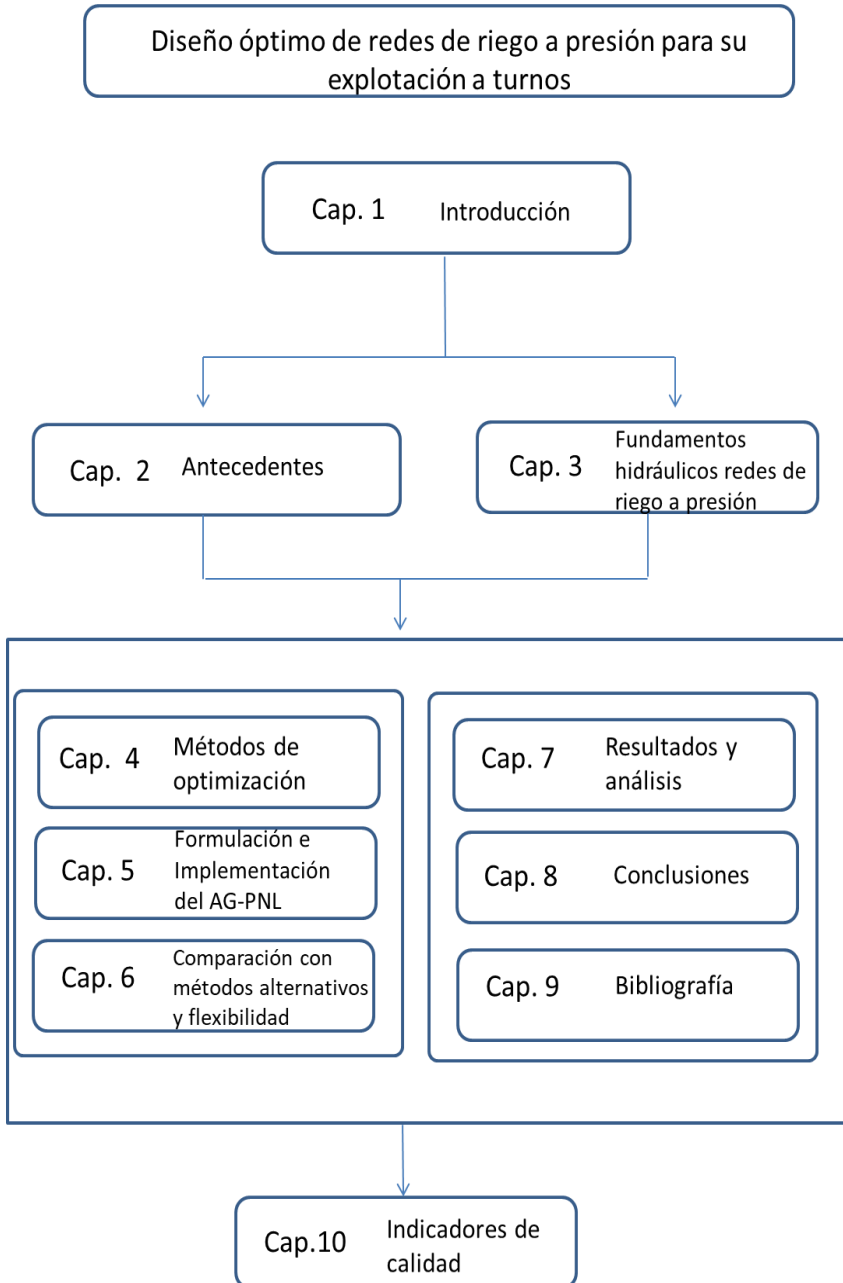


Figura 1.4. Esquema general de los capítulos



# Capítulo 2 : Antecedentes

En los últimos 25 años, se han desarrollado innovaciones en diversas técnicas de optimización para resolver problemas de diseño y gestión de sistemas de redes presurizadas. Se han implementado métodos de diseño y algoritmos de control óptimo con el objeto de facilitar la operación de los sistemas complejos de distribución de agua (Alperovits y Shamir, 1977; Su et al., 1987; Lansey y Mays, 1989; Walters y Smith, 1995). Pérez (1993) centró su investigación en el dimensionado económico de las redes de distribución de agua contemplando tanto la caracterización de las propias tuberías como de los elementos de regulación. Prasad y Park (2004) estudiaron diversos algoritmos orientados hacia el adecuado funcionamiento de bombas y determinación del menor costo. Todos ellos, usaron herramientas de optimización Lineales y No Lineales y programación dinámica, técnicas heurísticas y Algoritmos Genéticos (AG).

## **2.1. Algoritmos Analíticos**

En la optimización de redes de distribución de agua potable y de redes de recolección de aguas residuales se han formulado funciones y limitaciones de costos, con metodologías avanzadas de optimización tales como Programación Lineal, Programación No Lineal, Programación Dinámica, Algoritmos evolutivos, entre otros (Zhao et al., 2016). En el caso del diseño de redes de abastecimiento y riego operando con la modalidad a la demanda, se han definido métodos que se fundamentan en algoritmos de tipo analítico. En este ámbito, se usaron diámetros discretos para el diseño óptimo de una red, seleccionando los diámetros de las tuberías con incremento del gradiente de presión por unidad de costo máximo para cumplir todos los requisitos de presión (Labye, 1966). También se encuentra la técnica de Programación Lineal (PL) que ha sido explorada extensamente y se verifica en los trabajos de (Karmeli et al., 1968; Calhoun, 1970; Robinson y Austin, 1976; Blave, 1979; Pleban y Amir, 1981; Martínez et al., 1987). En donde, cada línea de la red estaba constituida por varios tramos de diferente diámetro.

Gomes (1994) propone un método de optimización del diseño de una red de riego en dos etapas. En una primera etapa determina una solución para la red de riego para posteriormente ir mejorando iterativamente dicha solución utilizando métodos de PNL. Este método de diseño se basa a su vez en el método conocido como Método Granados (Granados, 1986). El criterio utilizado para la mejora de la red se fundamenta en el cociente entre el costo asociado a incrementar una tubería a su diámetro comercial inmediatamente superior, y la mejora obtenida en términos de pérdida de carga y de presiones disponibles.

Otra técnica que se incluye es el Método de la Serie Económica (MSE), basado en el método de los Multiplicadores de Lagrange. Este método considera el diámetro de las tuberías como una variable de tipo continuo, siendo necesaria la normalización de diámetros posterior al proceso de optimización (Munizaga, 1976). Planells et al., 2007 se apoyaron en este método, para definir una metodología de diseño de una red de riego ramificada, incluyendo la definición de su trazado operando a la demanda.

Dentro del ámbito de los sistemas de riego presurizados, Planells et al. (2001) definieron las curvas de consigna máximas y mínimas de un sistema de riego

funcionando a la demanda y con bombeo, para evaluar el costo energético durante una campaña de riego usando programación No Lineal Entera. González y Aliod (2003) mejoraron el Método de la Serie Económica (MSE-M), para incorporar diferentes materiales y timbrajes de tuberías en una misma red. Theocharis et al. (2006), formularon un dimensionado de redes a la demanda con la técnica de Programación No Lineal (PNL) simplificada con ecuaciones lineales independientes para el diseño de tuberías. Kale et al. (2008) propusieron un modelo de PL para el diseño óptimo de tuberías laterales de un sistema de riego en parcela. Para lo cual, la función objetivo redujo al mínimo el costo fijo anual de las redes de la subunidad de riego, y el costo anual de energía de funcionamiento.

Lamaddalena et al. (2012) proporcionan una metodología para valorar la variabilidad de la presión en las tomas de los sistemas de riego a presión operando a la demanda. En este trabajo combinaron la minimización de los costos, usando el método iterativo discontinuo de Labye, con el análisis de la respuesta de la red ante diferentes escenarios. Otra modalidad con la que es posible realizar las labores de riego es la operación a turnos, García et al. (2013) implementan la optimización de diseño a turnos tanto para conducciones principales de parcela que alimentan sectores, como para conducciones de redes de distribución colectivas apoyándose en el Método de la Serie Económica Mejorada (MSE-M). Con el objeto de ampliar el espectro de métodos de diseño posibles, se ha realizado también una revisión bibliográfica de trabajos de investigación relacionados con el diseño hidráulico del riego en parcela y los métodos de optimización utilizados a este nivel. Poniendo énfasis en los sistemas de riego presurizados que operan a la demanda se encontró que en Hassanli y Dandy (2005), se diseñan sistemas de tuberías operando a turnos para alimentar los sectores de riego. Daccache et al. (2010) definen una metodología usando el método de Labye para combinar el diseño y el análisis del rendimiento de emisores en la red a presión bajo demanda.

## **2.2. Algoritmos Evolutivos**

En la mayoría de las referencias citadas, los algoritmos empleados proceden a una solución óptima para el diseño de la red a través de un número definido de procesos analíticos. Sin embargo, existen otros métodos, de tipo evolutivo, que

han aparecido debido a la necesidad de abordar problemas de optimización de gran complejidad en el campo de las ingenierías. Su origen se inspira en la naturaleza y se fundamenta en emular los procesos de evolución y de comportamiento de cohortes de seres vivos. Con estos métodos también se han logrado avances significativos que se han aplicado con profusión, desde su origen, a múltiples problemas de diseño y gestión de redes de distribución hidráulicas. Las técnicas de tipo evolutivo exploran y seleccionan las soluciones mejor adaptadas entre un universo de posibles resultados en un tiempo determinado. Un ejemplo de este tipo de algoritmo son los Algoritmos Genéticos (AG) que representan el problema a resolver a través de cadenas binarias, y la solución queda definida por las transformaciones que sufren las cadenas en los procesos de cruce, reproducción y mutación (Holland, 1975).

En el caso de diseño óptimo de redes de distribución, los AG trabajan con diámetros discretos para las tuberías. Si el conjunto de diámetros utilizado está disponible comercialmente, la solución que se obtiene puede considerarse como solución definitiva de proyecto, pues no necesitará normalización de diámetros posterior para ser implementada. Este tipo de algoritmo evolutivo se empleó en la resolución de problemas de rehabilitación, gestión y minimización de costos energéticos en redes de distribución. Afshar et al. (2005) desarrollaron una optimización simultánea de trazado y diámetros de redes hidráulicas por medio de algoritmos evolutivos PSO (Particle Swarm Optimization) de optimización de enjambre de partículas. Este algoritmo implementado por Kennedy y Eberhart en el año 1995, resuelve los problemas de optimización con un enfoque multiobjetivo. Se fundamenta en el comportamiento social de un conjunto de pájaros y lo simula mientras vuelan, considera variables discretas e introduce diversidad en la población (Montalvo, 2010). Cisty (2009) planteó una metodología para el uso de AG en el diseño óptimo del proceso de rehabilitación de redes de abastecimiento.

Se localizan algunos trabajos en el campo de las redes de riego a presión en donde se usaron Algoritmos Genéticos. Hassanli y Dandy (1996) determinaron el tamaño óptimo y la disposición de las tuberías de una subunidad de riego. Para ello, calcularon los requerimientos de riego de las subunidades a partir de las características del suelo y del cultivo. Wang y Xu (2010) desarrollaron un modelo basado en AG que optimizó el diseño de las tuberías secundarias y terciarias de una subunidad de un sistema de riego por aspersión y por goteo.



Otro enfoque que se implementó es el estudio comparativo de las técnicas de optimización para la planificación de sistemas de riego para la programación de riego en fincas (Kuo et al., 2003). Con lo cual, logran optimizar la rentabilidad económica, simular la demanda de agua y evaluar los porcentajes de las áreas de cultivos con restricciones.

Por su parte, Farmani et al. (2007) utilizaron un AG para optimizar simultáneamente la asignación de turnos y el dimensionado de las conducciones de una red de riego a turnos. El rendimiento del AG se evalúa con respecto a algoritmos de optimización tradicionales como la PL. Se comparan los resultados obtenidos con los encontrados mediante PL, con los correspondientes a un diseño a la demanda. Este trabajo constituye el precedente más directo de la temática abordada en esta tesis.

Para los casos de sistemas de riego con bombeo, Moradi-Jalal and Karney (2008) expusieron un modelo para el control óptimo y operación de una estación de bombeo de un sistema de riego empleando Multiplicadores de Lagrange (ML) y AG, usando una función objetivo en donde se incluyeron los costos operativos y de inversión sujetos a diversas prestaciones y limitaciones hidráulicas. Finalmente, Li et al. (2009) y Kulkarni y Patil (2011) propusieron un método de optimización simultánea del trazado y diámetros de diseño de redes de riego ramificadas a la demanda mediante AG.

### **2.3. Diseños a Turnos vs Demanda**

Como se deduce de la revisión efectuada, para los sistemas operando a la demanda existe en la literatura un número significativo de trabajos con propuestas de diferentes algoritmos de optimización para el diseño de RCRP. También es muy abundante la bibliografía disponible para los casos de diseño óptimo de redes de distribución de agua potable. Sin embargo, en el caso de sistemas de riego a turnos, éstos son mucho más escasos. Esta escasez de trabajos es aún más notoria en los casos en los que, como en el presente trabajo, el objetivo esencial es la investigación de nuevos algoritmos de optimización de redes a turnos en que, además de los diámetros de las conducciones, la propia definición de los turnos óptimos sea un objetivo de la propia optimización.

Un problema también estudiado en el diseño de redes de riego es el del tipo de organización del riego. Así, en Monserrat et al. (2012) estudian y se plantean

determinar cuál es el mejor sistema de organización del riego. El riego a turnos ofrece reducciones en el costo del diseño, pero limita la flexibilidad del mismo. Lara (2007) presenta un modelo de optimización de los turnos de riego en el cual se busca no solo uniformizar los caudales en las líneas entre los distintos turnos sino también ponderarlos a través de lo que el autor define como Factor Energético.

En una línea similar, Farmani, Abadia y Savic (2007) (los cuales ya han sido oportunamente citados) utilizan exclusivamente un Algoritmo Genético para la asignación tanto de turnos como de diámetros de las conducciones, lo que aumenta la dimensión de las variables de decisión, y consecuentemente el tiempo de cálculo. Contemplan la instalación de tuberías de diferentes Presiones Nominales. Los autores presentan un único caso de estudio de red para la validación del procedimiento de diseño óptimo de turnos y diámetros. Comparan los resultados obtenidos para esa única red, con los obtenidos para la misma red diseñada alternativamente con riego a la demanda mediante un método de tipo Programación Lineal.

Cabe destacar que Farmani, Abadia y Savic (2007) señalan que los turnos encontrados por la optimización no responden a criterios de equivalencia de caudales en cada ramal para todos los turnos, los cuales se utilizan habitualmente en la formulación de turnos heurísticos. Son ejemplo de esto último los trabajos realizados por Alduán y Monserrat (2009); García et al. (2011); Monserrat et al. (2012); o Espinosa et al. (2016).

## **2.4. Algoritmos Híbridos**

Dado que en el caso de redes ramificadas la determinación de diámetros óptimos, para una asignación de turnos dada, tiene una solución analítica, no es preciso utilizar algoritmos de optimización evolutivos, que aumentan enormemente la dimensionalidad del problema. En este trabajo se muestra que es posible evitar la complejidad del AG limitándolo solo a búsqueda de turnos, mientras que el dimensionado de la red se desarrolla con un proceso analítico, lo que justifica el empleo de métodos híbridos eficaces.

Se mencionan algunos antecedentes de investigaciones que han recurrido a optimización híbrida, incluyendo aquellas técnicas de optimización que combinan PNL y AG, con diferentes propósitos. Pérez et al., 2008 obtienen un

diseño económico en redes automatizadas con programadores. Ya se ha citado el trabajo de (Moradi-Jalal y Karney, 2008) para lograr el funcionamiento del control óptimo de una estación de bombeo en un sistema de riego, en donde se emplearon las técnicas de PNL y Multiplicadores de Lagrange (ML). Con la técnica de ML se definieron los costos anuales de energía y las bombas de mínimo costo, y con la técnica de AG se seleccionó el menor costo total anual de la estación de bombeo y su funcionamiento. Lara, 2007 formula un modelo de diseño óptimo de redes colectivas de riego, considerando varios estados de carga para generar turnos en sistemas de riego y en la modalidad de riego a la demanda basados en criterios de probabilidad. En esta formulación se hibridó la programación de turnos en el proceso de diseño de la red colectiva de riego, empleando AG y PL.

En el ámbito de la gestión de las redes de riego a presión, se implementó una herramienta para el uso racional del agua con soporte de un sistema GIS (Geographical Information System). Esta herramienta evaluó escenarios de gestión, incorporando mecanismos de optimización con librerías de PL y optimización a través del AG (Jiménez y Martínez, 2008).

## **2.5. Indicadores de Servicio**

La organización del riego a la demanda utiliza criterios estadísticos, que suponen igual probabilidad de inicio del riego a lo largo del día, para determinar los caudales de diseño en las conducciones. Sin embargo, Reca et al. (2002) observaron que en muchas ocasiones los agricultores programan los riegos en períodos de tiempo muy concretos, por lo que los caudales en servicio suelen ser mayores que los caudales de diseño, es frecuente no alcanzar los niveles de presión necesarios. Por este motivo, Reca et al. (2002) definen una serie de indicadores que evalúan la fiabilidad de una red de riego, entendida ésta como la probabilidad de que la presión de servicio se encuentre por encima de un valor que permita el correcto funcionamiento de los hidrantes.

No son muchos los antecedentes que se han encontrado para determinar el grado de flexibilidad de una red trabajando a turnos ante cambios de turnos. Se introduce para esto la definición de fiabilidad, que describe la frecuencia de fallo de una red (Hashimoto, 1980; Hashimoto et al., 1982). La causa de fallo ha sido definida con diversos criterios, Clark et al. (1982) clasificaron a los factores que

afectan al fallo de tuberías en cuatro categorías: calidad y edad de las tuberías, el medioambiente que las rodea, la calidad del equipo de instalación y condiciones de servicio, finalmente la presión y los transitorios. Davies et al. (2001) realizaron una clasificación de fallos de tuberías referida a los factores de deterioro estructurales como: factores de construcción, factores externos locales. Wang (2006) categorizó el fallo considerando los factores de deterioros físicos, externos o ambientales y de mantenimiento. Para Gheisi y Naser (2014) la fiabilidad es una medida del rendimiento de un sistema de distribución de agua para suministrar las demandas a los consumidores en aspectos cuantitativos y cualitativos en cualquier circunstancia.

El análisis de la literatura muestra que la fiabilidad hidráulica depende no sólo de los niveles de presión sino de las características de las tuberías (rugosidad, diámetro, etc.), de la topología de la red, de la satisfacción de los abonados y debe incluir el modelo de la red hidráulica. Dentro de este contexto, Wagner et al. (1988 a, b) proponen un modelo de simulación de la fiabilidad de un sistema de abastecimiento. El criterio de fiabilidad ha sido utilizado además para expresar el rendimiento de los sistemas de distribución de agua. En forma general se establecieron dos tipos diferentes de fallo: deficiencia en la variación de la demanda (Bao y Mays, 1990; Mays, 1996), y fallo mecánico (Goulter, 1995). Otro criterio para caracterizar la fiabilidad hidráulica, es el grado en que el sistema de distribución cumple las exigencias a la presión adecuada, teniendo en cuenta las condiciones normales y anormales de funcionamiento (Tanyimboh y Templeman, 1993, 1998, 2000). Fujiwara y Li (1998) emplearon el análisis de fiabilidad y optimización, para distribuir los impactos del fallo del sistema y la relación entre la presión de entrega y caudal; generando la redistribución de caudales para minimizar los impactos de fallo del sistema. En similar línea Xu y Goulter (1998) analizaron la fiabilidad considerando la probabilidad de fallo de un componente junto con la incertidumbre en las demandas de los nudos, la capacidad de tuberías y los niveles de depósitos. Xu y Goulter (1999) estimaron una aproximación al diseño óptimo basado en la fiabilidad, estimaron la incertidumbre en las demandas, la capacidad de las tuberías y el fallo mecánico de los elementos del sistema. Matías (2003) analizó la fiabilidad de una red presurizada con diversos modelos de demanda y de configuraciones de la red, y los fallos de sus componentes.

El impacto del fallo depende de la presión en los nudos de consumo. Así, en el caso de un fallo, surgirá una nueva distribución de presiones en los nudos de consumo que provocará la disminución de la presión en ciertos nudos y el aumento de la presión en otros. En cuanto a la demanda en los nudos de consumo, ésta se modifica en función de la variación del nivel de presión (Wagner et al., 1988). La incertidumbre en la demanda de agua puede conducir a la inseguridad de la disponibilidad de presión en los nudos (Bargiela y Hainsworth, 1989; Babayan et al., 2005). El volumen de agua suministrada en los nudos puede ser dependiente o independiente de la presión o basado en el volumen constante de agua. Por tanto, el suministro variará de acuerdo al cabezal de presión disponible en los nudos (Tabesh et al., 2014). Este criterio introduce la noción de fiabilidad hidráulica, definida como la capacidad de la red para atenuar una deficiencia de presión debida a la ocurrencia de un fallo o al deterioro estructural.

Adicionalmente el concepto de fiabilidad se introdujo a medir cuantitativamente la posibilidad de mantener un servicio adecuado en determinadas condiciones y periodos de servicio. Se asignaron valores de probabilidad a estas condiciones, para cuantificar la fiabilidad o rendimiento de la red (Goulter y Bouchart, 1990; Fujiwara y Li, 1998; Martínez-Rodríguez et al., 2011). Otro criterio que se usó para realizar la gestión del recurso hídrico o productividad, fue la fiabilidad o sostenibilidad (Rowell y Barnes, 1972; Alperovits y Shamir, 1977; Quindry, 1981). Se analizaron los fallos en la red en los nudos y en el volumen demandado, estimando el incremento de la fiabilidad. Este incremento, significó la elevación del costo de tuberías (Gupta y Bhave, 1994). Gargajo y Pianese (2000) tradujeron el criterio de fiabilidad en índices de funcionamiento hidráulico. Igualmente, se adoptaron criterios de fiabilidad para la política de gestión de embalses usando la optimización Monte Carlo y se estableció una medida de rendimiento para conocer el comportamiento del mismo (Jain et al., 2008).

En el diseño de una red de riego en particular no sólo interesa el diseño óptimo de las redes de distribución, sino su desempeño (Xu y Goulter, 1996 y 1997; Lamaddalena y Sagardoy, 2000; Babayan et al., 2005). La introducción del concepto de fiabilidad y su cuantificación es la consecuencia de la necesidad de garantizar y medir un nivel adecuado de redundancia en una red (Goulter, 1993). Los autores que se han citado usaron la fiabilidad y la tolerancia en la comparación de redes de abastecimiento de agua, pero, a la larga, el concepto de fiabilidad se define como la probabilidad de que una red de suministro de agua

va a satisfacer la demanda de diseño. Con este criterio la disponibilidad de un nudo es la proporción de tiempo en donde la presión residual en un nudo es mayor que el valor requerido para un modelo de demanda (Cullinane, 1992). Por su parte, la probabilidad mecánica es la probabilidad de que el sistema se encuentre operativo en forma permanente. Se han realizado otros estudios en donde se investigó el cumplimiento de la demanda en los nudos de consumo (Fujiwara y Li, 1998, Kalungi y Tanyimboh, 2003; Martínez-Rodríguez, J.; Montalvo I.; Izquierdo J, y Pérez-García R, 2011).

Lamaddalena et al. (2012) optimizan el costo de diseño de una red de riego a presión operando a la demanda, y analizan su fiabilidad. En este modelo se combina la minimización del costo con la maximización de la fiabilidad, considerando la variabilidad estocástica de los flujos en la red. Se usa para la optimización el método discontinuo iterativo de Labye. Como resultado, se determina un indicador que relaciona la operación del hidrante y su carga de presión. Usman et al. (2015) consideran el criterio de fiabilidad para describir el rendimiento general del sistema de riego en condiciones de campo. Aplican el algoritmo de balance de energía superficial e imágenes de resolución moderadas para obtener información sobre el uso consuntivo del agua. Afshar et al. (2015) emplean PL y optimización de colonia de hormigas (ACO, Ant Colony Optimization), definiendo la capacidad mínima de un depósito para satisfacer una demanda de agua en sistemas de riego en períodos de tiempo bajo condiciones establecidas a priori. En el modelo se adoptó como función objetivo del problema, la minimización de la capacidad del depósito considerando la fiabilidad deseada. Se establece la fiabilidad de un sistema de riego a nivel de hidrante como un indicador de rendimiento, suponiendo esta característica como un proceso estocástico estacionario (Lamaddalena y Sagardoy, 2000). Esta hipótesis es sólo una aproximación razonable sobre todo durante los períodos pico. Cuando no se supere el máximo de descarga diseñada aguas arriba, los hidrantes pueden fallar en la presión y / o caudal en función de su posición y de la cantidad de hidrantes que operen al mismo tiempo (Lamaddalena y Pereira, 2007a; Khadra y Lamaddalena, 2010). Muy a menudo las condiciones de diseño como el patrón de cultivo, los métodos de riego en la granja y las estrategias de riego de los granjeros pueden cambiar con el tiempo, ocasionando el aumento de la incertidumbre de la demanda.

Para garantizar las condiciones óptimas de desarrollo del cultivo, y tomando en cuenta su requerimiento de riego, es prioritario satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos en el momento oportuno y con la cantidad necesaria de manera eficiente y uniforme (Ángeles, 2000). Si los sistemas de riego no se operan adecuadamente será difícil que cumplan con las prestaciones de servicio de diseño, aunque se cuente con tecnificación (Tun-Dzul et al., 2011). Por tanto, es imprescindible cumplir con los procesos de optimización de diseño y operación de los sistemas. Tales procesos garantizarán las condiciones de riego, como la selección de métodos y estrategias para disponer del agua, características del clima, suelo y cultivo, condiciones sociales y económicas, así como las prestaciones de servicio de la red (Holzapfel et al., 2007).

En el diseño hidráulico de sistemas de riego a presión existen dos criterios a considerar: realizar el dimensionado más económico en lo referente al diámetro de tuberías, y contar con máxima operatividad o manejo del sistema. Esto se traduce en el término de flexibilidad de la red, que constituye la capacidad del sistema para abastecer de agua efectivamente a los usuarios en tiempos relativamente cortos (Espinosa et al., 2016). También, se considera, la aptitud de disminuir las limitaciones impuestas por un sistema de distribución de agua por turnos (Magaña et al., 1998). Una de las ventajas de trabajar con organización de riego a la demanda es la mayor capacidad de conducción, que ocasiona el incremento de la flexibilidad en la red, así como la velocidad de respuesta para la dotación de agua (Espinosa et al., 2016). En las redes con esta operación se observó que la variabilidad de los regímenes de flujo conduce a la incertidumbre en la cabeza de los nudos. Este fenómeno deberá ser estimado en el diseño, puesto que afectará al rendimiento del sistema. Lamaddalena et al. (2012) exponen una metodología para obtener un costo mínimo de la red con la maximización de la fiabilidad. Sin embargo, esta característica producirá un incremento en los costos de dimensionado. En contraposición una operación por turnos, proporcionará como resultado un diseño más económico, y con la gestión automática se salvará el inconveniente de la coordinación de apertura de hidrantes al momento de regar (Monserat et al., 2012). En este caso, se afectará o se restringirá la flexibilidad de operación del sistema porque los regantes deberán acogerse en forma obligatoria a la organización de los turnos. Se intuye entonces que la rigidez de la demanda del sistema es proporcional a la economía y por lo tanto la flexibilidad va en contra de ella. Como ya se ha advertido, dentro del ámbito de las redes de

riego a presión operando a turnos existen exiguos antecedentes para abordar su diseño óptimo y no se conocen referencias que a la vez permitan analizar o estudiar simultáneamente la flexibilidad de estos sistemas. Bajo estos lineamientos en el presente estudio se investigarán los fallos que se originan en las redes de riego, cuando éstas son sometidas a cambios o eventualidades de la demanda en las tomas. Será posible, por tanto, definir la robustez o fiabilidad de los sistemas de riego operando con la modalidad de turnos, en función del número de fallos en la presión de consigna. Estos fallos son posibles que se originen cuando se modifiquen las demandas ante cambios durante la explotación. Para determinar el valor de fiabilidad de una red de riego presurizada se usará la simulación de escenarios aleatorios y de esta manera se evaluará su capacidad de adaptación.

Como se constata en los párrafos anteriores, los algoritmos evolutivos combinados con técnicas de soluciones analíticas especializadas en problemas concretos, aportan la potencia necesaria para abordar el problema que se plantea resolver en esta investigación. Como resultado de esta investigación se pretende determinar criterios para definir a priori la modalidad de riego conveniente para sistemas de riego operando con la modalidad de turnos. Estos criterios serán el producto de implementar técnicas de diseño económicas a redes de riego a presión. Además, reunirán compromisos de economía, fiabilidad o/y flexibilidad que permitirán adaptar los sistemas de riego a cambios futuros. Por lo tanto, para el presente desarrollo se considera el término flexibilidad como la garantía de que la red de riego a turnos opere eficientemente al producirse modificaciones de la demanda en los nudos de consumo conocido y con el requisito de cumplir con fiabilidad en los nudos demandantes a través de contar con la presión de consigna suficiente.



# Capítulo 3 :

# Fundamentos

# Hidráulicos Redes

# de Riego a Presión

## 3.1. Introducción

En este capítulo se inicia con una descripción básica de las ventajas e inconvenientes del riego a lámina libre y a presión. Se definen las redes colectivas de riego a presión (RCRP) y sus partes constituyentes. Se enuncian las ecuaciones que modelan la circulación del flujo en las redes de riego operando a la demanda como a turnos y se comparan ambos tipos de explotación.

Para reponer el perfil del suelo y el agua consumida por los cultivos, es necesario aplicar riego en forma oportuna y uniforme. Esta aplicación es posible realizarla mediante sistemas de riego *tradicionales*, en lámina libre de origen milenario; por inundación con cobertura total de la parcela o cobertura parcial (por surcos). Otra opción será a través de sistemas de riego *Tecnificados*, que surgieron en la segunda mitad del siglo XX y emplean conducciones presurizadas para llevar el

agua hasta las parcelas. Estos sistemas tecnificados han requerido del desarrollo de una tecnología específica, que producida a gran escala alcanza costos competitivos (Aliod, 2017).

### **3.2. Ventajas e inconvenientes del riego a lámina libre y riego presurizado**

Ciertamente el transporte y riego a lámina libre se ha aplicado durante milenios, su característica principal es permitir el trasiego de grandes caudales sin requerir tecnología elevada, sin embargo, resulta ineficiente. Se anota en la Tabla 3.1, un resumen de las ventajas y desventajas de su uso.

**Tabla 3.1. Ventajas e inconvenientes del riego en lámina libre**

<b>VENTAJAS</b>	<b>INCONVENIENTES</b>
Costo de implantación reducido	Requiere pendiente adecuada
Uso tradicional difundido	Riesgo de erosión, escorrentías
Manejo autónomo, requiere pericia	Falta de uniformidad percolación
Carente costos energéticos	Difícil control de la dosis y manejo
Lavado enérgico en suelos salinos	Inadecuado en terrenos arenosos y fuertes pendientes
Mantiene estructura de terreno	Máximas diferencias del perfil de humedad entre riegos
	Difícil mecanización. Requiere presencia humana
	Pérdidas en conducciones a cielo abierto

Fuente: Aliod (2017)

En el caso del transporte del flujo usando conducciones a presión, la desventaja de pérdidas por evaporación y filtración que se anota en el transporte a lámina libre queda superada, si no existen fugas en los conductos. En este tipo de riego será posible la gestión de caudal y presión necesaria en toda la red. Como contrapartida en el riego a presión es posible evidenciar algunas de las desventajas que se anotan en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2. Ventajas e inconvenientes del riego presurizado**

<b>VENTAJAS</b>	<b>INCONVENIENTES</b>
Control de dosis y frecuencia	Costo infraestructuras y reposición de equipos
Fácil mecanización	Costos de mantenimiento
Aptos en terrenos con fuertes pendientes	Dependencia técnicas y servicios
Puede aplicarse en zonas altas	Cualificación y adaptación del regante
Aplicable en todo tipo de estructura de terreno	Si la presurización requiere bombeo, implica costos energéticos
Mantiene estructura de terreno	Generación residuos
Mantiene nivel de humedad	Posibilidad de robos y vandalismo
Permite uso de aguas más salinas	
Reduce o elimina percolación y escorrentías	

Fuente: Aliod (2017)

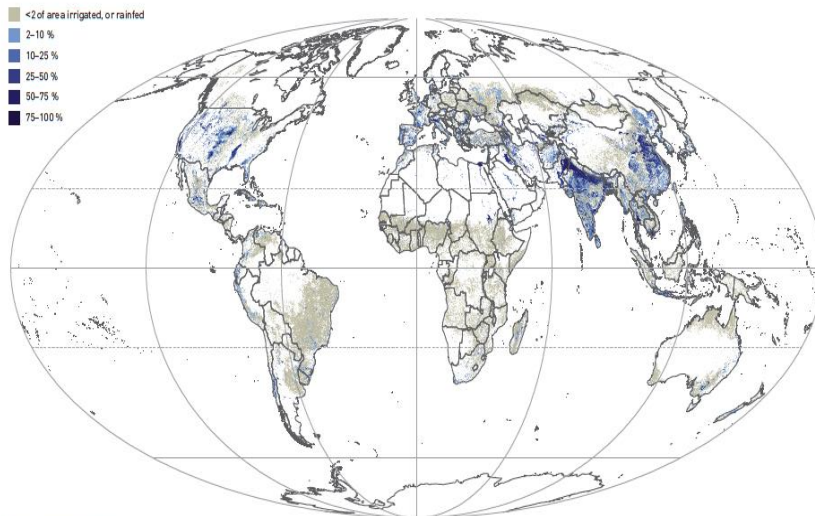
La construcción, gestión, mantenimiento y control resultan más simples y económicas en los sistemas presurizados, en donde es posible mejorar la organización y reparto justo de los gastos derivados de la operación de la red (Aliod, 2017). De igual manera en la Tabla 3.3, se resumen los valores invertidos en porcentaje, en sistemas de riego usando instalaciones simples y sofisticadas.

**Tabla 3.3. Costos invertidos por sistema de riego**

<b>Elementos constitutivos</b>	<b>Instalación Sofisticada</b>	<b>Instalación Simple</b>
Estación de Control	>23%	13%
Redes, subredes y colectores	10%	21%
Conexiones y otros accesorios	22%	24%
Laterales (tuberías y emisores)	45%	42%

Fuente: FAO (2007)

En las últimas décadas el riego se ha desarrollado rápidamente, en especial en los países en vías de desarrollo debido a la necesidad de garantizar las fuentes de agua para la productividad y cultivo óptimo. Se observa en la Figura 3.1, el área equipada para riego alrededor del año 2007 en el mundo.



Fuente: Siebert, S. et al. (2007)

**Figura 3.1. Área equipada para riego en el mundo**

### **3.3. Sistemas de riego presurizados**

En el desarrollo de la presente investigación se consideró el riego en carga en donde el agua fluye por las redes de tuberías a presión. Una red de riego está constituida por varios elementos como tuberías, tanques reguladores o de distribución, estaciones de bombeo, dispositivos de control y medición, y las reglas de operación que garantizan el funcionamiento de los equipos en parcela. Estos elementos interconectados conducen el agua desde los puntos de alimentación a los puntos de demanda (hidrantes, etc.).

Un Sistema de Distribución de Agua (SDA) según su tipología puede ser mallado o ramificado. Una red “estrictamente ramificada” es una red ramificada en la que existe un solo punto de altura piezométrica establecida. En esta configuración el circuito de alimentación de cada punto donde exista consumo es único y conocido. Para cada escenario estacionario donde exista una configuración determinada de consumos en las tomas de agua, es posible conocer “a priori” los caudales circulantes por todos los tramos, sin intervención de los diámetros mediante la ecuación de continuidad (balance de masa). Es decir, el caudal circulante por una determinada tubería en todos los escenarios estacionarios será

igual a la suma de los consumos instantáneos existentes en las tomas situadas aguas abajo de la misma.

Usualmente en redes de riego la tipología es ramificada, debido a su menor costo en comparación con las redes malladas. Este factor es determinante en las aplicaciones de riego, en virtud de los grandes caudales que se trasiegan en comparación relativa con el abastecimiento urbano. Otra causa para usar redes ramificadas en riego, es la limitada capacidad de pago que las producciones agrícolas presentan. La mayor vulnerabilidad de las redes ramificadas ante cortes de flujo en alguna tubería, no es relevante ya que una interrupción temporal del servicio no es tan crítica; como sucede en redes de abastecimiento en donde se adoptan redes malladas debido a la necesidad de seguridad y redundancia en el suministro. La interrupción del suministro del riego durante horas o días suele tener un impacto reducido, o nulo, en la producción agrícola si es bien gestionado. Sin embargo, la suspensión del servicio en redes de abastecimiento presenta graves molestias a la población y problemas de higiene.

Las redes de distribución de agua desde el punto de vista hidráulico se conceptualizan en términos de nudos y líneas. Los nudos son los puntos de la red en donde las condiciones de contorno de caudal o de presión se encuentran definidas, y es a través de los cuales la red se comunica con el exterior. Los nudos serán o bien de caudal “nudos de caudal”, donde el caudal de salida o entrada a la red está impuesto; o “nudos de presión” en éstos, se impone el nivel de altura piezométrica existente.

Los nudos de la red en donde no hay extracción o contribución de caudal, se denominan “nudos de conexión” (Mora, 2012).

Al número total de nudos del sistema se denomina  $N_N$ , al número de nudos de caudal  $N_Q$  y al número de nudos de presión  $N_H$ , así para cualquier sistema se cumple:

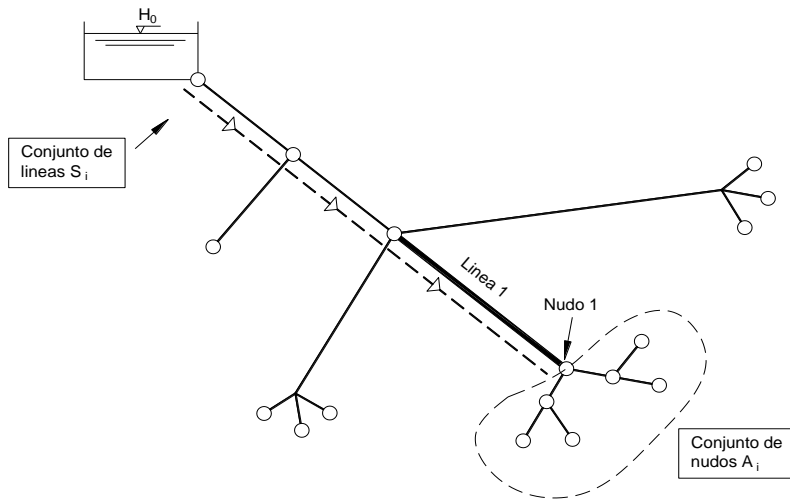
$$N_N = N_H + N_Q \qquad \text{Ecuación 3.1}$$

Los elementos físicos que conectan dos nodos asociados con algún tipo de ecuación que modela su comportamiento característico se denominan líneas. El número de nodos y líneas adoptados es función del grado de abstracción de la red. Cuando se agrupan los elementos de una red en las líneas, se obtiene un esquema de la red; de tal manera que un sistema se representa por un conjunto de

nudos y líneas. En una red ramificada se cumple la relación topológica entre el número total de nudos  $N$  y el número total de líneas  $L$ :

$$L = N - 1 \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Una red ramificada estrictamente ramificada solo puede tener un punto de altura piezométrica definido, que constituye habitualmente el nudo de cabecera Figura 3.2.



**Figura 3.2. Esquema red ramificada con un único nudo de altura piezométrica conocida**

En una red estrictamente ramificada, el conjunto (único) de líneas que conectan el nudo de cabecera con un nudo  $i$ , se denotan los caudales circulantes  $q_i$  por las líneas  $i$  usando la ecuación de continuidad en los nudos que quedan determinados por:

$$q_i = \sum_{j \in A_i} Q_j \quad \forall i = 1 \dots N - 1 \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Siendo  $Q_j$  el caudal consumido en el nudo  $j$ , y  $A_i$  el conjunto de nudos que se sitúan aguas debajo de la línea  $i$  (incluido el propio nudo  $i$ ).

El caudal inyectado en cabecera de la red  $Q_c$  será:

$$Q_c = \sum_{i=1}^{N-1} Q_j \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Siendo  $N$  el número total de nudos de la red. Si las pérdidas de carga en la línea  $j$  son  $h_j$ , y la altura piezométrica de cabecera es  $H_0$ , la altura piezométrica  $H_i$  en cada nudo será:

$$H_0 = H_i - \sum_{j \in S_i} h_j \quad \forall i = 1 \dots N - 1 \quad \text{Ecuación 3.5}$$

### 3.3.1. Ecuaciones fundamentales

En el análisis general de las redes de distribución en régimen permanente, se busca conocer tanto los caudales que trasiegan por sus líneas, como las alturas piezométricas en los nudos de la red considerando una situación invariable con el tiempo. Para lo cual, será necesario partir de la información disponible de las características de las conducciones y elementos especiales, de los consumos y aportes de la red y por lo menos de una altura piezométrica de referencia conocida. En un modelo de análisis en régimen permanente se usan dos leyes generales para resolver las incógnitas del sistema. Siendo éstas, las leyes de Kirchoff que son una particularización de las ecuaciones generales de conservación de la masa y la energía aplicadas al flujo de un fluido incompresible a través de un sistema de tuberías a presión. Las variables del modelo serán:

- ✓ Caudales  $q$  internos que circulan por todas las líneas
- ✓ Los caudales  $Q$  externos introducidos/extraídos en los nudos
- ✓ La altura piezométrica en los nudos  $H$  y sus cotas
- ✓ La pérdida de carga en cada línea o en forma general las diferencias de alturas piezométricas entre los nudos extremos que se denominan  $hf$ .

Según la configuración del sistema algunas de estas variables serán incógnitas y otras serán datos del problema. Se define la nomenclatura y el criterio de signo que se usará, para lo cual se hará referencia a la Figura 3.3 en donde una línea se une por los nudos  $i$  y  $j$ .

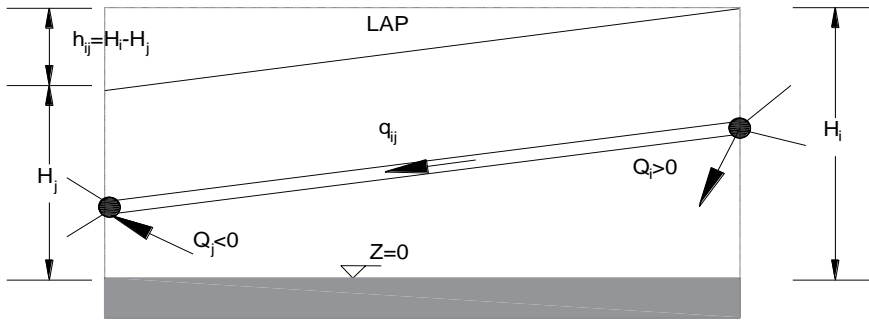


Figura 3.3. Circulación de flujo de una línea

La nomenclatura  $q_{ij}$  representa el caudal que circula entre los nudos  $i$  y  $j$ , se considera como positivo el caso de la figura cuando circula del nudo  $i$  hacia el nudo  $j$ ;  $Q_i$  será el caudal inyectado en el nudo  $i$ , se considera positivo si es saliente (consumo) y negativo cuando es entrante (aporte);  $H_i$  representa la altura piezométrica en  $i$ ;  $h_{ij}$  define la pérdida de carga en la línea  $ij$ .

Las pérdidas de carga en una tubería o pérdida localizada se pueden expresar como:

$$h_{ij} = H_i - H_j = R_{ij} * q_{ij} * |q_{ij}|^{n-1} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

La pérdida de carga tomará el mismo signo que el caudal de línea, por tanto, será positiva si  $H_i$  es mayor que  $H_j$ , por consiguiente, el caudal circula del nudo  $i$  al  $j$ ;  $n$  es el exponente del caudal que será función de la ecuación de pérdidas que se adopte. El término  $R_{ij}$  se denomina resistencia hidráulica de la línea  $ij$ .

En particular la ecuación de resistencia hidráulica según Darcy, se define por:

$$h_{i,j} = \frac{8 \cdot f \cdot L_i}{\pi^2 \cdot g \cdot D_i^5} \cdot q_{ij}^2 \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Donde  $f$  factor de fricción,  $L_i$  longitud del tramo  $ij$ ,  $D_i$  diámetro de tubería en el tramo  $ij$ .

La suma total de los caudales que concurren en un nudo es cero, según la primera Ley de Kirchoff. Esto incluye tanto a los caudales internos  $q_i$  que circulan por las líneas, como a los caudales externos  $Q$  directamente aplicados y supone un cierto



criterio de signos preestablecidos. La ecuación de continuidad se expresará como sigue:

$$\sum_{j \in A_i} (\pm)_{ij} q_{ij} - Q_i = 0 \quad \text{ó} \quad \sum_{j \in A_i} (\pm)_{ij} q_{ij} = Q_i \quad i = 1, \dots, N \quad \text{Ecuación 3.8}$$

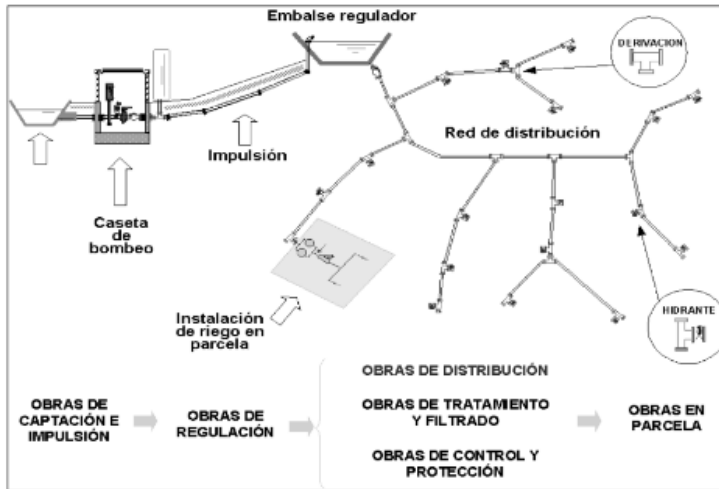
Donde  $j$  representa a todos los nudos conectados directamente al nudo  $i$  (conjunto  $A_i$ ) y siendo  $N$  el número total de nudos de la red. La **Ecuación 3.8** simboliza el total de  $N$  ecuaciones simultáneas, aunque no independientes, ya que debe cumplirse el principio de continuidad en toda la red, la suma neta de los aportes y consumos externos debe ser nulo, y se verifica en:

$$\sum_{i=1}^N Q_i = 0 \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Por consiguiente, es posible afirmar que de las  $N$  ecuaciones de continuidad en los nudos de la red, una de ellas es combinación lineal de  $N-1$  restantes y en conjunto la primera ley de Kirchoff proporciona  $N-1$  ecuaciones independientes.

### 3.3.2. *Redes Colectivas de Riego a Presión (RCRP)*

Son los sistemas formados por elementos que permiten la captación, almacenamiento y regulación, tratamiento y transporte del agua desde su origen hasta cada una de las tomas en parcela, satisfaciendo las condiciones de presión y caudal en la red (Arviza 2007) (ver Figura 3.4).



Fuente: Ruiz y Molina (2010)

Figura 3.4. Esquema de componentes de una RCRP

En las estrategias de diseño y posterior explotación de una RCRP, según manifiesta Pérez (1996), existen tres alternativas:

- Riego a la demanda: se trata de la extracción de agua de la red en los nudos que corresponden a las entradas en las parcelas, con un caudal de demanda igual o menor que un máximo limitante previamente asignado, denominado dotación  $[d]$ . Este caudal está a libre disposición del regante en cualquier momento dentro un periodo diario promedio que se denomina “Jornada Efectiva de Riego”, JER. Así, la red goza de una flexibilidad de riego máxima. Debido a esto, los caudales circulantes por las líneas experimentan grandes variaciones a lo largo de la campaña de riego, y a lo largo del día. Los caudales pueden pasar de ser nulos a alcanzar valores punta elevados si se produce una gran simultaneidad de tomas abiertas como consecuencia de la libertad de uso de la red. Dichos caudales poseen, por tanto, una estructura aleatoria, pero predecible mediante métodos estadísticos.
- Riego por turnos: Los usuarios disponen también de un caudal de dotación en toma de riego, pero utilizable solo en un horario fijo que se determina a priori. En este caso la flexibilidad es muy reducida ya que el agricultor tiene solo la libertad de regar cuando le corresponde, pero no de alterar el horario de riego. En este tipo de operación se encuentran caudales deterministas, que adoptan una distribución más uniforme a lo largo del tiempo cuando los

turnos se establecen de manera que el caudal demandado aguas debajo de una línea sea semejante para todos los turnos. Además, su gestión es simple y se presume mayor economía en el costo de la red, de al menos el 15%, comparada con el diseño a la demanda (Alduán y Monserrat, 2009).

- Riego mixto: Es posible que se opere la red con riego mixto, en donde el riego se realiza a turnos en ciertos periodos y circunstancias de la campaña, o en determinadas zonas de la red; y en el resto del tiempo y condiciones o de sectores de la red, a la demanda.

### **3.3.3. Caudales circulantes**

Las Redes de Abastecimiento de agua y las Redes de Riego a presión comparten casi todos sus componentes físicos, a excepción de las tomas. En el caso de las redes para regadío, se deben configurar mediante hidrantes compuestos de válvulas hidráulicas, dispositivos reguladores de presión y limitadores de caudal. La diferencia operativa entre ambas se fundamenta en el tipo y modulación de suministro que deben aportar sus tomas:

- En el caso de Redes de Abastecimiento se suministra agua tratada, con bajo caudal por usuario, pero de forma permanente y con volúmenes relativamente uniformes a lo largo del año. Si bien con ciertas modulaciones diarias de caudal en las tomas que agrupan a un conjunto de usuarios. Son sistemas por antonomasia “a la demanda”, salvo que por deficiencias de diseño o gestión se vean forzadas a trabajar solo ciertas horas del día, operando entonces en una especie de “turnos por sectores”.
- En el caso de Redes de Riego se suministra agua bruta, de forma intermitente con demandas muy variables, incluso nulas, a lo largo de los meses del año, con tomas que disponen de un caudal de valor constante por usuario.

En consecuencia, el cómputo de los caudales a considerar para el diseño en la RCRP requiere de una metodología y formulación específicas muy distintas de los sistemas de abastecimiento, que se revisarán en este apartado.

### **3.3.4. Necesidades Hídricas, $N_H$**

Las Redes de Abastecimiento deben satisfacer las necesidades hídricas humanas de higiene (mayoritarias) y de ingesta, con una dotación diaria que se considera adecuada entre 60 y 100 litros por persona y día.

Las RCRP, independiente de que se exploten a turnos o a la demanda deben de satisfacer las necesidades de hídricas netas del cultivo al que riegan en cualquier periodo, desde aquellos que, por el estado fenológico de la plantación o por el clima precisen de menos riego, hasta aquellos en donde las necesidades son máximas. Estas necesidades vienen expresadas técnicamente en un volumen diario de agua por unidad de superficie del cultivo, que la plantación necesita para realizar sus funciones biológicas sin estrés hídrico,  $NH_b$ . De este volumen bruto, que será función del tipo y variedad del cultivo, del clima, del suelo, y del estado de crecimiento del cultivo, se restarán las aportaciones por la precipitación natural para obtener las necesidades hídricas netas,  $NH_n$ .

Las unidades habituales de estas necesidades hídricas, brutas o netas, son [ $m^3/ha$  día] o [mm/día]. Se evalúan agronómicamente para cada periodo de la campaña de riego, siendo lo más habitual especificarlas por periodos mensuales, por tanto, dependen del mes y del año,  $NH_n [m]$ ,  $NH_b [m]$ . Esta necesidad hídrica expresada en términos de volumen por unidad de superficie y día, no significa que necesariamente se tenga que regar diariamente. Puesto que, según el tipo de cultivo y suelo se puede almacenar el volumen correspondiente a la necesidad hídrica de varios días en la zona al alcance de las raíces. En tal caso la Dosis de Riego,  $D_r [m^3/ha$  ó mm] se define como

$$D_r = NH_n \cdot \text{Días de intervalo entre riegos} \qquad \text{Ecuación 3.10}$$

que suministra la necesidad hídrica de varios días, de manera que hasta que no ha transcurrido dicho periodo no es preciso volver a regar.

No obstante, a efectos de cálculos tipo y diseño de las RCRP se homogenizan los parámetros característicos de las demandas hídricas para un periodo de un día, ( $T_{24}$ ).

### **3.3.5. Caudal ficticio continuo [ $q_{fc}$ ]**

Se define el caudal ficticio continuo como el volumen requerido para satisfacer las necesidades hídricas netas diarias de 1 ha del cultivo,  $NH_n [m]$ , transformado a

términos de caudal continuo, bajo una aplicación hipotética o ficticia durante 24 horas. Suele expresarse en unidades [L/s ha día]. Es decir, traduce la necesidad hídrica del cultivo (volumen / ha) a caudal (L/s ha) como si dicho volumen se aplicase durante 24 horas con flujo constante.

$$q_{fc} = NH_n \left[ \frac{m^3}{ha \text{ día}} \right] \cdot \frac{1000}{3600 \cdot 24} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Para el diseño de las RCRP se toma el  $q_{fc}$  del mes de máximas necesidades hídricas  $NH_n$  [m] (descontando precipitaciones) de la campaña. Si el mes de máximas necesidades hídricas es un mes de poca precipitación, para evitar el riesgo de que en alguna campaña las precipitaciones sean nulas, el  $q_{fc \text{ de diseño}}$  se computa en función de las máximas necesidades hídricas brutas del cultivo,  $NH_b$ , es decir, suponiendo que toda la aportación de agua se efectúa de forma artificial mediante el riego.

### 3.3.6. Tiempos característicos

En virtud de las necesidades hídricas y de la dotación de caudal del hidrante, el tiempo que el hidrante debe estar abierto para suministrar justamente la necesidad hídrica diaria de riego,  $Ta_i$ , se puede expresar como:

$$Ta_i = \frac{q_{fci} \cdot S_i \cdot T_{24}}{d_i} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

Donde  $Ta_i$  es el tiempo de apertura del hidrante  $i$  en [h],  $S_i$  representa a la superficie servida por el hidrante [ha],  $T_{24}$  es el tiempo que corresponde a 24 horas del día,  $d_i$  simboliza la dotación del hidrante [L/s],  $q_{fci}$  el caudal ficticio continuo del cultivo que riega el hidrante [L/s ha]. Lógicamente  $Ta_i$  depende del mes de la campaña de riego a través de  $q_{fci}$ .

La superficie servida por el hidrante,  $S_i$ , en ocasiones se afecta con términos de corrección que introducen factores a considerar como zonas de difícil acceso, diferencias del tamaño de sectores en las parcelas, etc.

El  $Ta_i$  del hidrante se usará en redes de riego operando a la demanda en el cálculo de la probabilidad de apertura del hidrante. En el riego a turnos  $Ta_i$  condiciona la duración de los turnos y el número de turnos con que operará la red.

Lamaddalena y Sagardoy (2000) exponen que, para que el tiempo calculado con la expresión [3.12] se corresponda con la realidad, es necesario que exista una tarifa de agua basada en el volumen efectivo usado por los agricultores. De manera que el regante tenga un incentivo poderoso para hacer uso del hidrante el tiempo estrictamente necesario para suministrar el volumen de agua que necesita el cultivo en un momento dado y no más.

Las RCRP a la demanda, (y también a turnos si estos turnos son de índole y ciclo diario) permiten regar con la frecuencia que se desee, siempre y cuando,  $Ta_i$ , sea inferior al tiempo que la red está disponible realmente para el riego en un día tipo. Este tiempo de disponibilidad real se denomina “Jornada Efectiva de Riego” que en todo caso es inferior a  $T_{24}$ , por razones de mantenimiento, condiciones de viento e insolación excesiva, exclusión de uso del sistema con bombeo directo en franjas horarias de tarifas de la energía elevada, etc. Cuando se trata de sistemas de riego que se alimentan de embalses, la *JER* puede acercarse a  $T_{24}$  más extensa, pero generalmente no conviene adoptar valores superiores a las 22 horas.

En el caso de RCRP a la demanda se define el parámetro rendimiento de la red,  $r$ , como la relación entre el tiempo en que la red está disponible para el riego dentro de un cierto intervalo temporal absoluto,  $T$ , respecto a dicho intervalo. Si este intervalo temporal,  $T$ , se reduce a un día, el tiempo de disponibilidad es la *JER* y el tiempo absoluto corresponde a 24 horas del día ( $T_{24}$ ):

$$r = \frac{\text{Tiempo disponibilidad de red } T}{T_{24}} \quad \text{Ecuación 3.13}$$

$$r = \frac{JER}{T_{24}} \quad \text{Ecuación 3.14}$$

En el caso de riego a turnos se define, además, la “Jornada Efectiva de Riego del turno  $t$ ”,  $JERt$ , que se corresponde con la duración del turno dada por el máximo tiempo de apertura de los hidrantes que forma parte del turno.

$$JERt = Ta_{m\acute{a}x} \quad \text{Ecuación 3.15}$$

La suma de la  $JERt$  de todos los turnos definirá la *JER*. A su vez el máximo Tiempo de apertura [ $Ta_{m\acute{a}x}$ ] entre todos los hidrantes de la red, condiciona el número de turnos.

$$n^{\circ}Turnos \leq \left\lfloor \frac{JER}{Ta_{m\acute{a}x}} \right\rfloor \quad \text{Ecuaci3n 3.16}$$

Existe íntima relación entre las dotaciones a los hidrantes y la duración y el número de turnos, que serán función de las necesidades de diseño de la red. El número de turnos será función del tipo de red y de los factores agronómicos, e influirá en la operatividad de riego, así como en el diseño de la red. En Monserrat (2009) se encuentra un análisis pormenorizado de la configuración de los turnos y su relación con la estructura de sectores en la parcela.

### 3.3.7. Caudales de diseño en Operaci3n a la Demanda

Clement, 1966; desarroll3 una formulaci3n para establecer los caudales máximos por línea en las RCRP operando a la demanda que ha sido casi universalmente adoptada. Esta formulaci3n se utiliza en esta investigaci3n a la hora de establecer comparativas entre el diseño de RCRP operando a turnos o a la demanda. El diseño debe ser capaz de soportar el transporte de los caudales demandados durante el período de mayor  $NH_n$ , cumpliendo la presi3n mínima en los hidrantes.

#### 3.3.7.1 Primer modelo de Clément

Se fundamenta en las hipótesis que se describen a continuaci3n (Clément, 1966):

- ✓ Una toma puede permanecer abierta o cerrada, y cuando est3 abierta su demanda ser3 constante e igual a la dotaci3n.
- ✓ En un periodo de riego estimado, existe una probabilidad de apertura constante por cada hidrante.
- ✓ La probabilidad de apertura de un hidrante es independiente de la probabilidad de apertura de cualquier otro.

Bajo estas tres primeras hipótesis la distribuci3n de caudales en una línea es una variable estadística binomial. Si, adem3s, se cumple que:

- ✓ El número de hidrantes aguas abajo de una línea  $k$ ,  $R_k$  es suficientemente alto de manera que:

$$\sum_{i=1}^{R_k} p_i > 3$$

**Ecuación 3.17**

Entonces se puede demostrar que la variable estadística “caudal circulante por la línea  $k$ ” se ajusta aproximadamente a una Distribución Normal. Que, en virtud de ello, el caudal de diseño,  $q_k$  puede formularse en función de un parámetro denominado Garantía de Suministro ( $GS$ ). La  $GS$  es la probabilidad acumulada (expresada en porcentaje) de que el caudal circulante por la tubería  $k$ , no exceda el valor  $q_k$ , como se describe:

$$q_k = \sum_{i=1}^{R_k} p_i d_i + U(GS) \sqrt{\sum_{i=1}^{R_k} p_i (1 - p_i) d_i^2}$$

**Ecuación 3.18**

donde  $q_k$  es el caudal de diseño [L/s] de la línea  $k$ ,  $d_i$  representa la dotación de cada hidrante  $i$  [L/s] aguas abajo de la línea  $k$ ,  $p_i$  simboliza la probabilidad de apertura del hidrante  $i$ , y  $U(GS)$  es un coeficiente que depende de la Garantía de Suministro,  $GS$ .

Dado que la distribución normal está completamente tabulada, el coeficiente  $U$  asociado a la  $GS$  que se desee, indica la fracción de la desviación típica que se tiene que mover más allá del caudal medio para encontrar el caudal  $q_k$  que no se supera con probabilidad  $GS$ .  $100-GS$  es la probabilidad de que ese caudal se supere, en cuyo caso la presión en todas las tomas no estará garantizada. La  $GS$  es una variable que está en función del nivel de calidad que se otorgue al dimensionado de la red. Los valores frecuentes que se adoptan para la  $GS$  se encuentran en el rango del 95 – 99 %.

### 3.3.7.2 Probabilidad de apertura ( $p_i$ )

Si en todas las horas de disponibilidad de la red ( $JER$  en cómputo diario) es igualmente probable que se inicie el riego en el hidrante,  $i$ , es decir, que no hay ningún sesgo de preferencia para efectuar el riego en ciertas horas. Con esta condición, la probabilidad de que un hidrante se encuentre abierto  $p_i$ , se puede calcular como el ratio entre su tiempo de apertura y el tiempo disponible de uso de la red:



$$p_i = \frac{\text{Tiempo apertura hidrante } i}{\text{Tiempo disponibilidad de la red}} \quad \text{Ecuación 3.19}$$

$$p_i = \frac{Ta_i}{JER} = \frac{q_{fci} \cdot S_i}{d_i \cdot r} \quad \text{Ecuación 3.20}$$

Si se define ( $GL_i$ ) del hidrante  $i$  como el inverso de  $p_i$ , se obtiene:

$$GL_i = \frac{1}{p_i} \quad \text{Ecuación 3.21}$$

Clément (1996) recomienda para el cálculo de redes de riego a la demanda, que el valor mínimo del grado de libertad debe ser 1.5 y el máximo no debe exceder de 8 (Ministerio de Medio Ambiente; Medio Rural y Marino –Tarragona), siendo 4 el valor máximo razonable.

Para evitar diferencias en el  $GL$  entre los hidrantes de la red y homogeneizando el tiempo de apertura, es posible establecer la dotación de riego  $d_i$ , despejando de la [Ec. 3.12], de manera que todas las tomas tengan similar  $GL$ :

$$d_i = \frac{q_{fci} \cdot S_i \cdot GL}{r} \quad \text{Ecuación 3.22}$$

Por regla general cuanto mayor es el  $GL$  de los usuarios más costoso será el sistema (Lara, 2008).

Cuando se programa el riego con la **modalidad de turnos** los usuarios deberán tener asignado un caudal en horario fijo. En este caso, las tuberías trasiegan un caudal máximo predeterminado, que será menor sí, no todos los hidrantes del turno están abiertos. Este caudal puede ser distinto de un turno a otro. El agricultor será informado en forma oportuna de las horas que dispone de agua y dentro de ese plazo podrá abrir su toma, con el requisito de no superar su dotación asignada (Alduán y Monserrat, 2009).

Dentro del riego a turnos se diferencian las situaciones siguientes en cuanto a la duración de riego (Apollin et al., 1998):

*Duración de la entrega con un tiempo fijo predefinido.* Son sistemas de riego donde el derecho al agua está expresado en un tiempo preestablecido que limita la duración de la entrega de agua al usuario.

*Duración de la entrega con un tiempo variable.* Sucede cuando el derecho al agua está expresado como el derecho a “terminar de regar” la parcela cultivada o una

superficie pre-establecida, por esta razón la entrega de agua no tiene un tiempo definido a nivel del usuario. El tiempo podrá variar según el tipo de riego, tipo de suelo y humedad en el suelo, estado de desarrollo del cultivo y superficie cultivada principalmente. En la mayoría de sistemas de riego se ha observado que la duración de la entrega de agua a nivel de la unidad de reparto está definida y no presenta variaciones. Es posible encontrar que la duración de la entrega de agua puede variar de un ciclo de entrega a otro.

### ***3.3.8. Caudales de diseño en operación a turnos***

En el diseño de una red operando a turnos el concepto de caudal de diseño debe ser reinterpretado, dado que en cada turno el caudal circulante es determinista y está definido por el sumatorio de las dotaciones de los hidrantes (o nudos de consumo en general) aguas abajo, considerándose todos los hidrantes del turno en cuestión, abiertos. Si se interpreta este caudal como caudal de diseño, cada línea tendrá tantos caudales de diseño como turnos en los que intervenga (García, 2013).

El máximo de los caudales de cada turno en una línea no puede ser tomado como el caudal de diseño, y recurrir entonces a las mismas metodologías de dimensionado de RCRP a la demanda, ya que los requisitos de presión de las tomas se corresponden a distintos turnos con caudales diferentes. En el caso de proceder así, se aboca a un sobredimensionado sistemático que anula la supuesta economía del diseño a turnos.

Otra estrategia frecuentemente usada en el diseño de RCRP a turnos consiste en dimensionar las líneas que forman parte de cada turno con los caudales del turno respectivo, obteniendo tantos diámetros para cada línea como turnos existan, y seleccionando el de mayor magnitud. Este procedimiento también resulta ineficaz al tender al sobredimensionado de todas ellas, puesto que los diámetros aguas arriba de una determinada línea se forzarán hasta un valor superior, debido a exigencias de otro turno. Esto no contribuye a disminuir el diámetro de la propia línea en los turnos en que actúa. En García et al. (2013) se encuentra sin embargo un procedimiento, que se contempla en el Capítulo 4 de métodos de optimización, que permite superar este inconveniente, obteniendo en consecuencia costos más ajustados.

### 3.3.9. Comparación de diseños a la demanda vs. turnos

Alduán y Monserrat (2009) realizan un estudio para el análisis técnico y económico de la organización a la demanda o por turnos; Planells et al. (2007) desarrollan una investigación en donde implementan turnos en una red de riego operando a la demanda, para evitar la acumulación de caudales en ciertos periodos de la jornada efectiva de riego.

La Tabla 3.4 detalla en forma resumida las características positivas “potenciales” de los sistemas de distribución presurizados que se proyectan para la operación con riego a la demanda y a turnos.

**Tabla 3.4 Ventajas de operación a la demanda y turnos**

<b>Demanda</b>	<b>Turnos</b>
Aumento productividad	Ahorro en presupuestos
Se consume agua necesaria	Reducción de caudales
Posibilidad de introducir diferentes cultivos	Organización de consumo para lograr transporte de caudal uniforme
Libertad de uso	Posible instalar en zonas rurales con poca tecnificación
Costo moderado	Aconsejables cuando hay discriminación del coste de energía
Flexibilidad para controlar cambios	Organización de riego conflictiva

Fuente: Aliod (2017)

En la organización a la demanda es posible el incremento de la productividad, calidad y uniformidad del producto; el regante regará en el momento oportuno y la cantidad que necesite. De esta manera se favorece la disminución de las dosis aplicadas al cultivo. Si el diseño a turnos opera en términos de turno con frecuencia diaria, la flexibilidad es semejante en turnos y a la demanda. Se evitará entonces, la sobredosis o la aplicación máxima que es característica de los sistemas a turnos con grandes intervalos entre riegos. En este caso, será posible introducir diversos cultivos que requieren distintos calendarios y pautas de riego, con la comodidad para el regante y su libertad de uso. Otra característica es la de proporcionar flexibilidad para admitir cambios en la estructura de la red (dotaciones, propiedad, etc.) y realizarlos a un costo moderado, siempre y cuando los sistemas de riego cuenten con elementos de regulación y control y con un diseño cualificado técnicamente (Aliod, 2017).

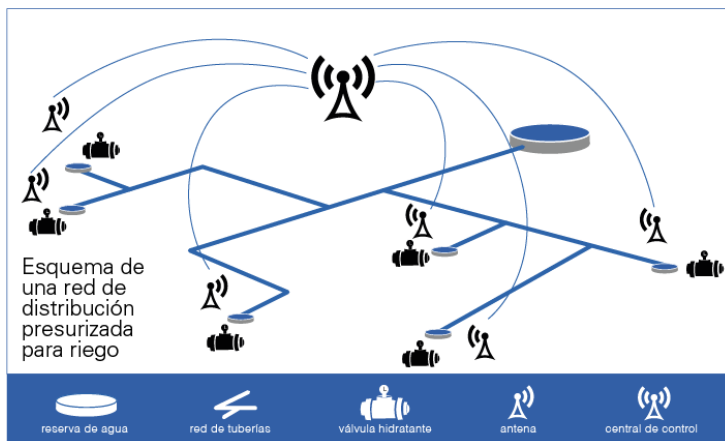
En particular el riego con la modalidad de turnos es de aplicación ventajosa en diversas condiciones, como: la limitación de presupuestos disponibles para introducir sistemas a la demanda, que tienen un mayor costo de construcción en general. Lara (2007) considera que las inversiones en los diseños que se realizan partiendo de las hipótesis de Clément resultan económicamente más elevadas que cuando el diseño se realiza usando la hipótesis de riego por turnos. Alduán y Monserrat (2009) consiguen un ahorro aproximado del 15% en el diseño a turnos con respecto al diseño a la demanda, en los casos que analizan y con las técnicas que aplican. En Alduán y Monserrat, 2009; Espinoza y Flores, 2016 se deduce que la organización por turnos que proponen, consigue una reducción media de los caudales de diseño del 30% en los tramos terminales de la red, mientras que en los tramos principales la reducción que encuentran es menor, en torno a 3%. En este tipo de operación por turnos el consumo de las tomas se suele organizar para transportar un caudal uniforme en las tuberías durante todo el tiempo de funcionamiento de la red, es decir se procura que los caudales circulantes en cada turno sean similares (Lara, 2008); Rodríguez Díaz et al. (2009); Moreno et al. (2010); Jiménez-Bello et al. (2010) plantearon un procedimiento para redes de riego a presión operando a turnos, en donde agruparon sectores de la red buscando minimizar el consumo de energía, para esto emplearon indicadores de rendimiento. Determinaron que era posible implementar este tipo de sistemas de riego en zonas rurales para autoconsumo, con poca tecnificación y ausencia de elementos de regulación y control, necesarios en el riego a la demanda. Otra alternativa para la explotación del riego por turnos será en donde la organización del riego sea conflictiva o existan usos tradicionales que lo aconsejen (Aliod, 2017).

En países como España, con sistemas de riego muy tecnificados, pero con gran consumo de energía, la introducción de turnos de índole diaria (que se comportan de facto como riego a la demanda) en redes diseñadas a la demanda permiten abaratar costos, tanto de construcción como de explotación (energéticos), cuando hay discriminación del costo de la energía según los periodos horarios (Faci, 2015).

Respecto a los aspectos de automatización y telecontrol, Alduán y Monserrat (2009) exponen que para automatizar y controlar una red de riego con independencia de la modalidad de riego que se adopte, serán necesarios ciertos elementos comunes (un centro de supervisión y control, comunicaciones vía

radio, unidades concentradoras y unidades terminales remotas) (ver Figura 3.5); pero, su configuración, se implementará en función del tipo de organización de riego. Así mientras que, en el riego a la demanda, el uso del hidrante es a iniciativa del regante, y el telecontrol detecta la apertura de los hidrantes y realiza la apertura y cierre de forma remota mediante las ordenes dadas por el regante. En el riego por turnos dotado de telecontrol, la apertura y cierre del hidrante se realiza exclusivamente por medio del telecontrol, sin intervención de la voluntad del regante, obligando así al cumplimiento de los turnos asignados.

La operación de la red cumpliendo una asignación de turnos necesita de autodisciplina elevada y vigilancia externa, que se facilita si existe telecontrol, ya que éste se encargará de abrir y cerrar los hidrantes que correspondan en cada momento, sin que los usuarios individuales puedan cometer infracciones. En ambos casos se dispondrá de la información de los hidrantes que están operando, y el uso de un tipo de riego u otro no supondrá un cambio significativo en el presupuesto de automatización de la red.



Fuente: <http://www.redagricola.com/cl/redes-distribucion>

**Figura 3.5. Esquema de un sistema básico de comunicación remota en hidrantes y concentrador en un telecontrol**

No obstante, el riego a turnos presenta los siguientes inconvenientes (Lapo, 2012):

- La dependencia/sensibilidad del diseño a los turnos establecidos. Las técnicas existentes de diseño a turnos, parten de la existencia de unos turnos preestablecidos, en general heurísticamente.
- La potencial rigidez del diseño encontrado a los cambios que se sucederán o que la explotación alcanzará en el futuro.
- Las diferentes casuísticas que es posible se presenten: riegos de pequeña dimensión para desarrollo rural, sistemas extensivos de dimensión mediana y grande, sistemas de montaña o llano, con y sin consumo energético.

En el proyecto de redes operando a turnos es habitual asignar los turnos en forma previa, por lo general esta tarea se realiza estableciendo turnos heurísticamente y guardando un cierto criterio de uniformidad en el caudal de cabecera de cada turno y en las tuberías principales.

Existen escasas investigaciones sobre parámetros que especifiquen cómo realizar la distribución de turnos a los hidrantes; Lara (2008) usa una metodología de programación de turnos para obtener diseños más económicos, poniendo de manifiesto que buscar la uniformidad de caudales en cabecera no sería siempre la respuesta a la solución óptima; sino la adecuada ponderación de factores como caudal, distancia al punto de alimentación, presión mínima exigida y cota geométrica de los nudos agua abajo de la línea en cuestión. García (2013) implementa una metodología que reparte los hidrantes, realizando una clasificación previa de los nudos de consumo por rango de dotación para no descompensar los caudales de cabecera.

### **3.4. Planteamiento específico del problema**

Cuando se trata de diseñar una red hidráulica sujeta a una serie de consideraciones o restricciones relacionadas con la hidráulica y el costo de la red. El dimensionado resultante de esta red deberá satisfacer las prestaciones de servicio en cuanto a caudal, presión suficiente y velocidades de circulación del flujo. Se necesita, entonces, adoptar criterios que se enmarcarán a la normativa vigente para estas redes y a la apreciación del diseñador.

Con el objeto de cumplir con las consignas de presión y caudal, se precisa conocer si va a ser necesario un sistema de bombeo, y valorar la *Disponibilidad de energía eléctrica*, en tal caso. Así como considerar una línea aérea hasta el cabezal, además contar con los valores de las tarifas eléctricas y franjas horarias (Arviza,

2007). Estos elementos, estarán en dependencia directa del sistema de riego empleado y del diseño agronómico.

Se requiere fijar la *Situación de funcionamiento* de la red de riego, para determinar las condiciones de operación del sistema, tales como necesidades de caudal y las presiones mínimas de servicio en los puntos de consumo. Será imprescindible conocer, por tanto, las características de la red de riego que se refieren a la topología de la red y al sistema de alimentación. Otra característica importante es la definición de la Programación de riego.

Una red de distribución desde el punto de vista topológico está conformada por nudos y líneas, cada línea estará caracterizada por diversas variables, en el caso de una tubería se mencionan las siguientes ecuaciones que la determinan [Ec. 3.3 y Ec. 3.5]. En la presente investigación las variables de decisión constituyen los diámetros de tuberías y la asignación de turnos en los hidrantes, y la programación de riego que se define será la explotación por turnos.

#### **3.4.1. Restricciones**

Una vez recopiladas las relaciones entre las variables hidráulicas del problema, que corresponden a leyes físicas del comportamiento del sistema, se señalan las restricciones siguientes:

- Se establecerá un rango de presiones mínimas o admisibles en los hidrantes para que los emisores más desfavorables en la instalación de la parcela cumplan con el requisito de presión para su funcionamiento. Es decir, la suma de las pérdidas de carga y desniveles en la parcela no debe ser superior al margen existente entre la presión suministrada en los hidrantes, y las presiones de funcionamiento de los emisores instalados.
- En cuanto a la velocidad del flujo se adoptan valores mínimos para evitar sedimentación y sobredimensionado en los tubos, y valores máximos para prevenir erosión de la tubería y el golpe de ariete. Los valores extremos de velocidad se adoptarán de acuerdo a las características físico químicas del agua y del tipo de material de la tubería.
- Se especificará el diámetro mínimo y el material de tubería que se emplearán en el diseño, así como la gama correspondiente y adecuada para evitar problemas de suministro y mantenimiento.

Si se seleccionan los criterios señalados, es posible encontrar diversas soluciones que cumplan con las condiciones planteadas a través de un diseño funcional. Pero cuando se trata de encontrar la mejor solución al problema enunciado en términos de criterios de utilidad (costo, fiabilidad, etc.), se explotará la bondad de las técnicas de optimización.

### 3.4.2. Consideraciones económicas en el diseño de redes hidráulicas

Un diseño económico en redes hidráulicas se origina cuando en los problemas de optimización se busca la minimización de un objetivo económico, cumpliendo los requisitos funcionales expresados como restricciones. El problema de diseño económico queda formulado en términos de una función objetivo, que incluye los diversos costos asociados al sistema y las restricciones que representan tanto las leyes físicas que gobiernan el funcionamiento del sistema, como las condiciones que se espera obtener del mismo. Pérez (1993) clasifica los costos como se detalla en la Figura 3.6, los *costos de construcción* (costos fijos) se realizan obligatoriamente en la implementación y construcción de la red de distribución para que cumpla en forma satisfactoria con el objetivo proyectado, se expresan en unidades monetarias. Los *costos de operación o explotación*, (costos variables), son los que se efectúan para que el sistema funcione eficientemente, expresados en unidades monetarias por año.

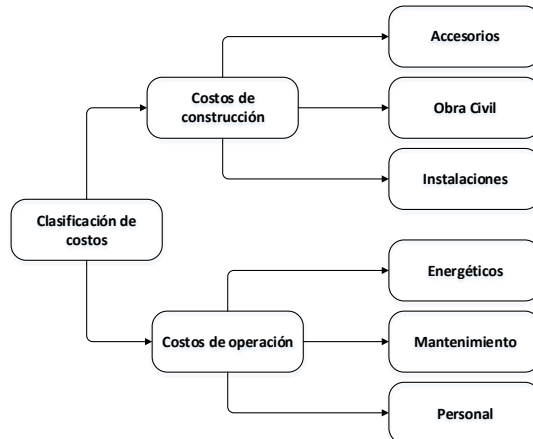


Figura 3.6. Costos que se generan en una red de distribución



Para realizar el diseño económico de una red de distribución será prioritario definir las funciones de costo asociadas a los elementos que intervienen en ella. Según Orth (1986) las funciones están sometidas a tres tipos de influencia: funcional, sistemática y aleatoria. Las influencias sistemáticas (tipo de tubería, calidad del material) y aleatoria (fluctuaciones de precio en el mercado) definen el valor de los coeficientes de la función, aunque no modifican su estructura. Se anotan las funciones de costo referidas a los elementos más relevantes de una red hidráulica:

### *3.4.2.1 Tuberías*

En una red hidráulica se considera como costo de construcción de una conducción a la adquisición más el transporte y la instalación; expresada como:

$$C_c = (A_1 + A_2 \cdot D^a) \cdot L \quad 1 \leq a \leq 2 \quad \text{Ecuación 3.23}$$

Donde  $D$  es el diámetro (nominal o interior, según se convenga) de la conducción [mm],  $L$  representa la longitud de las líneas de la red,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $a$  son coeficientes que dependen del tipo de material y presión de trabajo, y  $C_c$  representa el costo del tramo de tubería [USD]. El costo de mantenimiento de las conducciones se aproxima a una relación proporcional con la longitud total de la misma o como una fracción del costo de construcción.

El costo de las tuberías será aproximadamente el 55% de la inversión, en tanto que los rubros de excavación, montaje y protección de la tubería el 25%, lo que representa un costo en líneas de conducción del orden de 80% de la inversión total (Stephenson, 1981).



# Capítulo 4 : Métodos de Optimización

## 4.1. Introducción

En este capítulo se describe el planteamiento general del problema que se pretende resolver, se realiza una clasificación de las técnicas de diseño y su aplicación. Inicialmente los diseños de las redes de distribución a presión consideraban únicamente el balance hidráulico de la red, así como cumplir las condiciones determinadas por las ecuaciones de masa y energía, originando los métodos funcionales de diseño que no toman en cuenta ningún criterio económico. Con el desarrollo de los métodos matemáticos y los computadores se implementan técnicas innovadoras de diseño de sistemas de distribución con criterio económico, en este apartado se efectúa especial énfasis en algunos métodos de optimización determinística o analítica que en general mejoran la solución en cada iteración.

Además, se menciona una de las técnicas de optimización heurísticas que por su naturaleza estocástica no garantiza determinar el resultado óptimo global, aunque en numerosas aplicaciones se han obtenido excelentes resultados. En las redes de

distribución grandes, se evidencia que los resultados obtenidos con procedimientos tanto funcionales como económicos significan una inversión mayor, en especial en los costos de tuberías de los primeros con respecto a los segundos.

## **4.2. Clasificación de las Técnicas de diseño**

Para la resolución del problema que interesa en este trabajo de investigación, existirán múltiples soluciones que cumplirán con las restricciones que se solicitan y con las prestaciones de servicio necesarias en la red. Estas soluciones se obtienen a través de diseños funcionales, es decir partiendo de las condiciones hidráulicas requeridas en el sistema hidráulico. Para encontrar una solución atendiendo a un criterio de utilidad específico se deberá hacer uso técnicas de optimización.

### **4.2.1. Diseño funcional**

Para resolver el problema de dimensionado con técnicas de tipo funcional se estiman criterios que se fundamentan en parámetros hidráulicos, tales como una velocidad específica o una pérdida de carga determinada.

#### *4.2.1.1 Criterio de velocidad*

Imponiendo un criterio de velocidad máxima ( $v_{m\acute{a}x}$ ) recomendable para toda la red, será posible obtener un valor de caudal máximo ( $q_{m\acute{a}x}$ ) que trasegará los tramos de tubería a diseñar, para los cuales se dispondrá de una gama de diámetros comerciales. En caso de que en algunos trayectos no se cumpla con la presión y caudal requeridos, será necesario modificar los diámetros de éstos. Así, para un diámetro interno de la tubería  $D_j$  el caudal máximo se expresará por:

$$q_{jm\acute{a}x} = \frac{\pi \{D_j\}^2}{4} \cdot v_{m\acute{a}x} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$$D_j = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{jm\acute{a}x}}{\pi \cdot v_{m\acute{a}x}}} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Varios investigadores adoptaron para el diseño de redes de riego rangos de velocidad de flujo para evitar los fenómenos de sedimentación y golpe de ariete. Así, González Bastos, et al. (2007) adoptan:

- 0.5 m/s valor de velocidad mínima del flujo
- 2 m/s valor de velocidad máxima del flujo

Mora (2012) expone un rango de velocidad entre 0.5 m/s y 2.5 m/s para el trasiego apto del flujo.

La ecuación de Mougne propone usar distintos valores de velocidad máxima en función del diámetro de tubería,

$$v_{m\acute{a}x}^{(i)} = 1.5 \sqrt{D^{(i)} + 0.05} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

En la Tabla 4.1, se presentan los valores de  $v_{jm\acute{a}x}$  y  $q_{jm\acute{a}x}$  para diámetros comerciales considerando la fórmula de Mougne:

**Tabla 4.1. Aplicación de la ecuación de Mougne para diversos diámetros de tubería**

D [mm]	100.00	125.00	150.00	175.00	200.00	250.00	300.00	350.00	400.00	450.00	500.00
$v_{jm\acute{a}x}$ [m/s]	0.58	0.63	0.67	0.71	0.75	0.82	0.89	0.95	1.01	1.06	1.11
$q_{jm\acute{a}x}$ [L/s]	45.60	61.60	79.00	97.80	117.80	161.30	209.10	260.80	316.10	374.90	436.90

Fuente: Fuertes et al. (2002)

#### 4.2.1.2 Criterio de pendiente hidráulica

Para el criterio de diseño con pendiente uniforme se dimensionarán los tramos de la red con igual pendiente hidráulica de referencia ( $J^*$ ). La expresión genérica para la pendiente hidráulica será:

$$J^* = \frac{R \cdot q_j^m}{D_j^n} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Donde  $R$  involucra al coeficiente de conversión de unidades y al coeficiente de fricción que depende de la ecuación empleada para cuantificar las pérdidas de carga (Manning, Hazen-Williams, Scobey, Darcy-Weisbach, etc.),  $q_j$  representa el caudal que circula por la tubería desde el inicio hasta el final de la misma,  $m$  y  $n$  son los exponentes del caudal y del diámetro interno de la tubería, respectivamente. Despejando  $D_j$  de la **Ecuación 4.4**, resulta:

$$D_j = \left( \frac{R \cdot q_j^m}{J^*} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Así,  $R$  para Darcy Weisbach se expresará:

$$R = \frac{8 \cdot f}{\pi^2 \cdot g} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Particularizando para la ecuación de Darcy:

$$J^* = \frac{8 \cdot f \cdot q_j^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D_j^5} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

El diámetro será:

$$D_j = \left( \frac{8 \cdot f \cdot q_j^2}{\pi^2 \cdot g \cdot J^*} \right)^{1/5} \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Donde  $f$  representa el factor de fricción adimensional y  $g$  la aceleración de la gravedad.

Tratándose de redes ramificadas la principal ventaja es que los caudales por cada línea es posible fijarlos a priori, antes de realizar el diseño. El dimensionado se realiza eligiendo una secuencia de trayectos de tuberías, iniciando por el tramo de unión entre la cabecera de la red y el nudo crítico Figura 4.1.

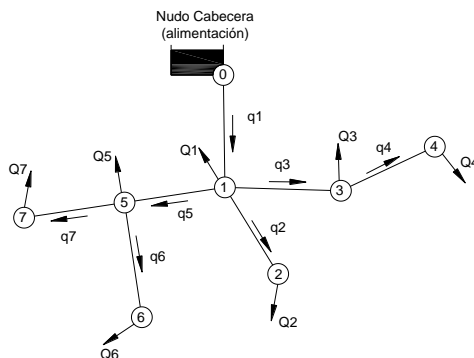


Figura 4.1. Red ramificada, estructura y forma arborescente

El nudo crítico será el más restrictivo respecto a la presión de servicio mínima  $H_{min,i}$ , es decir con menor valor de pendiente hidráulica disponible. Por lo general, el nudo crítico coincide con aquel nudo que se encuentra más alejado del nudo cabecera o el más alto (mayor cota geométrica) que los demás. La pendiente hidráulica mínima disponible  $J_{disp,i}$  que une la cabecera con el nudo  $i$ , será:

$$\frac{dy}{dx} J_{disp,i} = \frac{h_f \text{admisible}}{\sum_{J \in S_i} L_j} = \frac{H_0 - H_{min,i}}{\sum_{J \in S_i} L_j} = \frac{H_0 - \left( z_i + \frac{p_{i,min}}{\gamma} + \frac{\alpha v_j^2}{2g} \right)}{\sum_{J \in S_i} L_j} \quad \text{Ecuación 4.9}$$

Donde  $H_0$  es la altura del nudo cabecera,  $z_i$  representa la cota geometría del nudo genérico  $i$ ,  $\frac{p_{i,min}}{\gamma}$  indica la altura de presión de servicio mínima, que corresponde a un nudo de demanda genérico  $i$ ,  $\frac{\alpha v_j^2}{2g}$  simboliza la energía del fluido por velocidad.

#### 4.2.2. Diseño económico

En el diseño económico además de satisfacer las restricciones hidráulicas del diseño funcional se busca que el costo de diseño sea mínimo, es decir obtener el diámetro más económico. En otras palabras, significa seleccionar la alternativa más económica de diseño de entre un número de alternativas factibles.

Este *diámetro más económico* se definirá como el valor mínimo que resulta de la suma de los costos anuales que corresponden a la energía consumida más el valor de la anualidad por la inversión efectuada, se expresa en la ecuación:

$$C_T = C_O(D) + C_C(D) \quad \text{Ecuación 4.10}$$

La Figura 4.2 representa el diámetro óptimo en función de la ecuación [4.10]

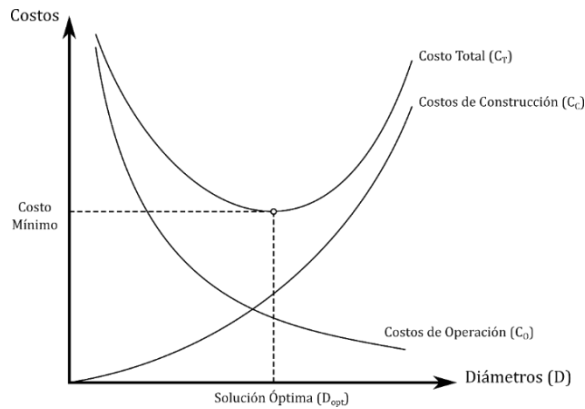


Figura 4.2 Variación de costos anuales con el diámetro

La relación entre el costo por metro lineal y el diámetro de las tuberías, viene influenciada por las variables que se mencionan (Pérez, 2003):

- ✓ Tipo de material y el timbraje
- ✓ Accesorios y uniones
- ✓ Tipo de terreno y profundidad de las zanjas
- ✓ Costos de excavación y movimientos de tierras
- ✓ Interrupciones en las vías públicas, autorizaciones, etc.

Los costos que resultan del diseño económico están referidos a distintas bases temporales para lo cual será necesario:

- ✓ Considerar el total de la inversión y el total de los gastos de operación durante la vida útil del proyecto.
- ✓ Referir los costos de inversión a un término anual (amortización) para comparar con los costos de operación.

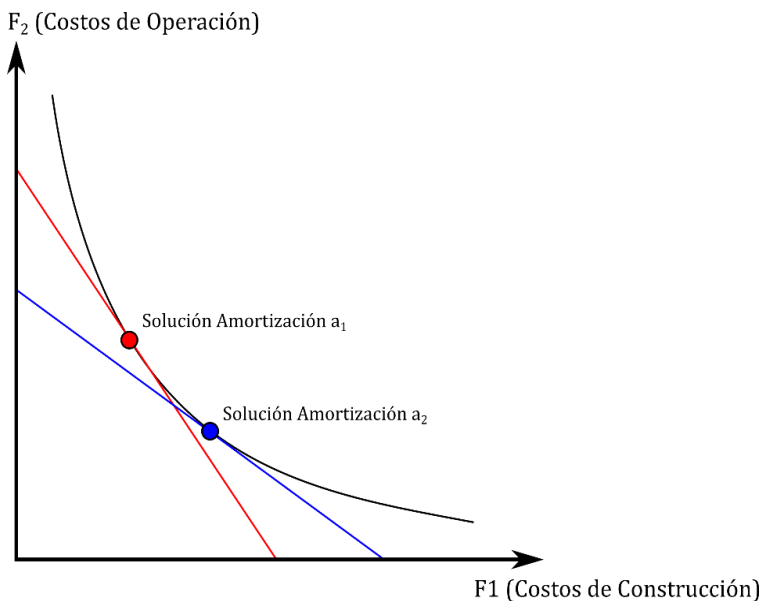
El valor del dinero está en función del momento en que se use, sufriendo modificación con el tiempo. El factor de amortización es la depreciación de un valor en el transcurso de su vida útil. Se calcula a partir de dos parámetros: el período de vida  $T$  del proyecto y la tasa de interés real  $r$  de la amortización, que representa el costo de oportunidad. El costo anual de la red es equivalente al costo de amortización de la inversión más el costo de operación de la misma.

$$C_T = C_O + C_C \cdot a_t \quad \text{Ecuación 4.11}$$



Donde  $C_T$  representa el costo anual total del sistema,  $C_o$  identifica al costo de operación del sistema,  $C_c$  es el costo de construcción. Los costos de operación se incrementan en forma periódica debido a la inflación.

Se observa que la solución óptima depende del valor asignado a la amortización. Por ello, un enfoque distinto del costo óptimo económico se recoge en la Figura 4.3 en donde se presenta en el eje de las abscisas el costo de inversión y en el de las ordenadas el costo de explotación. Así, para dos valores distintos del factor de amortización ( $a_1$  y  $a_2$ ) se obtendrían dos soluciones de diseño distintas, tal y como se muestra en dicha figura.



**Figura 4.3. Frontera de Pareto de costos de construcción frente a los costos de operación**

Para obtener un diseño económico se cuenta con un sinnúmero de métodos. Es posible hacer una clasificación de estos métodos de diseño económico atendiendo a los diámetros que se emplean bien como variables continuas, bien como discretas. Los métodos de Programación No Lineal (PNL) y el método de la Serie Económica (MSE) corresponden a los primeros y la Programación Lineal o Programación Dinámica a los segundos. Las soluciones obtenidas en los métodos

de PNL y MSE en general no corresponden a diámetros comerciales, por esta razón se deberá realizar un proceso de normalización.

En el proceso de normalización es posible asignar a cada línea el diámetro comercial inmediato superior al teórico obtenido (supranormalización) o asignar el inmediato inferior (infranormalización) o considerar el más próximo (criterio de proximidad). Algunos autores optan por descomponer los distintos tramos en dos, correspondientes al diámetro inmediato inferior e inmediato superior, optimizando de esta forma los costos de construcción.

### **4.3. Optimización del diseño económico**

Cuando se trata de resolver un problema de optimización hay dos grandes grupos de técnicas de resolución (Ramos et al., 2010):

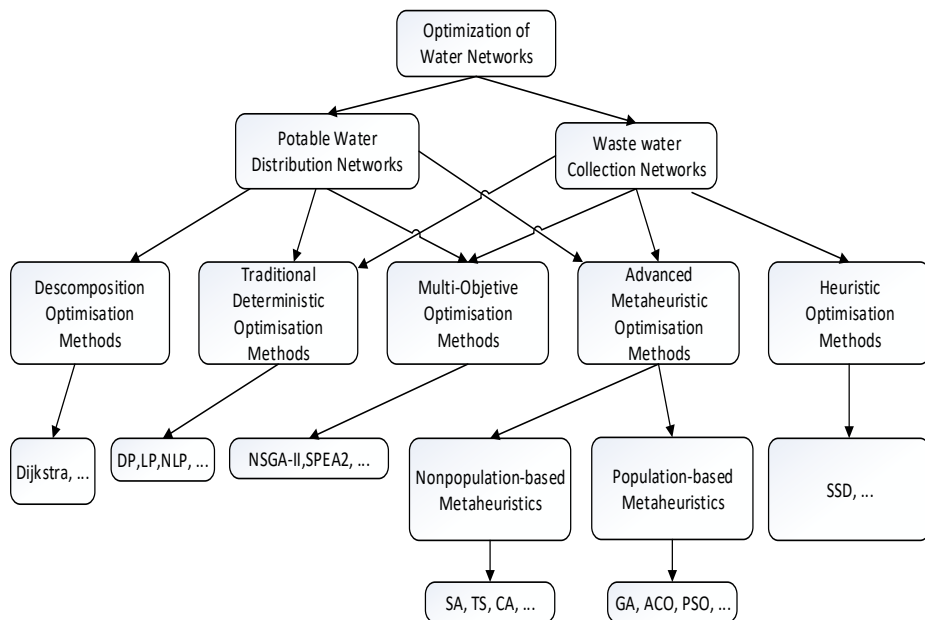
- a) Métodos clásicos de optimización. En estos métodos se utilizan técnicas de optimización tanto analíticas como numéricas.
- b) Métodos meta-heurísticos. Vinculados a la inteligencia artificial y emulan fenómenos sencillos de la naturaleza.

Dentro del primer grupo se encuentra la optimización lineal, la optimización lineal entera mixta, la optimización no lineal, la optimización estocástica, la optimización dinámica, etc. La optimización determinista aplica métodos que generalmente cumplen con las matemáticas rigurosas y son métodos exhaustivos de búsqueda. Esta técnica de optimización emplea una capacidad computacional que se incrementa en forma exponencial con el número de tuberías de las redes en estudio (Cavazzuti, 2013).

En el segundo grupo se mencionan los algoritmos evolutivos, el método del recocido simulado, búsquedas heurísticas y los sistemas multi-agente. En general se dice que los métodos clásicos buscan un óptimo local, mientras que los métodos meta heurísticos permiten hallar un óptimo global, aunque no sea garantizado.

Dentro de la literatura se encuentran diversos intentos para desarrollar el diseño óptimo y algoritmos de control con la finalidad de ayudar en la operación de los sistemas complejos de distribución de agua (Alperovits y Shamir, 1977; Eiger et al., 1994; Su et al., 1987; Lansey y Mays, 1989; Savic y Walters, 1997; Prasad y Park, 2004). Así, diversos algoritmos se orientaron hacia varios objetivos como

funcionamiento óptimo de una bomba, embalses, etc.; apoyados en diferentes métodos de optimización. No obstante, el uso de estos procedimientos ha sido limitado (Cohen, 1982; Ormsbee et al., 1989; Zessler y Shamir, 1989) debido a que conllevan una considerable cantidad de sofisticación matemática. Estos procedimientos, por lo general están sujetos a la simplificación de algunos componentes del modelo, que consideran varios supuestos restrictivos para acomodar las limitaciones hidráulicas no lineales que se requiere. Zhao et al. (2016) realizan la taxonomía de los métodos de optimización incluyendo sistemas de distribución de agua y de alcantarillado como se observa en la Figura 4.4.



Fuente: Zhao et al. (2016)

**Figura 4.4. Taxonomía de métodos de optimización de redes de agua**

Se observa en la figura anterior la división de las técnicas de optimización para el diseño de sistemas de abastecimiento y sistemas sanitarios. Se define como parte de las técnicas determinísticas Programación Dinámica (DP), Programación Lineal (LP), Programación No Lineal (NLP) entre otras. Como métodos de optimización multiobjetivo se mencionan el Algoritmo Genético de clasificación

no dominante (NSGA-II, de sus siglas en inglés *Non-dominant Sorted Genetic Algorithm*) y los métodos elitistas como el Algoritmo de fuerza de evolución de Pareto (SPEA), (SPEA2), etc. Estos algoritmos permiten mostrar no una, sino varias soluciones al problema compuesto de diseño económico teniendo en cuenta los costos de construcción y los costos de operación.

Los métodos de optimización metaheurísticos también desempeñan un papel importante en esta clasificación. Así, se mencionan los métodos que no se fundamentan en la población como Simulated Annealing (SA), Tabu Search (TS), la técnica de los Autómatas Celulares (CA), y otros. Además, las técnicas que toman en consideración la población como los Algoritmos Genéticos (GA), la teoría de optimización por colonia de Hormigas (*Ant Colony Optimization*, ACO), la técnica de optimización basada en el comportamiento que tienen las bandadas de pájaros en su proceso de migración (*Particle Swarm Optimization*, PSO), etc.

#### **4.3.1. Optimización Analítica**

El principal objetivo de la optimización será encontrar la “mejor” solución a un problema en términos de calidad, costo, fiabilidad o cualquier otro criterio de utilidad. Para el presente trabajo se estima el componente económico como parte vital, ya que representa una de las inversiones más altas en la infraestructura de cualquier sistema hidráulico (Savic, 1997). Con esta concepción, en las últimas décadas se han desarrollado diversos métodos o técnicas de diseño óptimas. Para esto, será necesario implementar modelos hidráulicos de las redes en estudio, cuya actuación será verificada con simulación hidráulica y mediante la resolución de sistemas de ecuaciones no lineales que resultan de considerar las ecuaciones de energía, continuidad y la pérdida de carga (Wood y Funk, 1993). Se citan a continuación las definiciones y el papel importante que desempeñan las funciones cóncavas y convexas en el proceso de optimización.

Una función  $f(x)$  será convexa en un intervalo, si el segmento de recta que une dos puntos cualquiera de la gráfica de la función se sitúa siempre por encima de los puntos de dicha gráfica para el intervalo comprendido entre los puntos considerados, Figura 4.5 (a). Y una función  $f(x)$  será cóncava, si el segmento que se trata queda siempre por debajo de la porción de la curva comprendida entre el par de puntos, Figura 4.5 (b). Traduciendo matemáticamente, la función  $f(x)$  es

convexa en un determinado intervalo  $(x_A, x_B)$  si para cualquier par de valores  $x_1$  y  $x_2$  incluidos en dicho intervalo se cumple (Pérez, 1993):

$$f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \leq \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2) \quad \forall \lambda \in [0,1] \quad \text{Ecuación 4.12}$$

O será cóncava si se cumple:

$$f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2) \quad \forall \lambda \in [0,1] \quad \text{Ecuación 4.13}$$

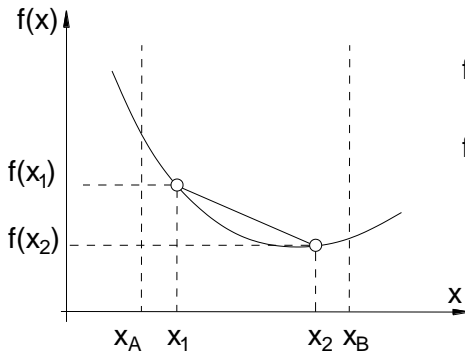


Figura 4.5 (a)

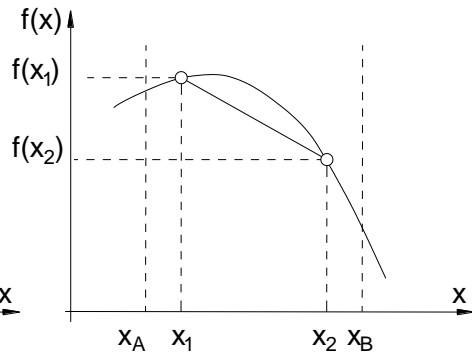


Figura 4.5 (b)

**Figura 4.5. Gráficas de funciones cóncavas y convexas de una dimensión**

Estos conceptos pueden ser extendidos a funciones de  $n$  variables. Si  $x$  es un vector de  $n$  dimensiones y  $f(x)$  una función del mismo, se verifica que la función es convexa en un subconjunto  $S \subset R^n$  si para cualquier par de puntos  $x_1$  y  $x_2$  de  $S$  se cumple la condición:

$$f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \leq \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2) \quad \forall \lambda \in [0,1] \quad \text{Ecuación 4.14}$$

Una función  $f(x)$  es estrictamente convexa en un subconjunto  $S \subset R^n$  si para cualquier par de puntos  $x_1$  y  $x_2$  de  $S$  se cumple:

$$f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) < \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2) \quad \forall \lambda \in ]0,1[ \quad \text{Ecuación 4.15}$$

Y para el caso de una función cóncava se tendrá una expresión análoga cambiando el sentido de desigualdad.

En problemas de optimización con espacios de  $n$  dimensiones, que corresponden a las variables de decisión, las restricciones del modelo definen subconjuntos

dentro de  $R^n$  que acotan el dominio de definición de las funciones a optimizar dentro de los cuales se encuentran las posibles soluciones; por esta razón se conocen con el nombre de *espacio de soluciones*.

Se dice que un problema de optimización es convexo si el espacio de soluciones  $S \subset R^n$  es convexo y además la función objetivo  $f(x)$  a minimizar es convexa en  $S$ , o bien la función objetivo  $f(x)$  a maximizar es cóncava en  $S$ . Por tanto, se puede demostrar que un problema de optimización convexo en el caso de poseer algún óptimo, éste será global (no posee óptimos locales).

#### *4.3.1.1 Problema del diseño*

Los problemas de optimización se componen generalmente de tres componentes que se representan a través de elementos fundamentales como lo describe Pérez (1993):

- ✓ La función objetivo. Es la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se va a optimizar (maximizar o minimizar) expresada en función de las variables de decisión. En el caso que nos ocupa, la función objetivo viene dada por las funciones de costo descritas en epígrafes anteriores.
- ✓ Las variables de decisión. Simbolizan las decisiones que se pueden tomar para afectar el valor de la función objetivo, se modifican para resolver el problema. En el caso de los problemas de diseño de redes hidráulicas, son variables de decisión, por ejemplo, los diámetros de las distintas conducciones.
- ✓ Las restricciones. Son el conjunto de leyes de comportamiento del sistema, se representan con desigualdades o ecuaciones que se tienen que cumplir para que la solución se considere factible. Se entiende por restricciones, cuestiones tales como presiones máxima y mínima, velocidades máxima y mínima, diámetros máximo y mínimo, etc.

El conjunto formado por la función objetivo y las restricciones se denomina modelo matemático, que es una abstracción simplificada del comportamiento de los elementos que la componen y de las relaciones que existen entre ellos. Luego que se construye y ejecuta el modelo matemático de la red es posible encontrar soluciones. La *optimización local* obtiene soluciones que contienen algún mínimo local (cercano), mientras que la *optimización global* encontrará una mejor solución entre todas las posibles.

*Naturaleza de las variables de diseño.*

- *Primera categoría*, (variables discretas). El objetivo es encontrar un conjunto de parámetros de diseño mínimos o máximos sujetos a ciertas limitaciones que hacen una función determinada de estos parámetros. Un ejemplo será la definición de los diámetros mínimos de una red, sujetos a cierta limitación de presión de trabajo.
- *Segunda categoría*, (variables continuas). Se basa en encontrar un conjunto de parámetros de diseño que son funciones continuas de algún otro parámetro, que reduce al mínimo la función objetivo de un conjunto de restricciones.

El problema de optimización económica puede ser formulado matemáticamente en forma general, con las expresiones:

Objetivo:

$$\text{Minimizar costo: } f(\bar{H}, \bar{D})$$

**Ecuación 4.16**

Sujeto a:

- |   |   |   |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Las ecuaciones de continuidad</li> <li>b) Conservación de la energía</li> <li>c) Límites de altura</li> <li>d) Restricciones de diseño</li> <li>e) Restricciones generales</li> </ul> | } | $G = (H, D) = 0$ $H_{m\acute{a}x} > H > H_{m\acute{i}n}$ $j(D)_{m\acute{a}x} \geq j(D) \geq j(D)_{m\acute{i}n}$ $w(H, D)_{m\acute{a}x} \geq w(H, D) \geq w(H, D)_{m\acute{i}n}$ |
|---|---|---|

Donde  $H$  representa un vector compuesto por las alturas piezométricas en los nudos de la red ( $H_1, H_2, \dots, H_N$ ) y  $D$  es un vector ( $D_1, D_2, \dots, D_M$ ) cuyos elementos son las variables de decisión que intervienen en el diseño. Corresponden por lo general a las dimensiones de elementos del sistema como diámetro de las tuberías, potencia de las estaciones de bombeo, volumen y altura de los depósitos, etc. En la función objetivo  $f(H, D)$  se consideran las dimensiones de todos los elementos de la red.

Las restricciones funcionales a que se somete el modelo son las leyes físicas que gobiernan el comportamiento del sistema, como la ecuación de continuidad y conservación de la energía, expresadas como ecuaciones del tipo  $G(H, D) = 0$ . Las desigualdades c), d) y e) son condiciones de funcionamiento que se impone el

proyectista. Las condiciones c) representan los límites superior e inferior de la altura piezométrica en los nudos del sistema. El límite inferior  $H_{min}$  está especificado por las necesidades del suministro en los nudos de consumo y el límite superior  $H_{máx}$ , será función de la resistencia de las tuberías o de la instalación alimentada desde los nudos de consumo. Las restricciones de diseño d) definen una acotación entre valores extremos de los parámetros de diseño, tal es el caso de diámetros mínimos y máximos. Las restricciones de tipo e) expresan los límites impuestos sobre determinadas variables dependientes de  $H$  y  $D$ , como es el caso de la velocidad máxima y la velocidad mínima.

Se describen a continuación algunas de las técnicas de optimización analítica.

#### **4.3.2. Programación Lineal (PL)**

En el año 1947 Dantzig del Departamento de la Fuerza Aérea de USA inició los estudios sobre Programación Lineal (PL). Fue Koopmans en el año de 1951 quien formuló el primer trabajo sobre PL, que se conoce con el nombre de método Simplex. En ingeniería, un sin número de problemas buscan la asignación de recursos limitados y costosos para obtener los mejores resultados (Ramos et al., 2010). Esto conlleva la maximización de beneficios o minimización de costos. Se busca encontrar magnitudes no negativas que optimicen una función lineal expresada en términos de magnitudes. En el área de recursos hídricos, por ejemplo, los flujos de descarga, los problemas de transporte, serán posible describirlos con relaciones lineales.

Hillier y Lieberman (2010) comentan que un valor más favorable de la función objetivo, significa el valor más grande si la función objetivo debe maximizarse, o el valor más pequeño si la función objetivo debe minimizarse. En la formulación del problema de dimensionado óptimo con PL para redes ramificadas han contribuido diversos investigadores como Labye (1966), Karmeli et al. (1968), Calhoun (1970), Robinson y Austin (1976) quienes implementaron un modelo de dimensionado de redes ramificadas con PL. En otros trabajos se consideraron válvulas reductoras de presión usando también PL (Bhave, 1979; Pleban y Amir, 1981).



---

*Modelo de Programación Lineal para dimensionar una red ramificada alimentada con altura de cabecera conocida*

Se trata de dimensionar en forma óptima los diámetros de una red ramificada formada por  $n$  líneas, con altura de alimentación  $H_o$  en el nudo cabecera (nudo 0). Este nudo de cabecera posee un valor fijo conocido, de modo que en un conjunto de nudos  $k$  de la red, en el que se incluyen al menos todos los nudos terminales, exista una altura piezométrica mayor o igual a un valor mínimo  $H_k$ . Que equivale a limitar la pérdida de carga en los trayectos comprendidos entre el nudo 0 y un nudo genérico  $k$ . Por tanto, el problema queda expresado con:

$$\sum_{i \in S_k} h_{f,i} \leq H_o - H_k = \Delta H_k \quad \text{Ecuación 4.17}$$

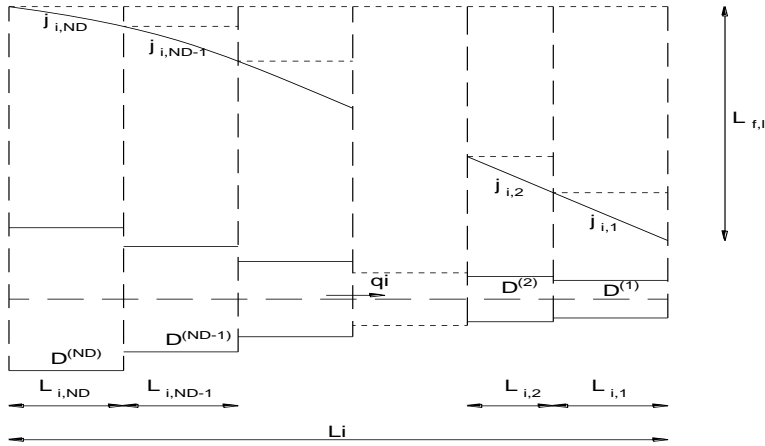
Donde  $h_{f,i}$  representa la pérdida de carga en la línea  $i$  [m],  $S_k$  es el conjunto de líneas pertenecientes al trayecto entre los nudos 0 y  $k$ ,  $\Delta H_k$  simboliza la máxima pérdida de carga admisible en el trayecto entre nudos 0 y  $k$  [m].

La pérdida de carga total  $h_{f,i}$  que se ocasiona en la línea  $i$  será:

$$h_{f,i} = \sum_{k=1}^{NL} J_{i,k} \cdot L_{i,k} \quad \text{Ecuación 4.18}$$

Donde  $J_{i,k} \cdot L_{i,k}$  representa la pérdida de carga unitaria para cada uno de los diámetros  $D_i$  [m/m] en la línea  $i$ .

La Figura 4.6 representa una línea  $i$  cualquiera de una red, por donde trasiega un caudal  $q_i$ , formada por tramos de diferentes diámetros candidatos  $\{D^{(1)}, \dots, D^{(NL)}\}$  ordenados de menor a mayor tamaño, que serán el total de número de diámetros posibles a emplear en la red.



Fuente: Pérez (1993)

Figura 4.6. Línea formada por varios tramos de diversos diámetros

El costo total de las tuberías de la línea  $k$ , será:

$$C_T = \sum_{j=1}^{NL} C_j \cdot L_{i,j} \quad \text{Ecuación 4.19}$$

Donde  $C_T$  representa el costo total de tuberías de línea  $j$  [USD],  $C_j$  expresa el costo unitario del diámetro  $D_i$  [USD/metro lineal],  $L_{i,j}$  será la longitud del tramo de diámetro  $i$ , en la línea  $j$  [m].

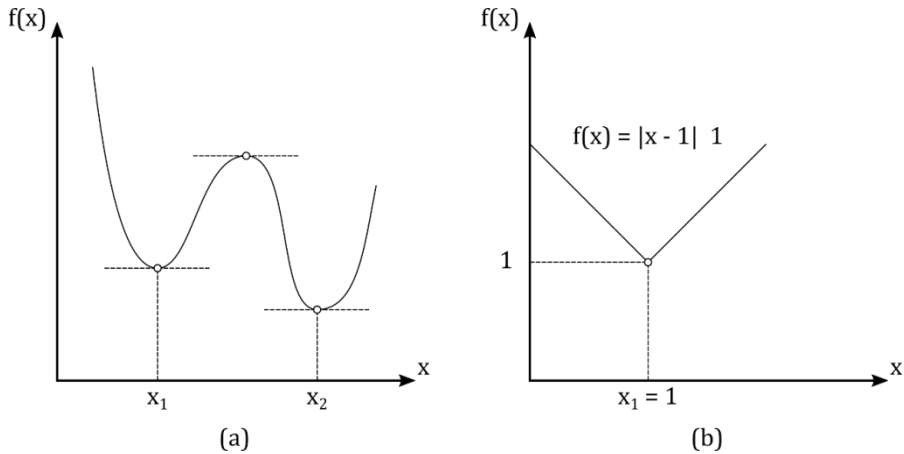
Se debe cumplir que la suma de longitudes parciales  $L_{i,j}$  sea igual a la longitud  $L_i$  de la línea  $j$ :

$$L_j = \sum_{j=1}^{ND} L_{i,j} \quad \text{Ecuación 4.20}$$

#### 4.3.3. Programación No Lineal (PNL)

Los problemas de optimización no lineal son más complejos de resolver que los problemas lineales (Castillo et al., 2002). El óptimo de una función (ya sea máximo o mínimo) se caracteriza porque su derivada es cero. Esto implica que, si un problema presenta un mínimo, en este punto la recta tangente a la función es horizontal. Esto se puede observar en la Figura 4.7 (a). Existen otros tipos de

problemas en los que los mínimos relativos no satisfacen la condición anterior. Por ejemplo, en la Figura 4.7(b) se muestra una función cuyo mínimo no cumple con esta condición. Este es solo un ejemplo de la dificultad de la caracterización de los candidatos a mínimo. En un problema en general, la función no necesariamente tiene una recta tangente. Así, para poseer esta característica la función debe ser continua y diferenciable.



Fuente: Castillo et al. (2002)

**Figura 4.7. Mínimos locales y globales**

La principal diferencia entre programación lineal y programación no lineal es la existencia de los llamados mínimos locales, en donde se optimiza la función objetivo en un entorno, pero no en toda la región factible. En la Figura 4.7 (a), se observa este fenómeno: el punto  $x_1$  es un mínimo en su entorno ya que para cualquier valor de  $x$  tal que  $|x - x_1| < \epsilon$ , con  $\epsilon$  suficientemente pequeño, se cumple:

$$f(x) > f(x_1) \quad \text{Ecuación 4.21}$$

Sin embargo, al considerar todo el espacio, existe la posibilidad de encontrar otro valor que haga que la función sea inferior  $f(x_1)$ , como es el caso del punto  $x_2$  en esa misma figura.

A la complejidad que puede suponer encontrar los mínimos de una función hay que añadir la posibilidad de que existan restricciones, es el caso de los sistemas hidráulicos en los que se imponen límites a presiones y velocidades. Si la función

que se pretende optimizar o alguna de sus restricciones no son lineales, se tratará de un problema de Programación No Lineal (PNL).

Según las características de las funciones se encuentran muchos tipos de problemas de PNL, que se resuelven a través de diversos algoritmos. En los tipos en donde las funciones tienen formas simples, los problemas pueden solucionarse de manera eficiente utilizando fórmulas matemáticas que permiten identificar los óptimos de la función. Sin embargo, en otros casos resolverlos constituye un desafío y se recurre a métodos numéricos.

Dado un problema de optimización con  $n$  variables y  $m$  restricciones, es posible clasificar los algoritmos de optimización basados en PNL en función del tamaño del problema resuelto:  $[n]$ ,  $[m]$ ,  $[n+m]$ ,  $[n-m]$ .

Uno de los métodos más eficientes para resolver el problema que se pretende en este trabajo de investigación es el propuesto por Lasdon, Fox & Ratner (1974) denominado Método de Gradiente Reducido Generalizado (GRG) que se usa para resolver problemas de PNL de estructura general. Este método emplea la eliminación implícita de las variables de decisión para reducir el problema a un tamaño  $[n-m]$ .

Si se tiene el problema genérico:

$$\begin{array}{ll} \text{Min} & f(x) \\ \text{Sujeto a} & g(x) - b = 0 \\ \text{Con} & x^T = \{x_1, x_2\} \end{array}$$

La derivada de esta función se puede escribir como:

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{\partial f(x)}{\partial x_1} \cdot dx_1 + \frac{\partial f(x)}{\partial x_2} \cdot dx_2 \quad \text{Ecuación 4.22}$$

Para garantizar que la restricción se cumple, no debe haber cambio efectivo en la misma:

$$dg(x) = \frac{\partial g(x)}{\partial x_1} \cdot dx_1 + \frac{\partial g(x)}{\partial x_2} \cdot dx_2 = 0 \quad \text{Ecuación 4.23}$$

De esta última ecuación es posible despejar el valor de  $dx_2$  y dejarlo en función de  $dx_1$ :

$$dx_2 = -\frac{\partial g(x)/\partial x_1}{\partial g(x)/\partial x_2} \cdot dx_1 \quad \text{Ecuación 4.24}$$

Y sustituyendo nuevamente en [4.22]:

$$\frac{df(x)}{dx} = \left[ \frac{\partial f(x)}{\partial x_1} - \frac{\partial f(x)}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial g(x)/\partial x_1}{\partial g(x)/\partial x_2} \right] \cdot dx_1 \quad \text{Ecuación 4.25}$$

Al término entre corchetes se le denomina gradiente reducido de  $f(x)$ :

$$\frac{df_R(x)}{dx_1} = \left[ \frac{\partial f(x)}{\partial x_1} - \frac{\partial f(x)}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial g(x)/\partial x_1}{\partial g(x)/\partial x_2} \right] \quad \text{Ecuación 4.26}$$

Esta definición es fácilmente extensible a una función  $n$ -dimensional sujeta a  $m$  restricciones sin más que dividir las  $n$  variables en dos grupos: variables independientes ( $z$ ) y variables dependientes ( $y$ ):

$$\nabla f_R^T = \nabla f(z)^T - \nabla f(y)^T \left( \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right)^{-1} \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad \text{Ecuación 4.27}$$

El gradiente reducido ha de interpretarse como la dirección creciente más pronunciada en la cual se garantizan las restricciones.

El método del gradiente reducido generalizado es un algoritmo numérico que busca la evolución de la función objetivo a lo largo de la zona factible de forma que el valor de la función objetivo siempre disminuya sin violar ninguna restricción. Este algoritmo se puede sintetizar en los siguientes pasos:

**Paso 1.** La parte fundamental de este método es que todas las soluciones se han de encontrar en la zona factible. Por ello, el primer paso consiste en encontrar un punto que se halle dentro de la zona factible. Por ejemplo, en un problema de diseño de redes con restricciones de presión mínima, comenzar con los máximos diámetros posibles garantizará la factibilidad de esta primera solución. A partir de esta solución inicial, se calculan tanto el valor de la función objetivo como las distintas restricciones.

**Paso 2.** El algoritmo solo considera aquellas restricciones activas, esto es, las restricciones de igualdad o las de desigualdad que se encuentren en su límite. En este último caso, para cada restricción de desigualdad activa se añadirá una variable de holgura que convierta la desigualdad en igualdad.

**Paso 3.** Se dividen las variables de decisión entre variables dependientes (vector  $y$ ) y variables independientes (vector  $z$ ). El número de variables dependientes serán el mismo que el número de restricciones activas. Además, cualquier variable con un valor coincidente con su límite debe definirse como variable independiente. Es el caso de las variables de holgura definidas.

**Paso 4.** Se calcula el gradiente reducido generalizado tal y como se ha definido en la ecuación [4.26].

**Paso 5.** Calcular la dirección de búsqueda a partir del gradiente reducido.

**Paso 6.** Actualizar los valores de las variables de decisión a lo largo de la dirección de búsqueda. En primer lugar, se actualizarán los valores de las variables independientes para posteriormente obtener las variables dependientes en función de aquellas.

**Paso 7.** Con los valores obtenidos se comprueban las restricciones y, si alguna se viola, se busca la solución que haga que esta restricción se satisfaga en su límite, haciendo en este caso que la variable de holgura se iguale a 0.

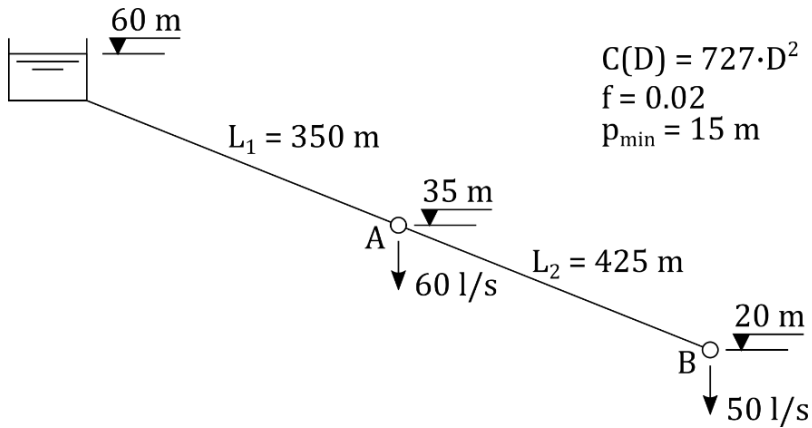
**Paso 8.** La búsqueda a lo largo de la dirección de búsqueda puede llevar a tres posibilidades:

- a) Se alcanza el mínimo en la dirección de búsqueda.
- b) Alguna de las variables dependientes obtiene un valor extremo (máximo o mínimo).
- c) Una restricción inactiva se convierte en activa.

En cualquiera de estos casos, el problema cambia y se procede a una nueva iteración.

**Paso 9.** Criterio de terminación. Si en algún momento el gradiente reducido en un punto toma un valor de 0, se cumplirán las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) y, por tanto, se habrá alcanzado un óptimo global.

Para comprender mejor el algoritmo, se propone un sencillo ejemplo de diseño de una red hidráulica, representada en la Figura 4.8:



**Figura 4.8.** Red ejemplo para aplicar PNL

Se trata de diseñar la red propuesta mediante relaciones no lineales. La PNL puede ser aplicada para encontrar soluciones óptimas que dependan de los diámetros como variables de decisión. Existen diversos métodos de PNL para resolver problemas en Ingeniería (Cortés-Martínez, Treviño-Cansino, Alcorta-García, Sáenz-López, & González-Barrios, 2015). En este caso se seleccionó el método de Gradiente Reducido Generalizado (GRG) descrito anteriormente. Si el costo unitario de cada diámetro se formula como una función continua del diámetro, del tipo:

$$C_j = A \cdot D_j^b \quad \text{Ecuación 4.28}$$

Donde  $C_j$  representa el costo unitario del diámetro [\$],  $D_j$  es el diámetro [mm],  $A$ ,  $b$  simbolizan las constantes que dependen del material de tubería y de la presión. Esta función se obtiene por ajuste de mínimos cuadrados de los valores de precio – diámetros comerciales. En el presente estudio se emplea un único material y timbraje de tubería, por tanto,  $A$  y  $b$  son constantes en todas las conducciones de las redes.

La función objetivo a minimizar mediante la PNL en el problema estudiado es el costo total de las tuberías de la red, que depende de los diámetros a asignar a cada tramo, y se describe como sigue:

$$C_T = \sum_{j=1}^{NL} A \cdot L_j \cdot (D_j)^b \quad \text{Ecuación 4.29}$$

La configuración de la red ejemplo es ramificada, con un solo tipo de material, una sola presión nominal de tubería y una única fuente de alimentación (embalse). Se estima como restricción la presión mínima en cada hidrante por turno, considerando el número de turnos ( $t$ ), la ubicación de la fuente de alimentación y su altura piezométrica establecida. Así, para cada turno  $t$  y cada nudo  $n$  esta restricción se puede presentar como (ecuación 4.30):

$$\sum_{j \in S_k} hf_{j,k,t} = \sum_{j \in S_k} R_j \cdot q_{j,t}^2 \cdot D_j^{-5} \quad \text{Ecuación 4.30}$$

En esta ecuación,  $hf_{j,k,t}$  representa las pérdidas de carga de la tubería  $j$  perteneciente al trayecto  $k$  en el turno  $t$ . Para cada nudo se puede definir un trayecto entre la fuente de alimentación y el propio nudo. Al tratarse de redes ramificadas, este trayecto será único,  $R_j$  indica las pérdidas de carga en el tramo o línea  $j$  perteneciente al trayecto  $k$  en el turno  $t$ ,  $S_k$  simboliza al conjunto de líneas que pertenecen al trayecto  $k$ ,  $q_{j,t}$  es el caudal de trasiego por la línea  $j$  en el turno  $t$  y  $D_j$  define el diámetro de cada línea de la red.

Expresando  $R_j$  para el caso de las pérdidas de carga por Darcy Weisbach, quedará la siguiente expresión:

$$R_j = \frac{8 \cdot f_j \cdot L_j}{\pi^2 \cdot g} \quad \text{Ecuación 4.31}$$

Donde  $R_j$  define la pérdida de carga de un tramo de la red [m],  $f_j$  es el factor de fricción del mismo y  $L_j$  es la longitud del tramo [m].

Por lo tanto, en este caso, la función objetivo vendrá dada por la función:

$$X^{(0)} = \{1.0 ; 1.0\} \quad \text{Ecuación 4.32}$$

$$f(X) = 254450 \cdot X_1^2 + 308975 \cdot X_2^2 \quad \text{Ecuación 4.33}$$

Las restricciones vienen definidas por la presión mínima admisible en cada uno de los nudos A y B:



$$0.006998 \cdot X_1^{-5} \leq 10 \quad \text{Ecuación 4.34}$$

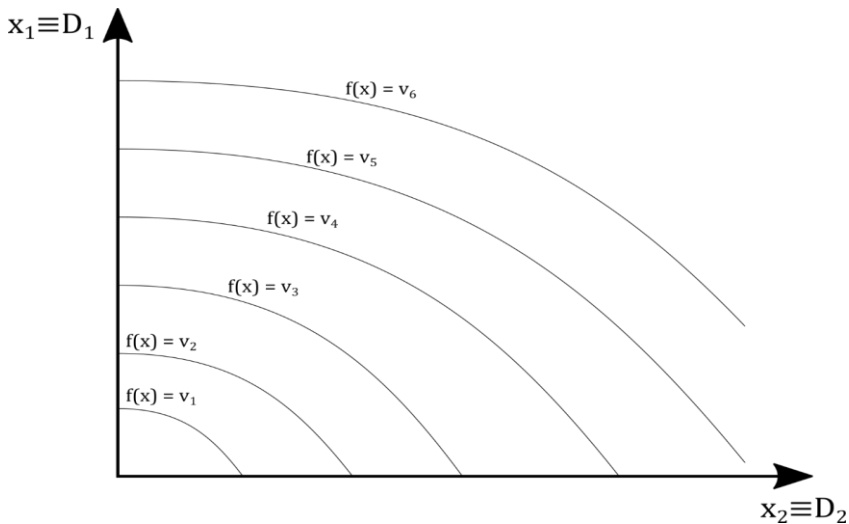
$$0.006998 \cdot X_1^{-5} + 0.001756 \cdot X_2^{-5} \leq 25 \quad \text{Ecuación 4.35}$$

Operando quedará:

$$g_1(X) = X_1 - 0.2339 \geq 0 \quad \text{Ecuación 4.36}$$

$$g_2(X) = 25 - 0.006998 \cdot X_1^{-5} - 0.001756 \cdot X_2^{-5} \geq 0 \quad \text{Ecuación 4.37}$$

La Figura 4.9 representa líneas con distintos valores de la función objetivo, es decir, isovalores de  $f(X)$ . En esta misma figura se puede observar que la función objetivo es una función convexa.



**Figura 4.9. Diversos valores de la Función Objetivo**

El método GRG es un método numérico que precisa de un valor inicial para comenzar a operar. A partir de éste, se siguen los pasos establecidos hasta alcanzar los criterios de terminación.

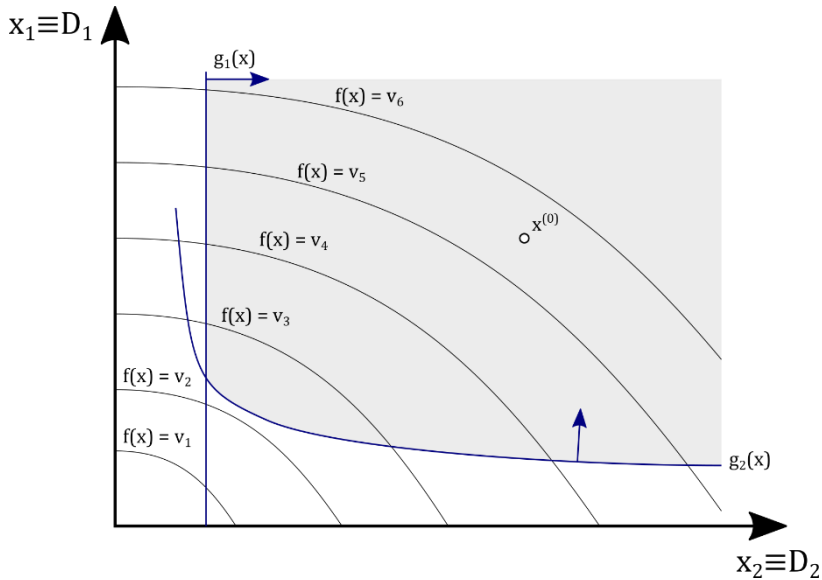
*Paso 1.* Se comienza por una solución factible, la cual se irá mejorando progresivamente. Por ejemplo, cuando se parte de:

$$f(X^{(0)}) = 254450 \cdot 1.0^2 + 308975 \cdot 1.0^2 = 563\,425.00 \quad \text{Ecuación 4.38}$$

$$g_1(X^{(0)}) = 0.7661 > 0 \quad \text{Ecuación 4.39}$$

$$g_2(X^{(0)}) = 25 - 0.006998 \cdot 1.0 - 0.001756 \cdot 1.0 = 24.991 > 0 \quad \text{Ecuación 4.40}$$

*Paso 2.* En esta primera iteración, al no tener ninguna restricción activa no es necesario contar con las variables de holgura. Dicho de otra forma, ahora no se cuenta con ninguna restricción que condicione la solución. En la Figura 4.10 se muestra el punto inicial adoptado, las restricciones y el espacio de búsqueda (zona donde las soluciones son factibles y cumplen con todas las restricciones).



**Figura 4.10.** Punto inicial, restricción y espacio de búsqueda

*Paso 3.* Como las restricciones no están activas, se seleccionan como variables independientes las que representan los diámetros de las conducciones,  $X_1$  y  $X_2$ .

*Paso 4.* Se evalúa el gradiente de la función objetivo:

$$\nabla f = \left\{ \frac{\partial f}{\partial X_1} ; \frac{\partial f}{\partial X_2} \right\} = \{508900 \cdot X_1 ; 617950 \cdot X_2\} = \{508900 ; 617950\} \quad \text{Ecuación 4.41}$$

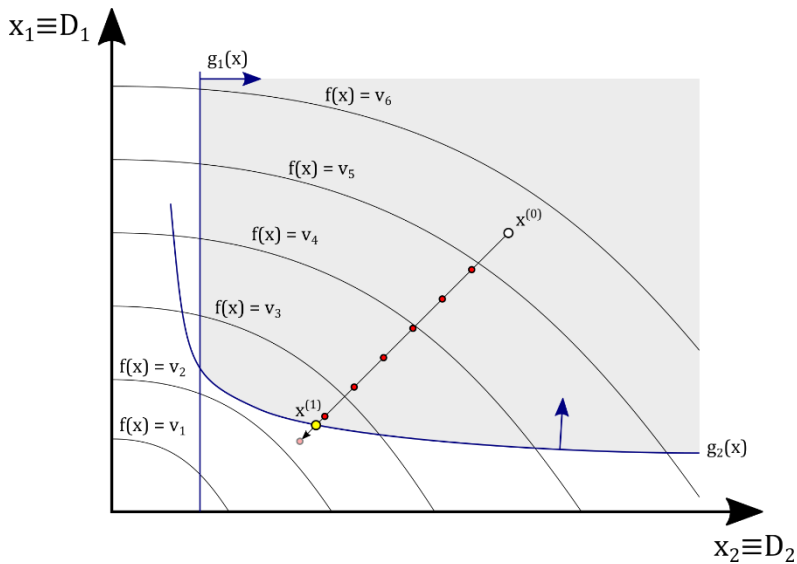
*Paso 5.* Se calcula la dirección de avance como la del gradiente de la función objetivo en el punto seleccionado, con el correspondiente signo. Al ser un problema de minimización, la dirección de búsqueda vendrá dada por:

$$s = -\frac{\nabla f(X^{(0)})}{\|\nabla f(X^{(0)})\|} = \{-0.6357 ; -0.7719\} \quad \text{Ecuación 4.42}$$

*Paso 6.* Se exploran los nuevos valores de las variables independientes a lo largo de la dirección de búsqueda. Esto convierte el problema en una búsqueda unidimensional:

$$X^{(1)} = X^{(0)} + \alpha \cdot s = \begin{bmatrix} 1.0 \\ 1.0 \end{bmatrix} + 1.0 \cdot \begin{bmatrix} -0.6357 \\ -0.7719 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3643 \\ 0.2281 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 4.43}$$

La Figura 4.10 representa la dirección de búsqueda para esta fase del problema: *Paso 7.* Se continua la búsqueda a lo largo de la dirección de búsqueda hasta encontrar alguna restricción. En este caso, la restricción pasa a estar activa y la búsqueda viene condicionada por ella. De esta manera se localiza el punto que se viola y a partir de este punto se utilizará el gradiente reducido. La Figura 4.11 muestra este caso, donde  $x^{(1)}$  marca el inicio de la nueva iteración:



**Figura 4.11. Violación de las restricciones impuestas**

A partir de este punto comenzaría una nueva iteración en la que es necesario utilizar el gradiente reducido, reduciendo el número de variables mediante eliminación implícita. Como resultado de la intersección entre la dirección de búsqueda y la restricción violada [en el caso del ejemplo  $g_2(X)$ ] se obtiene el siguiente punto de cálculo:

$$X^{(1)} = \{0.301 ; 0.151\} \quad \text{Ecuación 4.44}$$

Con este punto se iniciaría una nueva iteración:

*Paso 1.* Punto factible de partida:

$$X^{(1)} = \{0.301 ; 0.151\} \quad \text{Ecuación 4.45}$$

*Paso 2.* Se calcula tanto el valor de la función objetivo como de las restricciones:

$$f(X^{(1)}) = 254450 \cdot 0.301^2 + 308975 \cdot 0.151^2 = 30\,119.45 \quad \text{Ecuación 4.46}$$

$$g_1(X^{(1)}) = 0.067 > 0 \quad \text{Ecuación 4.47}$$

$$g_2(X^{(1)}) = 25 - 0.006998 \cdot 0.301^{-5} - 0.001756 \cdot 0.151^{-5} - X_3 = 0 \quad \text{Ecuación 4.48}$$

La restricción  $g_2$  se convierte en una restricción activa y se añade la variable de holgura  $X_3$ . De esta forma, esta restricción permite definir una variable dependiente ( $X_1$  ó  $X_2$ ) en función de las variables independientes.

*Paso 3.* Se dividen las variables entre dependientes ( $X_1$ ) e independientes ( $X_2$  y  $X_3$ ):

$$y = \{X_1\} \quad \text{Ecuación 4.49}$$

$$z = \{X_2 ; X_3\} \quad \text{Ecuación 4.50}$$

$$\Psi = \{g_2(X)\} \quad \text{Ecuación 4.51}$$

*Paso 4.* Se evalúa el gradiente reducido. La siguiente solución se ha de calcular como:

$$z^{i+1} = z^i + \alpha \cdot s = z^i - \alpha \cdot \frac{\nabla f_R(X)}{|\nabla f_R(X)|} \quad \text{Ecuación 4.52}$$

Las siguientes iteraciones hasta alcanzar el óptimo (punto  $X^{(ópt)}$ ) se aprecian en la Figura 4.12:

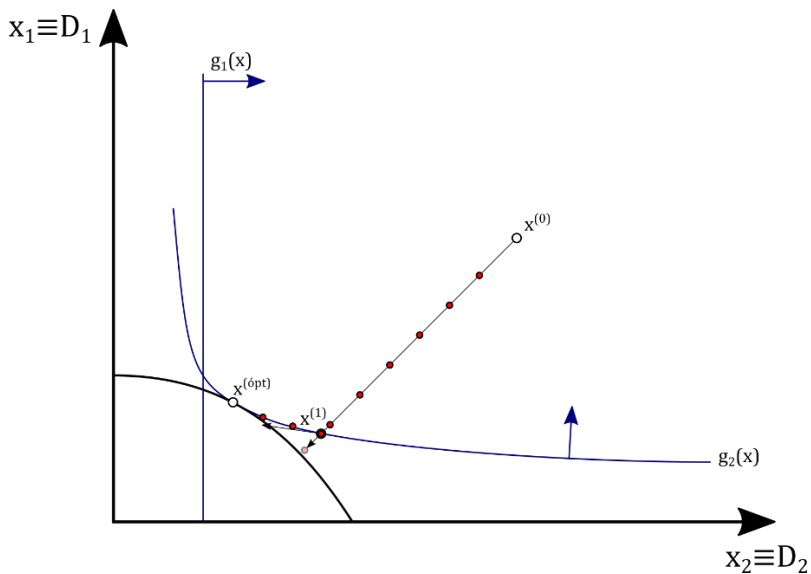


Figura 4.12. Función objetivo no excede el valor adoptado como umbral

El algoritmo se transforma en uno con las siguientes características: trabaja únicamente con las restricciones activas (esto facilita el cálculo en forma considerable), la función objetivo  $f$  se optimiza en cada intersección de las restricciones mediante el método de Davidon-Fletcher-Powell (modificación del gradiente conjugado de Abadie), se espera hasta que el algoritmo de Newton converge.

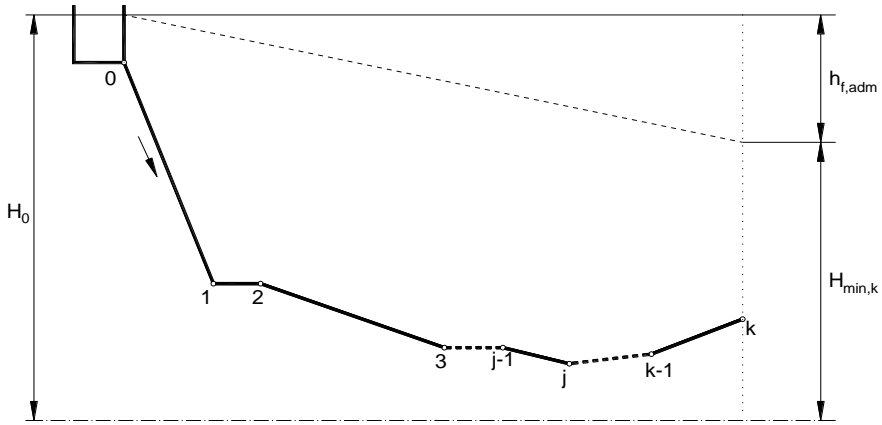
#### **4.3.4. Serie Económica Mejorada (SEM)**

El Método de la Serie Económica Mejorada introducido por González y Aliod (2003), se fundamenta en la consideración de que el diámetro de las tuberías es una variable de tipo continua, combina y generaliza desarrollos previos por autores como Labye (1966), Munizaga (1976), y Pérez (1993) y se encuentra documentado en González (2006). Sus principales aportes son:

1. Se generaliza el método para superar la restricción tradicional que considera un único exponente de la función exponencial de ajuste del costo de las tuberías con sus diámetros en cada línea de la serie. Para lo cual se extiende el algoritmo en presencia de diferentes materiales y timbrajes de las tuberías en una misma serie, ya que es habitual que se combinen diferentes materiales y timbrajes en una misma red.
2. Se generaliza el método para poder trabajar con formulaciones diferenciadas para el cómputo de la pérdida de carga para cada tramo (por ejemplo, debido a la diversidad de rugosidad y expresión de pérdida de carga recomendada para distintos materiales).
3. Se incluyen condiciones de presión en las bifurcaciones.
4. Se incorporan criterios optimizados de normalización de los diámetros teóricos obtenidos, mediante criterios de máxima ganancia de presión por unidad de costo de tipo Labye.

El problema que se aborda con el Método de la Serie Económica Mejorada, MSE-M, es el dimensionado económico de una serie de tuberías, conociendo los caudales de línea y debiendo satisfacerse una única restricción de presión mínima en el extremo aguas abajo de la serie, todo esto bajo la hipótesis de diámetros continuos. Para ello se dimensionan los trayectos de tuberías con la formulación que se describe a continuación, y seguidamente se normalizan los diámetros para obtener el diseño final.

La serie de tuberías a dimensionar transcurre entre un nudo de alimentación llamado  $0$ , cuya altura piezométrica es  $H_0$ , y un nudo extremo aguas abajo  $k$ , siendo  $S_k$  el conjunto de líneas del trayecto (serie) (ver Figura 4.13).



Fuente: González (2006)

**Figura 4.13. Serie de tuberías alimentada desde depósito de nivel fijo**

La pérdida de carga en la línea  $j$  se calcula con la expresión:

$$\sum_{j \in S_k} h_{f,j} \leq h_{f,adm} = H_0 - H_{min,k} \quad \text{Ecuación 4.53}$$

Donde  $h_{f,j}$  es la pérdida de carga en la línea  $j$  de la serie  $k$ ,  $h_{f,adm}$  representa la pérdida de carga admisible en toda la serie, siendo igual a la diferencia entre la altura piezométrica en cabecera ( $H_0$ , conocida) y la altura piezométrica mínima que se desea conseguir en el nudo extremo de la serie ( $H_{min,k}$ , también conocida). En general es posible expresar la pérdida de carga en la línea  $j$  como:

$$h_{f,j} = M_j L_j q_j^{m_j} D_j^{-r_j} \quad \text{Ecuación 4.54}$$

Donde  $L_j$  simboliza a la longitud de la línea  $j$ ,  $D_j$  define su diámetro,  $q_j$  es el caudal circulante y  $M_j$  es un factor que depende, al igual que los exponentes  $m_j$  y  $R_j$ , de la formulación de pérdidas que se utilice. Para estimar la pérdida de carga con Darcy-Weisbach, se tiene:

$$m_j = 2 \quad R_j = 5 \quad \text{y} \quad M_j = \frac{8}{\pi^2 g} f_j \quad \forall j \in S_k^N, \text{ siendo } f_j \text{ el factor de fricción de la línea}$$

$j$ .

El costo de cada una de las líneas  $j$  por dimensionar se obtiene con:

$$C_j = A_j D_j^{a_j} L_j \quad \text{Ecuación 4.55}$$

Donde los coeficientes  $A_j$  y  $a_j$  son específicos para cada línea, y la función de costo no tiene por qué ser la misma para todas las líneas. El costo total de diseño de la serie de tuberías nuevas de la serie será:

$$C_T = \sum_{j \in S_k} C_j = \sum_{j \in S_k} A_j D_j^{a_j} L_j \quad \text{Ecuación 4.56}$$

La optimización en este caso se establece como la función objetivo a minimizar:

$$\text{Minimizar } C_T = \sum_{j \in S_k} A_j D_j^{a_j} L_j \quad \text{Ecuación 4.57}$$

$$\text{Sujeto a } \sum_{j \in S_k} M_j L_j q_j^{m_j} D_j^{-r_j} \leq h_{f,adm} \quad \text{Ecuación 4.58}$$

Donde, cada tramo  $j$  de la serie contempla unos coeficientes  $A$ ,  $a$ ,  $M$ ,  $m$ ,  $r$  diferentes.  $A$  y  $a$  son características constantes que estarán en función del material de conducción, de la presión de trabajo, etc.

La **Ecuación 4.58** se traduce en que las pérdidas de carga de todos los trayectos que llegan a cada nudo, deben ser menores que la pérdida de carga admisible.

Tras resolver este problema con el método de optimización de los Multiplicadores de Lagrange, se usa una función auxiliar Lagrangiana del tipo:



$$\ell(D_j, \lambda_k) = \sum_{j \in S_k} A_j D_j^{a_j} L_j + \lambda_k \left( \sum_{j \in S_k} M_j L_j q_j^{m_j} D_j^{-R_j} - h_{f,adm} \right) \quad \text{Ecuación 4.59}$$

En donde las variables independiente son los diámetros de las tuberías  $D_j$  y el multiplicador de Lagrange  $\lambda_k$  que corresponde a la restricción de presión en la serie. Cuando se anulan las derivadas de esta función respecto de las variables independientes, se obtiene:

$$\left. \begin{aligned} D_j &= \left( \frac{\lambda_k R_j M_j q_j^{m_j}}{A_j a_j} \right)^{\frac{1}{a_j + R_j}} \\ \sum_{j \in S_k} M_j L_j q_j^{m_j} D_j^{-R_j} &= h_{f,adm} \end{aligned} \right\} \quad \text{Ecuación 4.60}$$

Sustituyendo en la segunda ecuación  $D_j$  por el segundo miembro de la primera **Ecuación 4.60**, se tiene:

$$\sum_{j \in S_k} M_j L_j q_j^{m_j} \left( \frac{\lambda_k R_j M_j^* q_j^{m_j}}{A_j a_j} \right)^{\frac{-R_j}{a_j + R_j}} - h_{f,adm} = 0 \quad \text{Ecuación 4.61}$$

El Método de la Serie Económica tradicional considera en la **Ecuación 4.61** que el ajuste de costos  $a$  y que el coeficiente  $R$  que aparece como exponente de las pérdidas de carga son iguales para todas las líneas. Se obtiene, en consecuencia, si  $R$  y  $a$  son constantes.

$$\left. \begin{aligned} a &= a_j = cte \quad \forall j \in S_k^N \\ R &= R_j = cte \quad \forall j \in S_k^N \end{aligned} \right\} \quad \text{Ecuación 4.62}$$

Es posible despejar explícitamente  $\lambda_k$  de [4.61]

$$\lambda_k = \frac{a}{R} \left[ \frac{\sum_{j \in S_k} L_j \left( A_j^r (M_j q_j^{m_j})^a \right)^{\frac{1}{a+R}}}{h_{f,adm}} \right]^{\frac{a+R}{R}}$$

**Ecuación 4.63**

Sin embargo en González y Aliod (2003) se generaliza el método para casos en que  $R$  y  $a$  son diferentes para cada tramo, no siendo posible entonces despejar explícitamente el valor del multiplicador de Lagrange  $\lambda_k$ :

Si no se consideran las simplificaciones ( $a$  y  $R$  constantes) expresadas en **Ecuación 4.62**, la ecuación [4.60] pasa a ser una ecuación implícita para el multiplicador de Lagrange  $\lambda_k$ . La ecuación en  $\lambda_k$  puede resolverse aplicando el método iterativo de Newton-Raphson, en González (2006) se desarrolla el procedimiento para analizar su convergencia.

$$\left. \begin{aligned} f(\lambda_k) &= 0 \\ \lambda_k^{(n)} &= \lambda_k^{(n-1)} - \frac{f(\lambda_k)}{f'(\lambda_k)} \end{aligned} \right\}$$

**Ecuación 4.64**

Como valor inicial  $\lambda_k^{(0)}$  para el método de Newton-Raphson, se puede tomar el valor de  $\lambda_k$  que se obtiene al aplicar las simplificaciones de **Ecuación 4.61** valor que se logra a través de la expresión **Ecuación 4.64**.

La derivada de la función  $f(\lambda_k)$ , necesaria para la aplicación del método de Newton-Raphson, es:

$$f'(\lambda_k) = \sum_{j \in S_k} M_j L_j q_j^{m_j} \left( \frac{R_j M_j q_j^{m_j}}{A_j a_j} \right)^{\frac{-R_j}{a_j+R_j}} \frac{-R_j}{a_j+R_j} \lambda_k^{\frac{-a_j-2R_j}{a_j+R_j}}$$

**Ecuación 4.65**

Tras converger el método de Newton-Raphson en  $n$  iteraciones, se define:

$$\lambda_k^{conv} = \lambda_k^{(n)} \quad \text{Ecuación 4.66}$$

de modo que el valor de los diámetros  $D_j$  buscados, resultan según **Ecuación 4.60**:

$$D_j = \left( \frac{\lambda_k^{conv} R_j M_j a_j^{m_i}}{A_j a_j} \right)^{\frac{1}{a_j + R_j}} \quad \text{Ecuación 4.67}$$

Esta expresión facilita el valor del diámetro de las tuberías del trayecto.

### ***Presión en bifurcaciones***

Para facilitar una presión mínima en las bifurcaciones, que permita el dimensionado eficaz de los ramales que de ahí parten, se establece un requisito de altura piezométrica mínima en bifurcaciones consistente en computar la mínima altura piezométrica demandada por los nudos aguas debajo de la bifurcación, suponiendo una pendiente hidráulica mínima.

### ***Normalización***

Otra mejora que se incorpora en González y Aliod (2003), es la implementación de una variante en el proceso de normalización de los diámetros teóricos, que, en lugar de normalizar al diámetro comercial más próximo explota las ventajas del método de Labye, (Labye, 1966) para la optimización de series de tuberías con diámetros discontinuos.

El planteamiento básico del método discontinuo de Labye consiste en la construcción de la curva característica de la red que se va a dimensionar, y que, en resumen, se describe como la envolvente de las soluciones de mínimo costo. Cada solución representa una combinación de diámetros normalizados en las líneas que proporcionan el menor costo para una determinada pérdida de carga (Pérez, 1993).

Entre las ventajas del planteamiento de Labye se destaca el que permite trabajar con diámetros discretos y comercialmente disponibles, con lo cual no requiere un procedimiento de normalización posterior de los diámetros. Aunque al iniciar el cálculo se desconoce el diámetro que poseerán las líneas, es posible estimar a priori la gama de diámetros entre los que se encuentra el óptimo para cada línea.

Sin embargo, Labye presenta dos inconvenientes fundamentales: El hecho de trabajar con variables discretas exige el manejo de un abultado conjunto de datos, que implica un considerable esfuerzo computacional. Siendo esta la razón por la cual un cálculo manual con un número moderado de líneas, se convierte en impracticable. Otra desventaja a saber es que no permite intuir en modo alguno la existencia de nudos críticos intermedios hasta que no ha sido finalizado el dimensionado de la serie de tuberías y cálculo de las presiones en todos los nudos. Mientras que en el método tradicional de Labye se inicia con la asignación de diámetros más pequeños de la gama previsible para generar la secuencia de tramos a incrementar en diámetro. En el caso de la implementación realizada en el trabajo de González y Aliod, se parte de los diámetros normalizados obtenidos mediante la infra normalización sistemática desde los valores teóricos de la **Ecuación 4.67**.

La infra normalización en todos los tramos conduce a la falta de presión en los nudos de la serie, y la decisión sobre los tramos que reciben incremento de diámetro se efectúa considerando el criterio de máxima ganancia de presión por unidad de costo.

Los algoritmos basados en el MSE, al efectuar una optimización secuencial, serie a serie, satisfaciendo en un primer momento sólo los requisitos de presión extremos de la serie supuestamente mas desfavorable, no contemplan simultáneamente el conjunto de la red y no garantizan la obtención de la solución más económica posible. Si bien, generalmente las soluciones halladas son en la práctica muy próximas a las mínimas teóricas absolutas. A cambio, son relativamente sencillas de implementar y, sobre todo se ejecutan en tiempos muy reducidos de cálculo. Este aspecto es una ventaja decisiva desde el punto de vista ingenieril, ya que se necesita agilidad en la obtención de soluciones para el ensayo de las múltiples variantes del diseño que conciernen a un buen proyecto.

### ***Extensión del Método de la SEM-M al diseño de redes a turnos***

Este método es una extensión del MSE-M (González y Aliod, 2003) y se documenta en García et al. (2011), en donde se aplica un procedimiento iterativo para el dimensionado de sistemas de riego presurizado operando con la modalidad a turnos (tanto para conducciones de redes de distribución general y

conducciones principales de parcela que alimentan los sectores) con altura de cabecera conocida y desconocida.

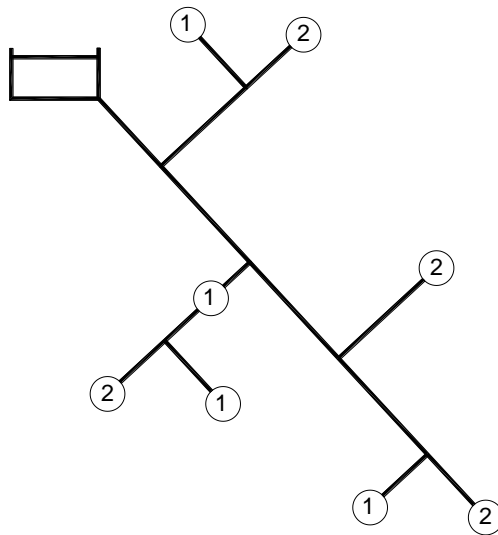
Generalmente en el diseño a turnos se han usado similares técnicas que, en redes a la demanda. Esto es, efectuar un dimensionado independiente para cada turno con caudales de diseño que corresponden al turno en cuestión. Es decir, se considera cada turno como una red de riego en donde el caudal de diseño de cada tramo será la sumatoria de las dotaciones establecidas agua debajo de los hidrantes abiertos. En consecuencia, cada tramo aparece con un diámetro asociado por cada turno. Puesto que el diámetro de diseño del tramo debe ser único, se elige el mayor diámetro en los tramos comunes por criterio de seguridad. Sin embargo, este procedimiento trivial no aprovecha el dimensionado que se ha obtenido en los diámetros comunes aguas arriba forzado por los turnos más desfavorables. Así, por ejemplo, la conducción de cabecera queda fijada con el mayor valor de diámetro de tubería requerido en todos los turnos, pero estará sobredimensionada para los demás turnos, y si el resto de conducciones de los turnos más favorables no tienen en cuenta este hecho, se presentará un sobredimensionado sistemático.

El método aportado por García et al. (2011) y García (2013) supera esta ineficacia. En cada paso del dimensionado se calcula la senda crítica con el criterio de mínima pendiente hidráulica en cada turno, y se selecciona como senda crítica absoluta la menor de todos los turnos, senda que dimensiona en primer lugar. En el dimensionado de esta senda crítica absoluta aparecen las tuberías que son comunes a más de un turno. Por ejemplo, nuevamente la conducción de cabecera queda fijada con el mayor valor de diámetro de tubería requerido en todos los turnos, pero ahora se redimensionan las conducciones del resto de turnos aguas abajo de dicha línea de cabecera con este diámetro forzado, de esta manera es posible reducir los diámetros de los tramos aguas abajo afectados por otros turnos. El procedimiento se itera hasta que todas las líneas quedan dimensionadas.

Para ilustrar el procedimiento se detalla la secuencia que sigue la aplicación de este algoritmo, con un ejemplo de una red sencilla que tiene 8 hidrantes operando a dos turnos y con altura de cabecera conocida (ver Figura 4.14).

En el Paso 1, se identifican las tuberías de la red que faltan por dimensionar en cada turno (se marcan con color azul), y se determina la senda crítica de la red para cada turno, (se marca con color rojo), seleccionando la senda crítica

absoluta, que en este caso es la del turno 2 con valor de 0.004. En el Paso 2, seleccionado el turno (2) que tiene la menor senda crítica, se dimensiona la misma (los tramos dimensionados se marcan con color negro). Paso 3, se determina la senda crítica de los circuitos restantes de cada turno y nuevamente se selecciona la de menor valor como senda crítica absoluta, en este caso también en el Turno 2 con 0.002. En el Paso 4, se elige el turno (2) que tiene la menor senda crítica y se dimensiona la red. Paso 5, se define la senda crítica de los circuitos restantes de cada turno y se define la de menor valor como senda crítica absoluta, en este caso el Turno 1 con 0.005. En el Paso 6, se elige el turno (1) que tiene la menor senda crítica y se dimensiona la red. En el Paso 7, se determina la senda crítica de los circuitos restantes de cada turno y se selecciona la de menor valor como senda crítica absoluta, en este caso también en el Turno 2 con 0.005. En el Paso 8, se selecciona el turno (2) que tiene la menor senda crítica y se dimensiona la red. El diseño final de la red se observa en el Paso 8.



**Figura 4.14. Red con 8 hidrantes usada para ilustrar el ejemplo de uso del MSE-M en el diseño racional de una red a turnos**

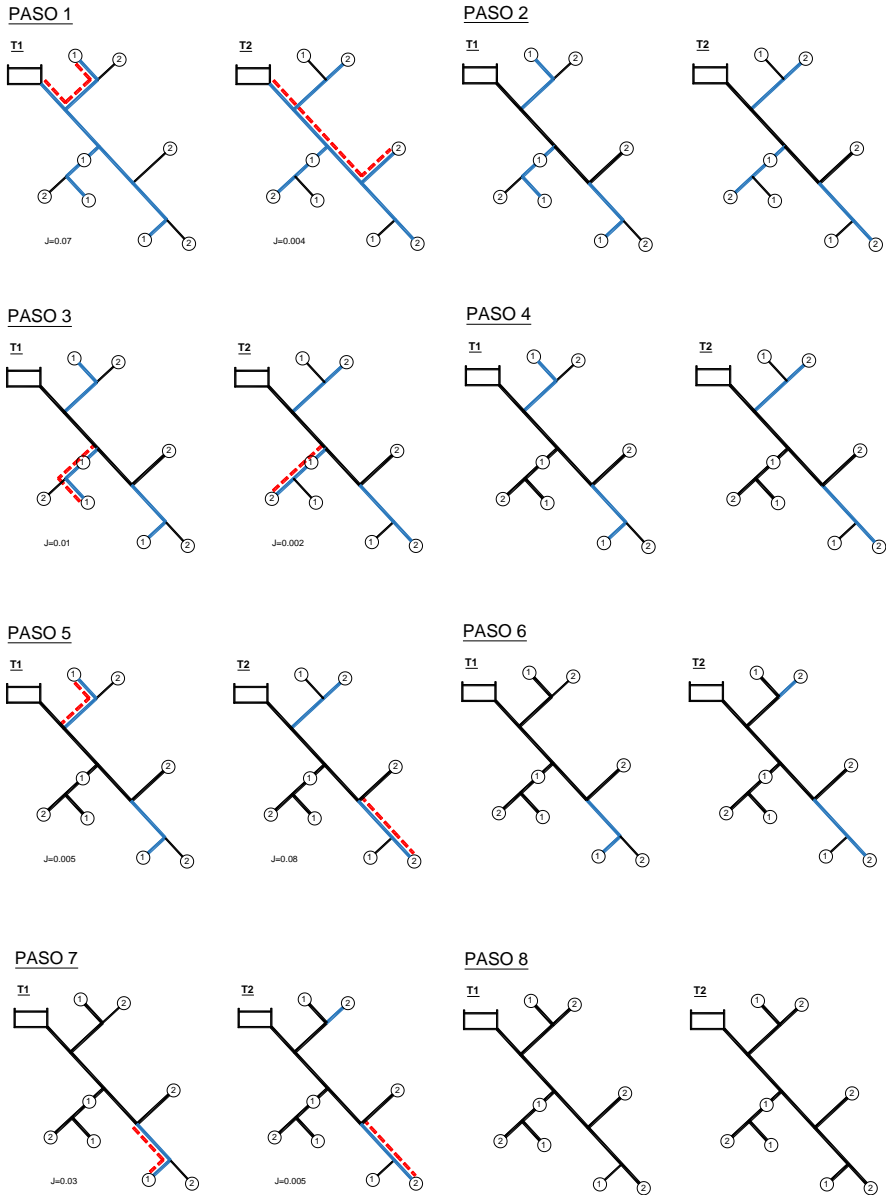


Figura 4.15. Secuencia de dimensionado por el MSE-M para una red a turnos

#### **4.3.5. Optimización Heurística**

La optimización heurística a diferencia de la optimización determinista, proporciona una buena solución del problema, aunque no garantiza que esta solución sea óptima. En Díaz et al. (1996) se define un algoritmo heurístico como: “Un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema de optimización bien definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución.”

Como características de los problemas que se resuelven usando métodos heurísticos, se anotan:

- ✓ El tiempo que se invierte para determinar la solución óptima en un método exacto es de un orden de magnitud superior al que se emplea en el método heurístico.
- ✓ Son propios para resolver problemas que por su naturaleza no es posible hacerlo con métodos exactos ya que llevarían un costo elevado computacionalmente.
- ✓ Es más flexible que un método exacto, ya que permite incorporar condiciones de modelización compleja.

#### **4.3.6. Algoritmo Genético (AG)**

La teoría de los AG la propuso Holland (1975) y la desarrolló Golberg (1989), está inspirada en los procesos de adaptación de los seres vivos. Su aplicación se ha incrementado rápidamente, ya que permite la expansión de sistemas de bajo costo y alternativas operacionales. Los AG se han aplicado a diversos campos de la ingeniería, que incluye el diseño de sistemas de distribución de agua. Trabajos que ponen de manifiesto este potencial son los realizados por Simpson et al. (1994), Reis et al. (1997), Savic y Walters (1997), Boulos et al. (2000), y Moradi J. et al. (2004).

La analogía con la naturaleza radica en la creación de un conjunto de soluciones que van evolucionando y auto perfeccionándose continuamente. Así, al conjunto de soluciones evaluadas se lo denomina población y cada elemento de esta población constituye un individuo. Este individuo representa una solución particular compuesta por un grupo de parámetros, genes, que describen la



solución particular. Para cada individuo, los genes proporcionan una solución numérica a una variable de decisión. La variable de decisión se relaciona por una parte con su probabilidad de supervivencia y de otra con la probabilidad de reproducirse en la siguiente generación, considerando la Función Objetivo que será la aptitud que deberá cumplirse. Los procesos de supervivencia y reproducción se ejecutan a través de unos operadores genéticos que son la reproducción, el cruce y la mutación (Moradi-Jalal y Karney, 2008). El AG usa estos tres operadores básicos para obtener la evolución de la población inicial con una aptitud promedio cada vez mayor.

La reproducción es la primera etapa, en la cual se determinan los mejores individuos de cada generación que perdurarán en el proceso. El operador de cruce tiene la función de recombinar las cadenas analizadas, cruzando las soluciones individuales para obtener un resultado óptimo (Savic y Walters, 1997). Para Savic (1997), la selección es el proceso en el que la población inicial de soluciones que por lo general se elige al azar, evoluciona a lo largo de varias generaciones. En cada generación se calcula una medida (fitness) para evaluar el cumplimiento de la función objetivo. La probabilidad de selección de un individuo de la población original para formar la generación de la nueva descendencia dependerá de su valor de fitness.

El número de cadenas que se cruzan entre sí se conoce como probabilidad de cruce ( $P_c$ ). La  $P_c$  será tanto mayor cuanto mayor sea la aptitud del individuo que se mide a partir del valor de la función objetivo. Por último, el operador de mutación garantiza la diversidad de las soluciones de cada cadena. El objetivo de la mutación es acrecentar las zonas de búsqueda dentro del espacio de soluciones factibles y evitar el riesgo de caer en mínimos. Mora, Iglesias, Martínez, y Fuertes (2013) sugieren adoptar ( $1/N_{VD}$ ) como valor para la probabilidad de mutación ( $P_m$ ), siendo  $N_{VD}$  el número de variables de decisión. En el caso de este trabajo de investigación, el número de hidrantes de la red. Con este valor de la probabilidad de mutación se asegura que en cada generación habrá un gen como media, que se verá afectado por la misma. Los valores de  $P_c$  y  $P_m$  serán considerados para el análisis de ajuste del modelo.

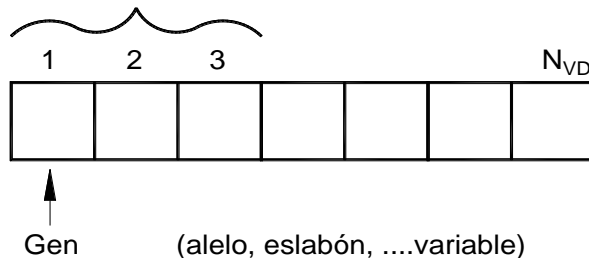
Los AG, por su naturaleza estocástica, no garantizan determinar el resultado óptimo global, aunque en numerosas aplicaciones se han obtenido excelentes resultados (Savic, 1997; Boulos et al., 2001; Reis, Porto y Chaudhry, 1997). La ventaja de este tipo de algoritmo radica en su generalidad, su robustez, y

aplicabilidad a sistemas con múltiples interdependencias no modelizadas. Por esta razón, su uso es frecuente para resolver problemas complejos de las Ciencias de la Ingeniería, incluyendo el diseño de sistemas de distribución de agua (Simpson, Dandy y Murphy, 1994). En el caso de esta investigación la codificación del AG, se hace especialmente para problemas de naturaleza discreta.

Se describen a continuación los términos que se usan para la descripción del AG:

#### *4.3.6.1 Individuos*

Se denominan también genomas, estructuras, cadenas, solución o cromosomas. Los individuos forman una población y representan una solución del problema. Los genes verifican la herencia de uno o varios caracteres. El proceso de evolución de una población de individuos se corresponde con la búsqueda a través del espacio de posibles soluciones. Esta búsqueda pretende cumplir dos objetivos: obtener la mejor solución y la exploración del espacio de búsqueda.



**Figura 4.16. Representación de gen y cadena de un AG**

Los individuos están formados por genes denominados también variables, caracteres, eslabones, características. Cada estado del gen se denomina alelo, y se representa usando una codificación específica (entero, binario [0.1], decimal, etc.). El tamaño del individuo, es decir, la longitud de la cadena de genes es función del número de variables de decisión del problema y del tipo de codificación empleada para el problema.

#### 4.3.6.2 Tamaño de población ( $N$ )

Constituido por un conjunto discreto y finito de posibles soluciones del problema. La población inicial se elige en forma aleatoria, y aplicando los procesos de selección, cruce y mutación se obtienen nuevas poblaciones con gran diversidad de material genético. No existe una regla definida para obtener el número de individuos de la población, aunque se podrá asumir que en función de la magnitud del problema se adopta mayor o menor número de cromosomas. En cualquier caso, se admite que la población ha de ser al menos igual al número de variables de decisión. Obviamente, a mayor tamaño de población, mayores serán las opciones de alcanzar un óptimo, pero también será mayor la carga computacional del algoritmo.

#### 4.3.6.3 Criterios de terminación

Cada generación de la población se renueva a través de las operaciones genéticas de reproducción, cruzamiento y mutación; produciendo individuos mejor adaptados con poblaciones más aptas. El número de generaciones  $ng$  se determina en función de una convergencia. Así, en el caso de que no se evidencie una mejora en la aptitud de una población respecto a las anteriores, se termina el ciclo de repeticiones.

Son varios los criterios de terminación utilizados por los AG, si bien los más habituales son el de utilizar un número de generaciones predeterminado o detener la simulación cuando transcurrido un cierto número de generaciones no ha habido cambios en la aptitud (fitness) del mejor individuo.

#### **Elitismo**

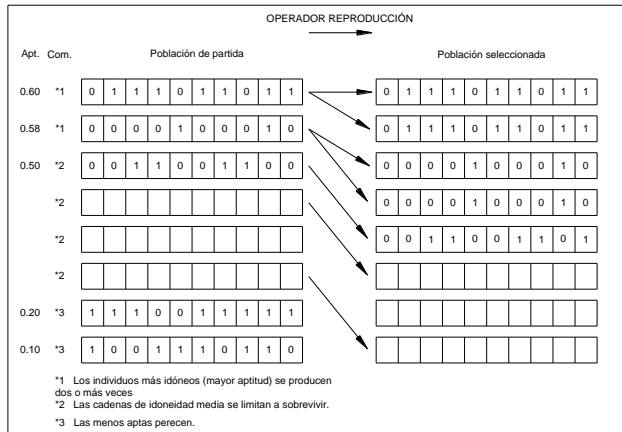
Una forma de asegurar que el algoritmo garantiza una mejora en la solución, es mantener el individuo con mejor aptitud en la siguiente generación. Esta solución conocida como elitismo, evita que una generación presente peores resultados que la de sus progenitores, si bien quita una parte esencial de los algoritmos genéticos que es la del intercambio de información por cruce.

#### 4.3.6.4 Operador reproducción (reproducción/selección)

Cuando los individuos de una población cumplen las condiciones de contorno solicitadas y se acercan al óptimo buscado, cumpliendo los valores de la función

---

objetivo, se seleccionan para reproducirlos en un mayor número de ocasiones en la siguiente población (Matías, 2003), se observa en la Figura 4.17 este proceso.



Fuente: Matías (2003)

**Figura 4.17. Operación de reproducción en AG**

Será necesario identificar la capacidad de reproducción (supervivencia), que poseen los individuos de la población para lo cual se determina la aptitud (idoneidad) de los cromosomas que conforman la población. Se adoptarán distintos criterios para calcular la aptitud de cada individuo en la función objetivo. Será preciso decodificar las cadenas de genes para evaluar cada individuo, obteniendo los valores de las variables de diseño que serán sustituidas en la función objetivo. Según Dandy et al. (1996), y considerando la minimización de costo, las redes de distribución más aptas serán las que adopten menores valores en la función de evaluación, tal como: costos de materiales, costos de construcción, costos de mantenimiento, costos de operación de la red, costos de penalización por incumplimiento de las restricciones impuestas y función de evaluación.

$$FC_{RED} \cong C_{RED} + C_{Pen} \quad \text{Ecuación 4.68}$$

Donde  $FC_{RED}$  representa la función objetivo de evaluación penalizada,  $C_{RED}$  define el costo de la función objetivo,  $C_{Pen}$  indica el costo de penalización.

Para la selección de los individuos más aptos se usa generalmente el método de la selección proporcional, dado por:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i} = \frac{1/C_i}{\sum_{i=1}^N (1/C_i)} \quad \text{Ecuación 4.69}$$

Donde  $p_i$  simboliza la probabilidad de selección,  $f_i$  representa la aptitud de un individuo,  $N$  indica el número de individuos de la población,  $C_i$  será el costo de la red. En el caso de los problemas de diseño, la aptitud es inversamente proporcional al costo.

Verificando que Dandy (1996):

$$f_i = C_i \text{ o } f_i = 1/C_i \quad \text{Ecuación 4.70}$$

### **Violación de las restricciones:**

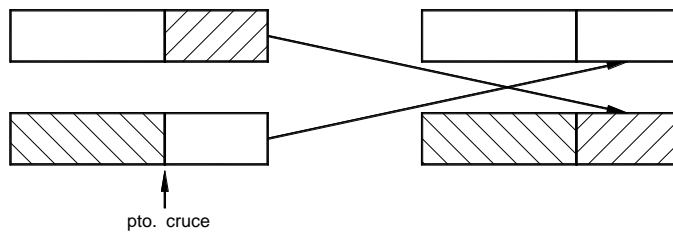
Hay tres tipos de restricciones:

- ✓ Restricción dura  
Un individuo que no satisface las restricciones se considera inviable y no se reproducirá.
- ✓ Restricciones blandas  
El incumplimiento lleva aparejada una penalización que le hace perder probabilidades de supervivencia.
- ✓ Restricciones híbridas  
En las primeras poblaciones existe más probabilidad de incumplir las restricciones y posteriormente los individuos serán mejores. Las penalizaciones son mayores conforme crece el número de generaciones.

Será necesario tener en cuenta que los óptimos suelen situarse en los límites de la región factible. Es decir, al principio se corre el riesgo, puesto que la primera población es altamente aleatoria. Por tanto, existe gran posibilidad de que muchos individuos sean inviables.

#### *4.3.6.5 Operador cruce (cruzamiento)*

Luego de la selección y reproducción en donde se asegura la presencia de los individuos más aptos; éstos se emparejan en forma aleatoria. Para lo cual se combinan los genes de cada pareja y se obtienen dos nuevos individuos hijos (ver Figura 4.18). Esta combinación se realizará a través de una probabilidad de cruzamiento  $P_c$ . La posición de intercambio también será aleatoria.



**Figura 4.18. Operación de cruceamiento en AG**

En el intercambio parcial de los genes de los individuos padres para formar dos cromosomas hijos es posible usar diferentes procesos. El cruceamiento simple es el más general (ver Tabla 4.2), consiste en elegir dos individuos y una posición de intercambio al azar que estará entre  $1$  y  $li-1$ , considerando que la longitud de los individuos será  $li$  (Matías, 2003).

**Tabla 4.2. Cruzamiento simple (punto aleatorio de cruce)**

	Padres						Hijos				
Individuo 1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1
Individuo 2	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0

Fuente: Matías (2003)

Matías, 2003 manifiesta que la probabilidad de cruceamiento  $P_c$ , permite seleccionar las parejas padres, si su valor es 1 los individuos se cruzan, si  $P_c < 1$ , entonces se genera para cada pareja un número aleatorio ( $na$ ) en el intervalo  $[0,1]$ , si  $na < P_c$ , la pareja se cruza, si  $na \geq P_c$  no existe cruceamiento.

Wang (1991) definió otra forma de realizar la operación de cruce usando dos puntos de cruce (cruzamiento doble) entre los individuos. Plantea que a través de dos valores aleatorios  $k_1$  y  $k_2$  en donde (si  $k_1 < k_2$ , se intercambian los valores) se establecen los puntos de cruce entre cada una de las parejas de individuos.

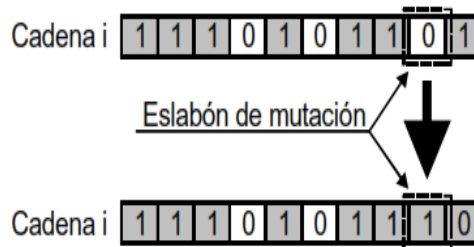
Tabla 4.3. Cruzamiento doble (punto aleatorio de cruce)

	Padres					Hijos						
Individuo 1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
Individuo 2	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1

Fuente: Matías (2003)

#### 4.3.6.6 Operador mutación (mutación)

El *operador de mutación* garantiza la biodiversidad y desempeña un papel también importante en la fase de reproducción, aunque no es una labor dominante (Golberg, 1989). Se aplica a la población intermedia obtenida tras los procesos de reproducción y cruce (ver Figura 4.19). El objetivo de la mutación es acrecentar las zonas de búsqueda dentro del espacio de soluciones factibles. Es un proceso en donde se transpone el valor binario de eslabones aislados: su valor 0 pasa a ser 1 y viceversa. Permite escapar de los óptimos locales.

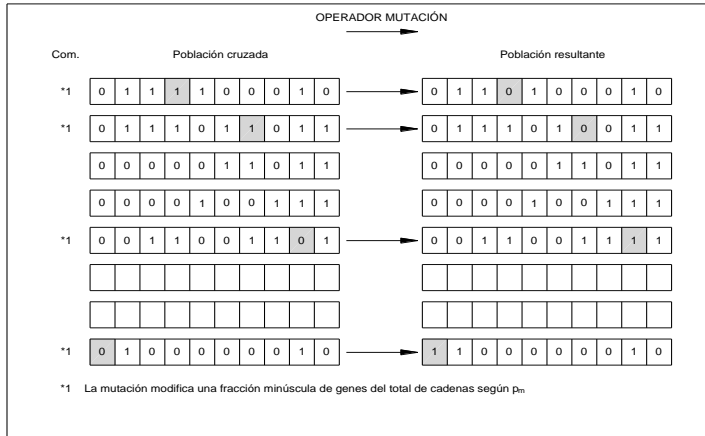


Fuente: Iglesias et al. (2004)

Figura 4.19. Proceso de mutación de un AG

A la población resultado del proceso de cruzamiento, se le aplica la mutación para lo cual se elige aleatoriamente un gen a través de la probabilidad de mutación  $P_m$  de un individuo y se modifica su valor. Según manifiesta Holland (1992) la mutación garantiza una población no uniforme. La  $P_m$  debe ser pequeña para evitar fluctuaciones en el promedio de los valores objetivo de la población. Mora (2012), recomienda trabajar con  $P_m = 1/N_{vD}$  (al menos un gen se verá afectado). Luego de aplicar a los individuos de la población el proceso de cruce, se asigna la operación de mutación que consiste en cambiar el valor de un carácter en una

cadena (ver Figura 4.20). Con esto, se incrementan las probabilidades de exploración en el espacio de soluciones, obteniendo mínimos locales y se enriquece la diversidad genética.



Fuente: Matías (2003)

**Figura 4.20. Operación de mutación en AG**

La mutación es la ocasional alteración aleatoria (en función de la probabilidad de mutación  $P_m$ ) de un carácter de una cadena. Cuando se tiene un código binario significa el cambio de 1 a 0 o viceversa. El operador de mutación se considera un proceso evolutivo de segundo orden en las poblaciones naturales con baja probabilidad de ocurrencia. Este operador tiene un papel secundario en los AG, y es preciso que la probabilidad  $P_m$  sea pequeña para obtener buenos resultados. No existe una regla fija para adoptar un valor de probabilidad de mutación, aunque debe ser pequeña para evitar destruir el código genético de los individuos. Los AG se emplean para resolver problemas con funciones no derivables con óptimos y objetivos múltiples, variables enteras, etc. Su proceso de operación es el siguiente:

1. Se genera una población de individuos en forma aleatoria. La población de datos serán las cadenas de caracteres que contienen información genética. La cadena genética es la representación simbólica de una solución del problema conformada por variables numéricas o alfanuméricas. La cadena está formada por eslabones (Iglesias et al., 2004).



2. Se opera sobre los individuos a través de los operadores de reproducción, cruce y mutación, intentando que las variaciones que resulten ventajosas se propaguen y las desfavorables desaparezcan.
3. El proceso descrito se realizará un número máximo de ocasiones (número de generaciones).

#### **4.4. Ventajas y Limitaciones de los métodos descritos**

Se mencionan las ventajas y limitaciones de los métodos que se han descrito:

##### **4.4.1. Programación Lineal**

###### *Ventajas*

- ✓ Localiza la solución óptima (mínimo costo)
- ✓ Para la solución usa diámetros existentes comercialmente

###### *Limitaciones*

- ✓ El Método computacionalmente es muy costoso ya que por cada tubería es necesario definir tantas variables de decisión como diámetros posibles. Por ejemplo, cuando se dispone de una base de datos de 10 tuberías y una red formada por 2 tuberías, resultarán 20 variables de decisión en este sencillo ejemplo, complicando su resolución.
- ✓ Exploran el espacio de soluciones hacia una solución en una dirección al mismo tiempo.

##### **4.4.2. Programación No Lineal y MSE**

###### *Ventajas:*

- ✓ Se fundamentan en que cada tubería tiene asignada una única variable de decisión por tanto el problema se simplifica enormemente.
- ✓ Computacionalmente más eficiente
- ✓ La solución es la óptima

### *Limitaciones*

- ✓ Las soluciones resultan en variables continuas (diámetros teóricos).
- ✓ Es necesario realizar un proceso de normalización.

### **4.4.3. Algoritmo genético AG**

#### *Ventajas:*

- ✓ Es independiente de la formulación matemática, no se necesita una función continua como tampoco derivable. Hay una serie de restricciones que los métodos deterministas necesitan, en el AG solamente se necesita que exista una función objetivo.
- ✓ Aborda problemas complejos de búsqueda y optimización en los cuales los métodos de optimización determinista se limitan.
- ✓ Operan de forma simultánea con varias soluciones.
- ✓ Son menos afectados por los máximos locales
- ✓ Es posible incorporar condiciones complejas de modelizar.

#### *Desventajas*

- ✓ El tiempo de convergencia puede ser enorme, dependiendo en cierta medida de los parámetros que se usen como tamaño de población, número de generaciones.
- ✓ El lenguaje usado para especificar soluciones debe ser robusto para evitar resultados sin sentido.
- ✓ El costo computacional depende directamente del tamaño del problema.

### **4.5. Conclusiones:**

En el caso específico de la investigación que se desarrolla, el problema a resolver es encontrar el diseño óptimo económico de una red de riego operando a turnos, en que la asignación de turnos a los hidrantes y la selección de diámetro de cada tubería sea tal que el costo resultante sea el mínimo posible, pero se alcance una presión mínima requerida en cada hidrante abierto en todos los turnos. La

restricción adicional es netamente hidráulica y se incorpora al problema de optimización en términos de pérdidas de cargas, que se calcularán por Darcy – Weisbach.

Al trabajar con los turnos, a la complejidad que pueda tener el método de diseño determinista como la Serie Económica, Programación No Lineal o Programación Lineal se añaden las combinaciones que resultarán de los turnos asignados. Para una asignación dada de turno, una programación determinista será más eficiente que un AG. Si en lugar de tener una determinada asignación de turnos, se cuenta con una combinación de turnos muy grande, el problema se hace inviable para su formulación analítica y es cuando cobra ventaja y se recurre a los AG. El AG no realiza una búsqueda exhaustiva de las soluciones, sino que se orienta por el mecanismo de mejora.

La función objetivo que se debe resolver es no lineal puesto que el diámetro está elevado a un exponente distinto de la unidad en la formulación de pérdidas de carga y en la función de costos. Estas particularidades, se asocian a un problema de optimización no lineal.

Ya que se trata de resolver dos problemas distintos, la asignación de turnos y el diseño económico de la red, se empleará un Algoritmo Híbrido que emplea dos tipos de algoritmos, cada uno de ellos va encaminado a resolver uno de estos problemas. El problema de diseño está resuelto a través de un algoritmo netamente determinístico y se trata de un problema convexo. Cuando se introduce la selección del turno, no hay garantía de que el problema sea convexo por esta razón se usará un AG. De esta manera se otorgará mayor potencia de cálculo en detrimento de la solución óptima.



# Capítulo 5 : Formulación e Implementación del AG-PNL

## 5.1. Introducción

La solución de muchos problemas de ingeniería se fundamenta en resolver modelos con gran cantidad de variables y funciones complejas. Encontrar procedimientos de resolución robustos, precisos y ágiles supone un desafío que compromete la viabilidad de los mismos. Un método híbrido de resolución integra dos o más métodos diferentes, que obtiene ventajas de la combinación de los mismos. Constituye la alternativa para unir técnicas complementarias, buscando el mejor aprovechamiento de la información y la solución más idónea a un problema particular.

En esta investigación se trata de resolver dos problemas distintos: la asignación de turnos y el diseño económico de la red, que induce la conveniencia de adoptar un Algoritmo Híbrido. Con la integración de dos técnicas complementarias es posible suplir las deficiencias de cada una de ellas, de forma que se obtenga mejor desempeño. Así, en este caso tanto el AG como la PNL formarán parte del híbrido y se encaminarán a resolver el problema de diseñar económicamente una red de

riego operando a turnos. El problema de asignación de turnos con los algoritmos determinísticos resulta complejo y sujeto a limitaciones. Por tanto, se recurre para este problema parcial a un algoritmo heurístico, mientras que para la designación de diámetros puede emplearse un método analítico tradicional. Se aprovecha la efectividad de los métodos analíticos, que dan una solución óptima para una combinación de turnos, y se explota el método heurístico para buscar combinaciones de asignaciones de turnos que logren un costo mínimo del diseño.

## **5.2. Arquitectura y Formulación del Algoritmo Híbrido**

Un método híbrido integra dos o más métodos diferentes buscando el mejor aprovechamiento de la información y la solución más eficaz. En este caso particular y dada la enorme cantidad de variables de decisión en la formulación de turnos, y las características del problema, es suficiente con encontrar un sub óptimo económico. En consecuencia, se plantea el uso de algoritmos de optimización de tipo evolutivo por su flexibilidad y generalidad, combinados con algoritmos de tipo analítico explícito no lineales en ciertas fases del proceso.

Se ha adoptado la propuesta encontrada en Pérez et al. (2008) en forma embrionaria, que fue exclusivamente aplicada a un caso ejemplo de pequeñas dimensiones meramente demostrativo, y se ha procedido a desarrollarla exhaustivamente, profundizando en sus resultados. Se combina un algoritmo de optimización que usa Programación No Lineal (PNL) con otro de tipo Algoritmo Genético (AG), configurando un algoritmo Híbrido (AG-PNL). En él se explotan técnicas basadas en PNL, que permiten obtener el mínimo costo de los diámetros de tuberías de cada línea de la red para unos turnos dados a los hidrantes, que formará parte del proceso de construcción de la función objetivo a minimizar.

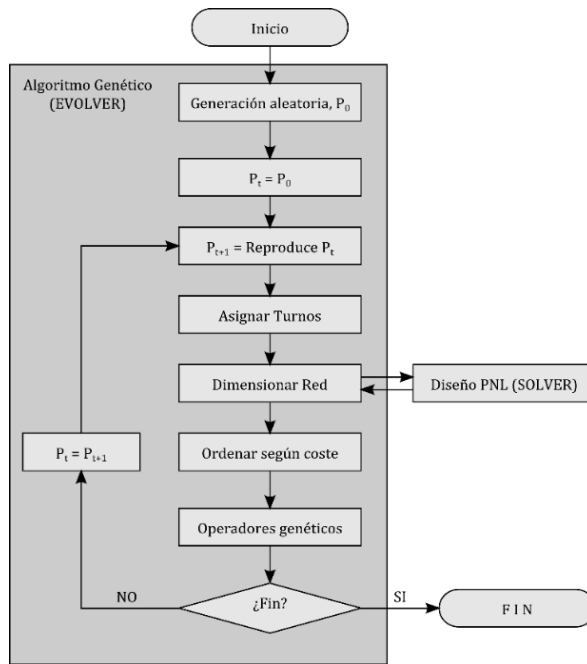
### **5.2.1. Arquitectura del Modelo Híbrido**

El Método Híbrido (AG-PNL), cuya implementación y validación constituye la parte principal de esta contribución, realiza el diseño de una red de distribución de riego a presión operando con la modalidad a turnos. En este proceso se realiza la optimización simultánea de los turnos asignados a cada hidrante (haciendo uso del AG) y el dimensionado de las tuberías de la red (mediante PNL) en el sentido de minimizar el costo del sistema. Explotando de esta manera las mejores características de cada tipo de algoritmo. En la Figura 5.1 se muestra el diagrama

de flujo del método AG-PNL, representando  $P_0$  la población inicial y  $P_t$  la población resultante para el proceso en el AG.

Mediante el AG se encuentra el turno de pertenencia a cada hidrante, que minimiza la función objetivo costo de tuberías de la red. De esta manera las variables de decisión son exclusivamente la asignación de turnos a los hidrantes y se reduce la dimensionalidad del problema en la formulación del AG. En cada paso del AG se hacen evolucionar los turnos tentativos asignados a los hidrantes, utilizando como evaluación del fitness del ejemplar, el costo de la red para la asignación de turnos candidatos. Para este proceso se usó este algoritmo evolutivo que permite incorporar procesos de optimización mediante AG a problemas de carácter general convenientemente codificados.

A su vez, el costo de la red para una asignación de turnos candidatos es el resultado de la optimización de conducciones mediante el algoritmo analítico GRG con PNL. La función del algoritmo GRG es calcular la distribución de tubería de diámetros continuos en la red que satisfaga los requisitos de presión y genere un costo mínimo para una cierta asignación de turnos a los hidrantes. El GRG está incorporado en el paquete SOLVER (Frontline Systems Inc., 2011), paquete informático para la simulación y optimización de propósito general. En este trabajo se ha realizado una vinculación de ambos algoritmos que ha permitido comunicar los resultados obtenidos por SOLVER para el diseño de la red como valores de la función objetivo utilizados posteriormente por EVOLVER para la implementación del AG, tal y como muestra la Figura 5.1, donde  $P_0$  representa la población inicial y  $P_t$  la población resultante para el proceso en el AG.



Fuente: Lapo et al. (2020)

Figura 5.1. Diagrama de flujo de método de optimización AG-PNL

### 5.2.2. Formulación del Algoritmo Genético (AG)

El problema se puede enunciar de la siguiente manera. Se dispone de una red de riego ramificada con  $N_h$  hidrantes de forma que a cada hidrante le corresponde un turno de riego. Cada individuo o solución está formado por un número de genes igual al número de variables de hidrantes. Es decir, cada gen representa un hidrante y su genoma recoge el valor correspondiente al turno que le ha sido asignado. Por lo tanto, el problema tiene tantas variables de decisión como hidrantes,  $N_{VD} = N_h$ . Cada gen  $X_j^i$  representará el turno asignado al hidrante  $j$  para la solución representada por el individuo  $i$ . Estos genes podrán tomar cualquier valor comprendido entre 1 y el número máximo de turnos ( $N_T$ ). Así, un individuo  $i$  en una población  $P$  se puede representar como un vector:

$$X^i = \{X_1^i, X_2^i, \dots, X_{N_h}^i\} \quad \text{Ecuación 5.1}$$



La aptitud de un individuo ( $X^i$  -, una de las soluciones del sistema con un grupo de turnos asignados a los hidrantes) se identifica a través del valor que adopta la función objetivo para dicha solución. En este caso la función objetivo es el costo mínimo de la red correspondiente a la asignación de turnos codificada en el individuo  $X^i$ . En función de estos turnos asignados a cada hidrante se obtienen los caudales circulantes por cada tubería en cada turno. Se indican en la Tabla 5.1 los términos que se usan en la genética y su estructura equivalente en AG.

**Tabla 5.1. Términos equivalentes de la evolución natural y AG**

<b>Evolución Natural</b>	<b>Algoritmo Genético</b>
Genotipo	Código de cadena
Fenotipo	Punto sin codificar
Cromosoma	Cadena
Gen	Posición de cadena
Alelo	Valor en una posición determinada
Función de aptitud o aptitud	Valor en la función objetivo

*La variable de decisión* en este caso en el AG será la asignación del número de turno, en código binario. En este caso la red consta de  $t$  turnos que quedan identificados por una serie de unos y ceros con una longitud  $t \times n$  ( $n$  representa el número de dígitos que identifica cada variable de decisión). Para el caso que se trata, se usará en la codificación del problema dentro del AG una cadena binaria formada por 2 bits de 4 subseries.

*El Cromosoma* está compuesto por *genes* que toman distintos valores llamados *alelos*. Para esta investigación cada individuo tiene una posible asignación de turno a todos los hidrantes de la red. Se diferencian entre sí como sucede en la cadena genética, por el turno que tiene asignado cada hidrante. En el momento que cambia el turno asignado a uno o varios hidrantes, la red se transforma en otro cromosoma. Se realiza una descripción de la secuencia que sigue el AG en la generación de las poblaciones considerando una población inicial origen.

### **Fase 1:**

Se produce una generación aleatoria con la creación de una secuencia de cromosomas. Cada uno de ellos, incluye una posible solución del problema de optimización (para esta primera solución se parte con la asignación del número de turno en forma heurística). Los individuos (redes) serán ordenados en función de la aptitud (función objetivo) del problema que se pretende resolver. La aptitud de un cromosoma se definirá en este caso por el costo total de diseño de la red de riego para cada turno asignado a los hidrantes.

### **Fase 2:**

En esta fase se definen las operaciones genéticas que son características importantes del AG. El *operador de cruce (crossover)*, es vital dentro de un AG ya que en su ausencia no será posible obtener el genoma del nuevo individuo en función de los genomas del padre y madre. Este operador tiene la función de recombinar el material genético que se cruza de un cromosoma a otro (Savic y Walters, 1997). El número de cadenas que se cruzan entre sí se conoce como probabilidad de cruce ( $P_c$ ). Existen tres técnicas básicas de cruce: de punto, de dos puntos y uniforme (Mora, 2012). Para objeto de este trabajo se usó la técnica de cruce de punto, de tal manera que, si la codificación es binaria, la selección aleatoria del eslabón de cruce determina el punto donde se trocean las cadenas para cruzarlas entre sí.

El cruzamiento de los distintos pares de redes está definido por una  $P_c$ . En la bibliografía se sugiere adoptar valores de tasa de cruce que se podrán ajustar entre 0.01 y 1.0, Golberg (1989); Galante (1993), Cieniawski et al. (1995) y Liong et al. (1995) recomiendan valores de  $P_c$  entre 0.6 y 1. Mora (2012) delimita la  $P_c$  dentro del rango de 50 y 60 %.

Para este estudio se han fijado como tamaños de la población valores entre 50 y 200 individuos para el conjunto de redes seleccionadas. Además, se han adoptado como valores de referencia para el operador de cruzamiento, una probabilidad de cruce ( $P_c$ ) de 0.5 (Mora, 2012). Por otro lado, Mora-Melia et al. (2013) proponen determinar la probabilidad de mutación ( $P_m$ ) en función de la cantidad de variables de decisión del problema. Estos autores proponen tomar la inversa, es decir,  $1/N_h$  (representa el inverso del número de hidrantes de la red) con esta

expresión se delimita el espacio de las soluciones factibles para reducir el tiempo de búsqueda.

### **Fase 3:**

*Finalización.* - El ciclo de evolución se reiterará en un número limitado de generaciones hasta que se satisfagan los criterios de terminación, que definirán las condiciones para determinar el mejor resultado. La bibliografía consultada muestra diversidad de criterios para culminar con la evolución. El criterio más simple y usado es el de acotar el número de generaciones totales en el momento en que el algoritmo localice un buen individuo. Es decir, el criterio elegido se producirá cuando exista una convergencia aceptable en los resultados. Esto es, cuando el costo total de diseño de la red sea aproximadamente igual en todos los casos o generaciones que se obtengan en adelante.

*Tamaño de población.* - Para cada ejecución se debe fijar el tamaño de población que está vinculado directamente con el número de variables de decisión y con el tiempo de simulación. El tamaño de población ( $n_p$ ) y el número de generaciones ( $n_g$ ) son parámetros de entrada en el modelo. Luego de que la población inicial es evaluada, se aplican iterativamente los operadores genéticos a través de sucesivas generaciones para mejorar en forma progresiva la población (Reca, Martínez, Baños y Gil, 2006). Los criterios para adoptar el valor de  $n_p$  son objeto de debate e investigación. Iglesias et al. (2004) afirman que con una población entre 50 y 100 individuos se obtendrán buenos resultados en el proceso de optimización. Mora (2012) realiza un estudio sobre la influencia del tamaño de población en el rendimiento de varios algoritmos evolutivos fundamentados en la calidad de solución y la velocidad de convergencia. Con este antecedente, se deduce que todos los algoritmos que se han estudiado, alcanzan buenas soluciones en un rango de población entre 25 y 50 para problemas simples y entre 75 y 125 para problemas grandes. El tamaño de población grande será idóneo para asegurar la diversidad en las soluciones por su reserva genética diversa, aunque tarda más tiempo en generar una solución. Otras fuentes sugieren que  $n_p$  sea entre 1.5 y 2 veces el número de variables de decisión  $N_{vD}$ .

En el presente trabajo y para ajustar el AG, se han probado valores de población de 50, 100 y 200 individuos; además se tomó en cuenta el número de variables de decisión (en este caso cantidad de hidrantes). La escasa complejidad del problema resuelto con el AG será la variación entre dos o tres opciones de turnos

diferentes y no más. En la Tabla 5.2 se observan los parámetros de entrada que se adoptaron en el proceso del AG.

**Tabla 5.2. Parámetros de entrada del AG en el método híbrido**

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
$n_p$	200
$P_c$	0.5
$P_m$	$1/N_{VD}$
Técnica de reproducción	Constante
Técnica de mutación	Uniforme
Función de aptitud o aptitud	Costo total de tuberías

### **5.2.3. Formulación de la Función Objetivo del AG (Evaluación Fitness)**

La aptitud de cada individuo o función objetivo que está asociada a cada punto del espacio de soluciones será el costo total de las tuberías que forman la RCRP. Se considera únicamente la inversión inicial en tuberías, resultando:

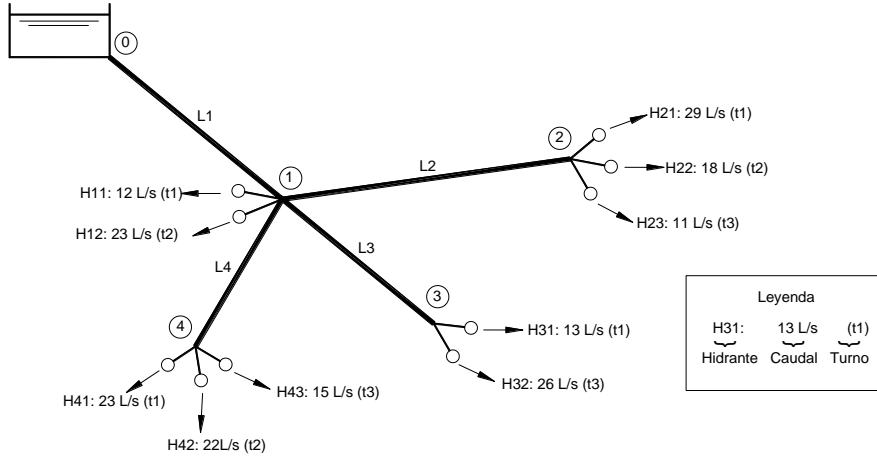
$$C_T = \sum_{j=1}^{NL} C_j(D_j) \cdot L_j \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Donde  $C_T$  simboliza el costo total de tuberías expresado en unidades monetarias;  $C_j(D_j)$  representa el costo unitario por metro lineal para cada diámetro;  $L_j$  es la longitud de la tubería  $j$  expresada en metros y  $NL$  es el número de tuberías que componen la red.

La aptitud estará definida por el diseño proporcionado por el algoritmo de PNL y es el resultado del proceso anillado de optimización mediante PNL del costo de la red. La función objetivo del AG que realiza la asignación de turnos, es el costo total de las tuberías que forman la red de mínimo costo. Esta red proporciona servicio a la asignación de turnos que tiene el individuo cuyo Fitness se está evaluando.

Para facilitar la comprensión de la implementación del algoritmo se supone una red de riego en donde la modalidad de operación se ha definido con tres turnos, como se observa en la Figura 5.2, se visualiza una red con 4 líneas, con un nudo de conexión y con diez tomas (hidrantes). Las líneas pertenecen a un determinado

trayecto, y según el número de turno que se encuentre asignado en los hidrantes, se abrirán o no.



**Figura 5.2. Topología de red 4 líneas, T1, T2 y T3**

Como datos contamos con la altura de cabeza de la red de riego, el valor de longitud de cada tramo que forma parte de la red. Los caudales que trasiegan cada tramo serán función de las demandas de los hidrantes ubicados aguas debajo de la línea analizada según el turno que se encuentre abierto.

Las incógnitas para la resolución de este problema constituyen los diámetros  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$  que serán los mismos para todos los turnos. La condición de cumplimiento será, que el valor de la presión en los hidrantes debe ser mayor que la presión mínima requerida del hidrante, que es la restricción del problema a resolver.

La formulación de este tipo poseerá una pérdida de carga diferente según el turno que se encuentre operando, que acumulará las pérdidas de carga para todas las líneas  $j$  que forman el trayecto  $k$ , que corresponden al turno  $t$  que se encuentra abierto, por tanto, se encontrarán tantas ecuaciones como nudos abiertos existan. Para el turno 1, se observa en la Figura 5.3 los siguientes hidrantes abiertos.

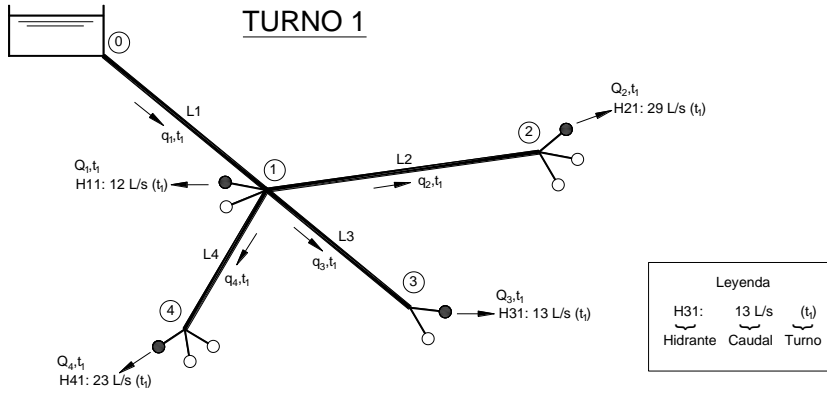


Figura 5.3. Topología de red 4 líneas con demandas en el Turno 1

Las pérdidas de carga serán diferentes en cada uno de los tramos de la red, y dependerán de los caudales en los trayectos que están formando parte de los hidrantes abiertos en los diferentes turnos. Los caudales de trasiego en las líneas 1, 2, 3, y 4 que corresponden a este turno serán:

$$q_{1,t_1} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad \text{Ecuación 5.3}$$

$$q_{2,t_1} = Q_2 \quad \text{Ecuación 5.4}$$

$$q_{3,t_1} = Q_3 \quad \text{Ecuación 5.5}$$

$$q_{4,t_1} = Q_4 \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Las ecuaciones que garantizan la suficiente energía en cada hidrante de la red para el turno 1, serán:

$$H_{1,t_1} = H_0 - B \frac{f_{L_1,t_1} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_1}^2}{D_1^5} > H_{1minreq} \quad \text{Ecuación 5.7}$$

$$H_{2,t_1} = H_0 - B \frac{f_{L_1,t_1} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_1}^2}{D_1^5} - B \frac{f_{L_2,t_1} \cdot L_2 \cdot q_{2,t_1}^2}{D_2^5} > H_{2minreq} \quad \text{Ecuación 5.8}$$

$$H_{3,t_1} = H_0 - B \frac{f_{L_1,t_1} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_1}^2}{D_1^5} - B \frac{f_{L_3,t_1} \cdot L_3 \cdot q_{3,t_1}^2}{D_3^5} > H_{3minreq} \quad \text{Ecuación 5.9}$$

$$H_{4,t_1} = H_0 - B \frac{f_{L_1,t_1} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_1}^2}{D_1^5} - B \frac{f_{L_4,t_1} \cdot L_4 \cdot q_{4,t_1}^2}{D_4^5} > H_{4minreq} \quad \text{Ecuación 5.10}$$

Siendo el valor de B una constante igual a  $\frac{8}{\pi^2 \cdot g}$

En el caso del turno dos, se observan en la Figura 5.4, los hidrantes abiertos.

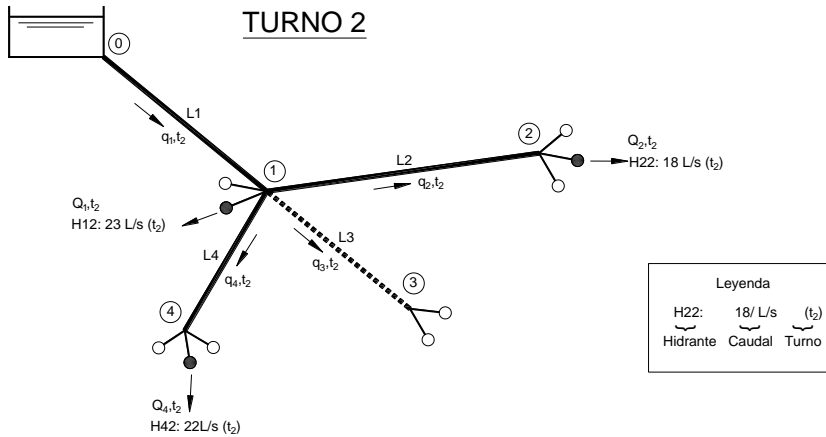


Figura 5.4. Topología de red 4 líneas con demandas en Turno 2

En este turno se establecen las siguientes ecuaciones de continuidad:

$$q_{1,t_2} = Q_1 + Q_2 + Q_4 \quad \text{Ecuación 5.11}$$

$$q_{2,t_2} = Q_2 \quad \text{Ecuación 5.12}$$

$$q_{3,t_2} = 0 \quad \text{Ecuación 5.13}$$

$$q_{4,t_2} = Q_4 \quad \text{Ecuación 5.14}$$

Se aprecia que no existe pérdida de carga en la línea  $L_3$ , ya que no se registran

demandas en los hidrantes en el nudo tres para este turno. Los valores de energía suficiente para el buen funcionamiento de los hidrantes abiertos en este turno son:

$$H_{1,t_2} = H_0 - B \frac{f_{L_1,t_2} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_2}^2}{D_1^5} > H_{1\min req} \quad \text{Ecuación 5.15}$$

$$H_{2,t_2} = H_0 - B \frac{f_{L_1,t_2} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_2}^2}{D_1^5} - B \frac{f_{L_2,t_2} \cdot L_2 \cdot q_{2,t_2}^2}{D_2^5} > H_{2\min req} \quad \text{Ecuación 5.16}$$

$$H_{3,t_2} = 0 \quad \text{Ecuación 5.17}$$

$$H_{4,t_2} = H_0 - B \frac{f_{L_1,t_2} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_2}^2}{D_1^5} - B \frac{f_{L_4,t_2} \cdot L_4 \cdot q_{4,t_2}^2}{D_4^5} > H_{4\min req} \quad \text{Ecuación 5.18}$$

La distribución de las dotaciones en la red analizada para el turno tres, se detalla en la Figura 5.5.

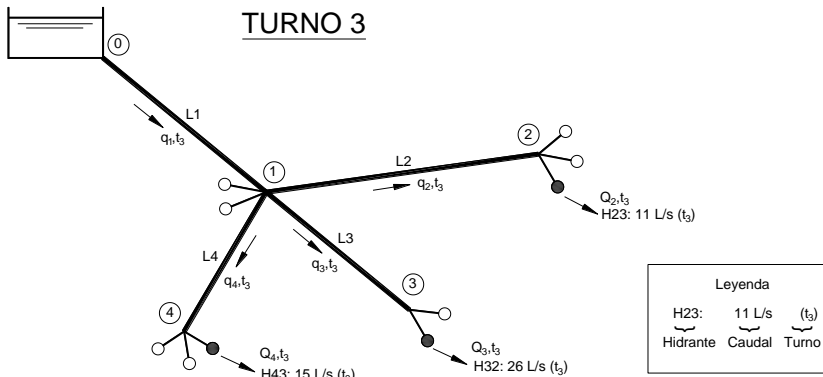


Figura 5.5. Topología de red 4 líneas con demandas en Turno 3

Los caudales que trasiegan por los diversos tramos en este turno, corresponden a las ecuaciones:

$$q_{1,t_3} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad \text{Ecuación 5.19}$$



$$q_{2,t_3} = Q_2 \quad \text{Ecuación 5.20}$$

$$q_{3,t_3} = Q_3 \quad \text{Ecuación 5.21}$$

$$q_{4,t_3} = Q_4 \quad \text{Ecuación 5.22}$$

La Energía en los hidrantes para este turno, deberá cumplir con la condición mínima requerida, y queda definida con las ecuaciones:

$$H_{1,t_3} = H_0 - B \frac{f_{L_1,t_3} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_3}^2}{D_1^5} > H_{1minreq} \quad \text{Ecuación 5.23}$$

$$H_{2,t_3} = H_0 - B \frac{f_{L_1,t_3} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_3}^2}{D_1^5} - B \frac{f_{L_2,t_3} \cdot L_2 \cdot q_{2,t_3}^2}{D_2^5} > H_{2minreq} \quad \text{Ecuación 5.24}$$

$$H_{3,t_3} = H_0 - B \frac{f_{L_1,t_3} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_3}^2}{D_1^5} - B \frac{f_{L_3,t_3} \cdot L_3 \cdot q_{3,t_3}^2}{D_3^5} > H_{3minreq} \quad \text{Ecuación 5.25}$$

$$H_{4,t_3} = H_0 - B \frac{f_{L_1,t_3} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_3}^2}{D_1^5} - B \frac{f_{L_4,t_3} \cdot L_4 \cdot q_{4,t_3}^2}{D_4^5} > H_{4minreq} \quad \text{Ecuación 5.26}$$

El diseño de la red de 4 líneas que se adopta como ejemplo, con 4 incógnitas (los diámetros de cada tramo) está condicionada por 11 restricciones que se obtienen de los sistemas de inecuaciones que surgen para cada uno de los tres turnos de esta red. El turno 1, aporta cuatro condiciones, el turno 2, tres y el turno 3, cuatro. Las variables que asocian únicamente a los turnos, son el caudal  $q$  de cada tramo, el factor de fricción  $f$  correspondiente, y la presión mínima necesaria en el hidrante  $H_{nminreq}$ . Reuniendo las inecuaciones en donde se representan las condiciones del cumplimiento de la presión mínima requerida en cada hidrante se tiene:

$$H_{1,t_1} = H_0 - K \frac{f_{L_1,t_1} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_1}^2}{D_1^5} > H_{1minreq} \quad \text{Ecuación 5.27}$$

$$H_{2,t_1} = H_0 - K \frac{f_{L_1,t_1} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_1}^2}{D_1^5} - K \frac{f_{L_2,t_1} \cdot L_2 \cdot q_{2,t_1}^2}{D_2^5} > H_{2 \min req} \quad \text{Ecuación 5.28}$$

$$H_{3,t_1} = H_0 - K \frac{f_{L_1,t_1} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_1}^2}{D_1^5} - K \frac{f_{L_3,t_1} \cdot L_3 \cdot q_{3,t_1}^2}{D_3^5} > H_{3 \min req} \quad \text{Ecuación 5.29}$$

$$H_{4,t_1} = H_0 - K \frac{f_{L_1,t_1} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_1}^2}{D_1^5} - K \frac{f_{L_4,t_1} \cdot L_4 \cdot q_{4,t_1}^2}{D_4^5} > H_{4 \min req} \quad \text{Ecuación 5.30}$$

$$H_{1,t_2} = H_0 - K \frac{f_{L_1,t_2} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_2}^2}{D_1^5} > H_{1 \min req} \quad \text{Ecuación 5.31}$$

$$H_{2,t_2} = H_0 - K \frac{f_{L_1,t_2} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_2}^2}{D_1^5} - K \frac{f_{L_2,t_2} \cdot L_2 \cdot q_{2,t_2}^2}{D_2^5} > H_{2 \min req} \quad \text{Ecuación 5.32}$$

$$H_{3,t_1} = 0 \quad \text{Ecuación 5.33}$$

$$H_{4,t_2} = H_0 - K \frac{f_{L_1,t_2} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_2}^2}{D_1^5} - K \frac{f_{L_4,t_2} \cdot L_4 \cdot q_{4,t_2}^2}{D_4^5} > H_{4 \min req} \quad \text{Ecuación 5.34}$$

$$H_{1,t_3} = H_0 - K \frac{f_{L_1,t_3} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_3}^2}{D_1^5} > H_{1 \min req} \quad \text{Ecuación 5.35}$$

$$H_{2,t_3} = H_0 - K \frac{f_{L_1,t_3} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_3}^2}{D_1^5} - K \frac{f_{L_2,t_3} \cdot L_2 \cdot q_{2,t_3}^2}{D_2^5} > H_{2 \min req} \quad \text{Ecuación 5.36}$$

$$H_{3,t_3} = H_0 - K \frac{f_{L_1,t_3} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_3}^2}{D_1^5} - K \frac{f_{L_3,t_3} \cdot L_3 \cdot q_{3,t_3}^2}{D_3^5} > H_{3 \min req} \quad \text{Ecuación 5.37}$$

$$H_{4,t_3} = H_0 - K \frac{f_{L_1,t_3} \cdot L_1 \cdot q_{1,t_3}^2}{D_1^5} - K \frac{f_{L_4,t_3} \cdot L_4 \cdot q_{4,t_3}^2}{D_4^5} > H_{4 \min req} \quad \text{Ecuación 5.38}$$

Este elevado conjunto de condiciones a satisfacer, junto a las ecuaciones de continuidad de los caudales en cada turno, para este simple ejemplo, ilustra el significativo mayor orden de complejidad que implica el diseño de la red de mínimo costo trabajando a turnos, respecto a la optimización de los sistemas a la demanda. Si se tratará de una red a la demanda el número de restricciones energéticas sería en este caso de solo de 4, una por nudo donde exista consumo con requisito de presión mínima.

Debido a que el método GRG de PNL usa los diámetros como variables de decisión continuas, cuyos valores óptimos no se corresponden con diámetros comerciales estandarizados. Es necesario realizar un proceso de normalización posterior que modifica cada diámetro teórico óptimo resultante de la PNL. Finalizado este proceso de normalización, se alcanza el costo de inversión en la instalación.

### **5.3. Implementación del Algoritmo Híbrido**

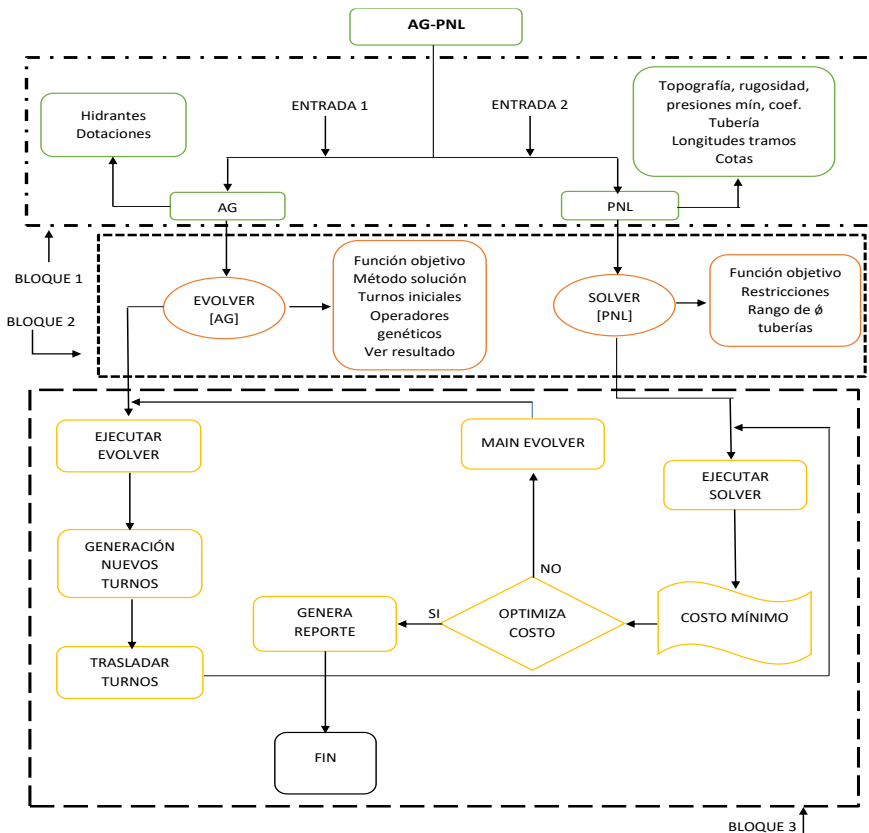
Se detalla a continuación, la secuencia del proceso para la implementación del Algoritmo Híbrido AG-PNL describiéndose los algoritmos de optimización usados y las herramientas informáticas para su ejecución. Se señalan los elementos de entrada del modelo, así como la configuración de las variables y ecuaciones condicionantes (requisitos de presión) para lograr el objetivo económico de costo mínimo. Se especifica la secuencia de interconexión de los algoritmos de optimización empleada para su ejecución. Esta descripción se acompaña de un ejemplo de aplicación de un caso de red de riego para facilitar la comprensión.

El Algoritmo Híbrido (AG-PNL), realiza el diseño de una RCRP ramificada operando con la modalidad a turnos, optimizando simultáneamente los turnos asignados a cada hidrante (haciendo uso del AG), y el dimensionado de las tuberías de la red (mediante PNL). En cada paso del AG se hacen evolucionar los turnos tentativos asignados a los hidrantes, utilizando como evaluación de la aptitud de cada individuo el costo de la red para la asignación de turnos candidatos.

Se ha realizado una vinculación de dos algoritmos de optimización que se encuentran incorporados en sendos paquetes comerciales. El primero es el EVOLVER (Palisade Corporation, 2010) que permite integrar procesos de

optimización mediante AG a problemas de carácter general convenientemente codificados. El segundo paquete es Risk Solver Platform (Frontline Systems Inc., 2011) modalidad académica, que facilita la simulación y optimización de propósito general, y tiene incorporado dentro de sus funciones el algoritmo GRG) para la optimización con PNL. La función del algoritmo GRG es calcular la distribución de tubería de diámetros continuos en la red que satisfaga los requisitos de presión y genere un costo mínimo para una cierta asignación de turnos a los hidrantes.

La integración realizada se visualiza en el esquema de la Figura 5.6. En este esquema se observan tres bloques, la entrada de datos, la configuración de la información, y la ejecución de los algoritmos de optimización.



**Figura 5.6. Esquema de la secuencia de implementación de AG-PNL**

### **5.3.1. Bloque 1: Introducción de datos**

El Bloque 1 permite ingresar los datos topológicos de la red de tuberías, de los requisitos de los hidrantes, y de las características del fluido. Para ello se han establecido dos módulos en Microsoft Excel que tomarán el nombre de: Entrada Uno para Algoritmos Genéticos (AG) y Entrada Dos para Programación No Lineal (PNL). En la Entrada Uno, se asignan los ID de los nudos de la red en donde están ubicados los hidrantes, los ID de los hidrantes, la asignación inicial arbitraria del número de turno y el valor de la dotación por hidrante en L/s. En la Entrada Dos se aportan los datos adicionales que precisa el módulo de PNL, se incorpora la información de las características de los elementos (nudos y líneas) que conforman la red: longitudes de los tramos de la red, ID y cotas de los nudos de conexión y de los hidrantes, la presión de consigna de las tomas (hidrantes), las características de la función de costos [Ecuación. 5.2] y la rugosidad de la tubería a emplear, así como la del fluido.

### **5.3.2. Bloque 2: Configuración de los Algoritmos AG-PNL**

En el Bloque 2, se configuran las expresiones referentes a la optimización con Algoritmo Genético y Programación No Lineal y los parámetros que controlan la optimización. Para el AG se asignan las expresiones: función objetivo [Ecuación 5.2], y el número de asignación inicial del turno en hidrantes. Se fijan además los parámetros correspondientes al método de solución del AG, los valores de los operadores genéticos y la forma de visualizar los resultados. Para la optimización con PNL, se designan las variables de decisión de este problema como son los diámetros de los tramos que conforman la red, las condiciones de cumplimiento o restricciones, que en este caso será la condición de cumplimiento de energía en las tomas (hidrantes) y el rango de diámetro mínimo y máximo de la gama tubería que se usará en el diseño.

### **5.3.3. Bloque 3: Ejecución**

En el Bloque 3 como se observa en la Figura 5.6 se ejecuta el Algoritmo Híbrido, una vez que se ha completado la entrada de datos asociada al Bloque 1 y las configuraciones del Bloque 2, se inicia el proceso con la ejecución del AG a través de la herramienta informática EVOLVER. Dentro de Evolver se implementó un programa denominado RunSolver que controla el proceso por

cada trial y cumple las funciones de GENERAR, y TRASLADAR los turnos, y espera que se EJECUTE SOLVER. Una vez terminado el proceso lee los datos que generó Solver y traslada el valor del último costo a Evolver. Si con este proceso se obtiene el COSTO MÍNIMO de diseño se GENERA EL REPORTE, finalizando la rutina del algoritmo, caso contrario se EJECUTA EVOLVER nuevamente.

## **5.4. Ejemplo de Implementación**

Se ha elegido un ejemplo real de una red de riego a presión, en donde se señala el procedimiento de implementación del AG-PNL.

### ***5.4.1. Presentación Red Cariyacu***

El caso de implementación será la red de riego “Cariyacu”, se observan en la Figura 5.7 su topología y el nudo cabeza en donde se sitúa la reserva.

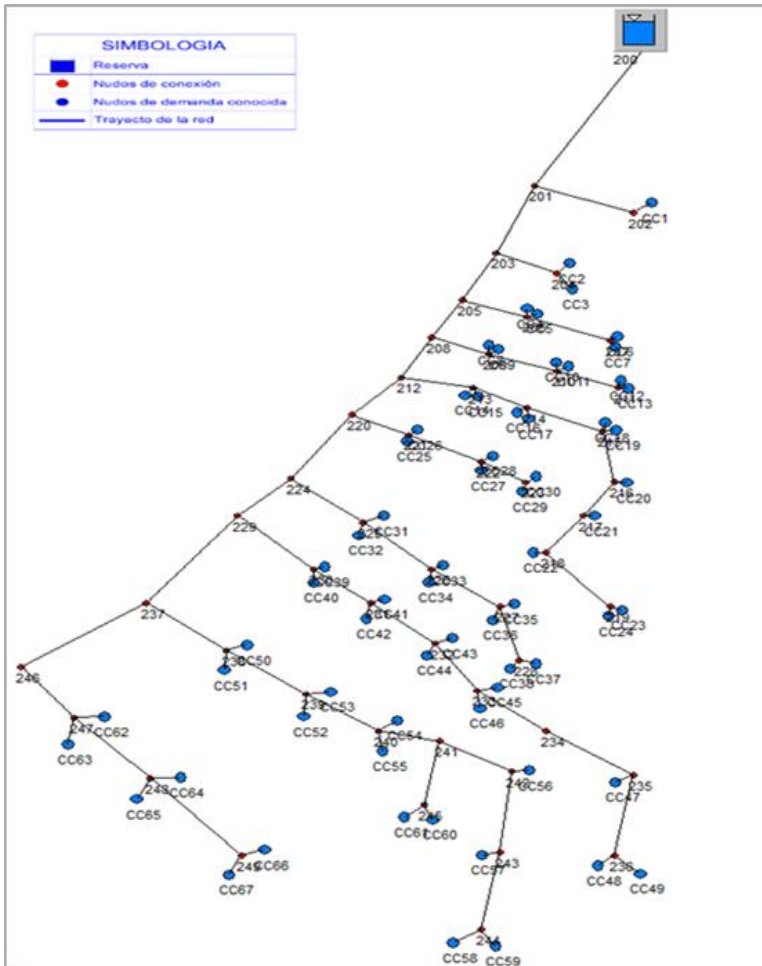


Figura 5.7. Topología de la Comunidad de Regantes Cariyacu

#### 5.4.2. Características topológicas de la red

Los nudos de conexión de las conducciones (uniones), se encuentran en la línea principal de la red y los nudos de demanda conocida (hidrantes) en las líneas secundarias. La red está formada por 67 hidrantes operando en 2 turnos y el área de riego cubre aproximadamente 26.07 ha, con un caudal ficticio continuo de 0.56 L/s ha. La cota de embalse a superficie libre corresponde a 2597 m.c.a. y la presión mínima en cada hidrante fue establecida en 23 m.c.a. Se especifica en la Tabla 5.3 para todos los nudos sus ID y sus cotas correspondientes.

**Tabla 5.3. ID Nudos y cotas. Caso RCRP “Cariyacu”**

<u>ID Nudo</u>	<u>Cota [m]</u>	<u>ID Nudo</u>	<u>Cota [m]</u>	<u>ID Nudo</u>	<u>Cota [m]</u>
200	2597	217	2534	234	2525
201	2573	218	2532	235	2516
202	2562	219	2521	236	2510
203	2569	220	2564	237	2556
204	2562	221	2556	238	2548
205	2568	222	2548	239	2538
206	2561	223	2542	240	2534
207	2548	224	2558	241	2531
208	2567	225	2555	242	2526
209	2558	226	2545	243	2516
210	2548	227	2536	244	2506
211	2537	228	2520	245	2514
212	2566	229	2557	246	2555
213	2558	230	2554	247	2554
214	2549	231	2547	248	2544
215	2544	232	2540	249	2535
216	2535	233	2533		

El primer tramo tiene una longitud de 126 m y estará definido por el nudo de inicio (nudo 200) y el nudo siguiente (nudo 201). Los tramos restantes se definen de igual manera, determinando así la longitud de todos los tramos que forman parte de la red de riego. La Tabla 5.4 detalla los nudos iniciales y finales, los ID de las Líneas, y sus longitudes.



**Tabla 5.4. Variables de entrada topología. Caso RCRP  
“Cariyacu”**

Nin-Nfin	ID Línea	Longitud [m]	Nin-Nfin	ID Línea	Longitud [m]	Nin-Nfin	ID Línea	Longitud [m]
200-201	TU1	126.00	217-218	TU18	40.05	234-235	TU35	65.62
201-202	TU2	41.48	218-219	TU19	75.80	235-236	TU36	80.22
201-203	TU3	58.14	212-220	TU20	72.03	229-237	TU37	120.00
203-204	TU4	40.61	220-221	TU21	40.79	237-238	TU38	76.42
203-205	TU5	82.01	221-222	TU22	80.40	238-239	TU39	80.62
205-206	TU6	40.61	222-223	TU23	80.22	239-240	TU40	80.10
206-207	TU7	81.06	220-224	TU24	110.00	240-241	TU41	50.09
205-208	TU8	82.01	224-225	TU25	40.11	241-242	TU42	66.19
208-209	TU9	41.00	225-226	TU26	80.62	242-243	TU43	80.62
209-210	TU10	80.62	226-227	TU27	80.50	243-244	TU44	63.79
210-211	TU11	110.55	227-228	TU28	130.98	241-245	TU45	36.35
208-212	TU12	114.00	224-229	TU29	70.01	237-246	TU46	110.00
212-213	TU13	40.79	229-230	TU30	40.11	246-247	TU47	40.01
213-214	TU14	80.44	230-231	TU31	80.31	247-248	TU48	80.62
214-215	TU15	80.22	231-232	TU32	80.31	248-249	TU49	80.50
215-216	TU16	84.48	232-233	TU33	80.31			
216-217	TU17	40.01	233-234	TU34	65.49			

Las dotaciones de los hidrantes, y la presión de consigna que para el caso de la red de Cariyacu es constante e igual a 23 m.c.a. por hidrante, corresponden a las que se indican en la Tabla 5.5.

**Tabla 5.5. Valores de demanda en hidrantes. Caso RCRP  
“Cariyacu”**

ID Nudo	ID Hidrante	Dot. [L/s]	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. [L/s]	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. [L/s]
202	CC1	0.44	219	CC23	0.68	233	CC45	0.25
204	CC2	0.48		CC24	0.68		CC46	0.25
	CC3	0.48	221	CC25	0.28	235	CC47	0.51
206	CC4	0.37		CC26	0.28	236	CC48	0.69
	CC5	0.37	222	CC27	0.30		CC49	0.69
207	CC6	0.20		CC28	0.30	238	CC50	0.75
	CC7	0.20	223	CC29	0.46		CC51	0.75
209	CC8	0.46		CC30	0.46	239	CC52	0.50
	CC9	0.46	225	CC31	0.55		CC53	0.50
210	CC10	0.39		CC32	0.55	240	CC54	0.44
	CC11	0.39	226	CC33	0.49		CC55	0.44
211	CC12	0.25		CC34	0.49	242	CC56	0.67
	CC13	0.25	227	CC35	0.64		CC57	0.80
213	CC14	0.39		CC36	0.64	244	CC58	0.36
	CC15	0.39	228	CC37	0.51		CC59	0.36
214	CC16	0.41		CC38	0.51	245	CC60	0.57
	CC17	0.41	230	CC39	0.30		CC61	0.57
215	CC18	0.40		CC40	0.30	247	CC62	0.49
	CC19	0.40	231	CC41	0.29		CC63	0.49
216	CC20	0.59		CC42	0.29	248	CC64	0.39
			232	CC43	0.31		CC65	0.39
217	CC21	0.73		CC44	0.31	249	CC66	0.42
218	CC22	0.79					CC67	0.42

### 5.4.3. Resultados

#### 5.4.3.1 Bloque 1

Para la Entrada Uno, se especifica en la Tabla 5.6, en la columna [1] los ID de los nudos en donde se encuentran ubicados los hidrantes, en la columna [2] los ID de los hidrantes, en la columna [3] la asignación inicial arbitraria del número de turno (en color rojo), y en la columna [4] el valor de la dotación por hidrante en L/s. Se detalla el Costo total de diseño de la red con los turnos arbitrarios asignados en este caso. En las columnas de la derecha se contabiliza el caudal total trasegado por turno, columnas [5,6], que son los valores que se transfieren a la columna [5] de la Tabla 5.9 del módulo PNL (se detalla más adelante), en la columna [7] se especifica el caudal total que será la suma de los caudales asignados en los hidrantes en los turnos 1 y 2 según su apertura. Para el caso de la red de Cariyacu se han adoptado dos turnos para su operación. En esta misma Tabla se especifican los primeros treinta hidrantes de la red.

**Tabla 5.6. Variables de entrada topología. Caso RCRP  
“Cariyacu”**

				Q TT1: [5]	Q TT2 [6]	SQTT [7]
				14.71 [L/s]	15.85 [L/s]	30.56 [L/s]
ID Nudo	ID	ASIG.	DOTAC.			
[1]	Hidrante	TURNO	[L/S]	Q T1	Q T2	
	[2]	[3]	[4]	[L/s]	[L/s]	
202	CC1	1	0.44	0.44	0.00	
204	CC2	2	0.48	0.00	0.48	
	CC3	1	0.48	0.48	0.00	
206	CC4	1	0.37	0.37	0.00	
	CC5	2	0.37	0.00	0.37	
207	CC6	1	0.20	0.20	0.00	
	CC7	2	0.20	0.00	0.20	
209	CC8	2	0.46	0.00	0.46	
	CC9	1	0.46	0.46	0.00	
<b>Costo 9 305.47 \$</b>						
210	CC10	2	0.39	0.00	0.39	
	CC11	2	0.39	0.00	0.39	
211	CC12	1	0.25	0.25	0.00	
	CC13	2	0.25	0.00	0.25	
213	CC14	2	0.39	0.00	0.39	
	CC15	2	0.39	0.00	0.39	
214	CC16	1	0.41	0.41	0.00	
	CC17	1	0.41	0.41	0.00	
215	CC18	1	0.40	0.40	0.00	
	CC19	1	0.40	0.40	0.00	
216	CC20	1	0.59	0.59	0.00	
217	CC21	1	0.73	0.73	0.00	
218	CC22	2	0.79	0.00	0.79	
219	CC23	2	0.68	0.00	0.68	
	CC24	2	0.68	0.00	0.68	
221	CC25	1	0.28	0.28	0.00	
	CC26	1	0.28	0.28	0.00	
222	CC27	2	0.30	0.00	0.30	
	CC28	1	0.30	0.30	0.00	
223	CC29	1	0.46	0.46	0.00	
	CC30	2	0.46	0.00	0.46	

En la Entrada Dos, se introducen los siguientes valores que serán constantes en el problema planteado: valores de viscosidad cinemática y dinámica del fluido, los coeficientes a y A de la tubería obtenidos del ajuste de la función de costos de la tubería y el valor de rugosidad absoluta de la tubería (ver Tabla 5.7).

En la columna [1] de esta Tabla, se incluyen los nudos de conexión de la red, (también los nudos en donde se encuentran las tomas), en la columna [2] se localizan los nudos inicial y final de cada tramo que conforma la red, en la columna [3] se ubica el ID de cada tramo de tubería, en la columna [4] se incluyen los valores de las cotas de los nudos de conexión e hidrantes, en la columna [5] la longitud de cada tramo de la red, y en la columna [6] los valores de presión mínima requerida en los nudos de conexión e hidrantes. Esta presión puede ser diferente según la toma y según el turno que corresponda. En un mismo nudo

puede existir más de un hidrante y cada uno adoptará el valor de presión según el turno al que se encuentre asignado.

**Tabla 5.7. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Cariyacu”**

<b>Datos generales</b>					
Viscosidad cinemática	0,000001 m <sup>2</sup> /s				
Rugosidad absoluta	7,00E-03 mm				
<u>Curva de costo de la tubería</u>					
Coefficiente A	745				
Exponente a	1,975				
Viscosidad dinámica	1,00E-03 kg/m.s				

<b>Turno 1</b>					
ID Nudo	Nin-Nfin	ID Línea	Cota [m]	Longitud [m]	Pmin [mca]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
200			2597.00		
201	200-201	TU1	2573.00	126.00	23.00
202	201-202	TU2	2562.00	41.48	23.00
203	201-203	TU3	2569.00	58.14	23.00
204	203-204	TU4	2562.00	40.61	23.00
205	203-205	TU5	2568.00	82.01	23.00
206	205-206	TU6	2561.00	40.61	23.00
207	206-207	TU7	2548.00	81.06	23.00
208	205-208	TU8	2567.00	82.01	23.00
209	208-209	TU9	2558.00	41.00	23.00
210	209-210	TU10	2548.00	80.62	

<b>Turno 2</b>					
ID Nudo	Nin-Nfin	ID Línea	Cota [m]	Longitud [m]	Pmin [mca]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
200			2597.00		
201	200-201	TU1	2573.00	126.00	
202	201-202	TU2	2562.00	41.48	
203	201-203	TU3	2569.00	58.14	23.00
204	203-204	TU4	2562.00	40.61	23.00
205	203-205	TU5	2568.00	82.01	23.00
206	205-206	TU6	2561.00	40.61	23.00
207	206-207	TU7	2548.00	81.06	23.00
208	205-208	TU8	2567.00	82.01	23.00
209	208-209	TU9	2558.00	41.00	23.00
210	209-210	TU10	2548.00	80.62	23.00

5.4.3.2 Bloque 2

En esta fase se designan valores a las variables que forman parte del AG y de la PNL. Estos valores se adoptaron de algunas referencias bibliográficas cuyo resultado ha sido exitoso, y también de un proceso de ajuste que se efectuó en esta investigación para el caso de los operadores genéticos.

**Configuración AG**

Se emplea la Tabla 5.8 para la explicación de la definición del modelo de optimización. Se establece el rango de variables para la asignación del número de turno, empleando la celda “CellRange”, que en este caso corresponde a la columna ASIG. TURNO, columna [3], la celda objetivo para la optimización será la que se observa como “Costo” en la Tabla, que corresponde a la expresión de la Función de Costos.

**Tabla 5.8. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Cariyacu”**

ID Nudo [1]	ID Hidrante [2]	ASIG. TURNO [3]	DOTAC. [L/S] [4]
202	CC1	1	0.44
204	CC2	2	0.48
	CC3	1	0.48
206	CC4	1	0.37
	CC5	2	0.37
207	CC6	1	0.20
	CC7	2	0.20
209	CC8	2	0.46
	CC9	1	0.46
210	CC10	2	0.39
	CC11	2	0.39

**Costo 9 305.45**

Se especifica el método de solución usado en el AG, en este caso la opción “Recipe” a través de “Solving Method”, que resuelve problemas combinatorios complejos. Los procesos de supervivencia y reproducción del AG se ejecutan usando los operadores genéticos que son la reproducción, el cruce y la mutación (Moradi-Jalal y Karney, 2008), se asignan en la opción “Operators”. Se

configura, además el tamaño de la población con la opción “*Population Size*”. Otro aspecto que se establece es el número de generaciones con “*Randon Number Generator Seed*”. Para asignar la forma de visualizar los resultados del algoritmo híbrido, se eligen las opciones “*Show excel recalculations*” y “*Keep Log of All Trials*”.

En este estudio se ha fijado como valor de referencia para el operador de cruzamiento una probabilidad de cruce ( $P_c$ ) de 0.5 (Mora, 2012). Por otro lado, Mora-Melia et al. (2013) proponen determinar la probabilidad de mutación ( $P_m$ ) en función de la cantidad de variables de decisión del problema, a través de tomar la inversa, es decir,  $1/N_h$  y define el espacio de las soluciones factibles para reducir el tiempo de búsqueda. Así para el caso de la red de Cariyacu que tiene 67 hidrantes y para ajustar el AG se han probado valores de población de 50, 100 y 200 individuos; con  $P_c$  de 0.1 y 0.5, y valores de  $P_m$  entre  $1/N_{VD}$  y 0.9.

### ***Configuración PNL***

Se instruye al algoritmo de PNL a través de una hoja Excel, en donde la función que cumple es minimizar la celda de COSTO TOTAL que será la suma de los costos de cada tramo de tubería que se encuentran en la Tabla 5.9, columna [9]. En esta misma Tabla se muestra la hoja de la herramienta Excel que se usa para configurar las variables y las restricciones de la Función objetivo. Las incógnitas del problema corresponden a los diámetros que aparecen en la columna [7], la primera restricción queda configurada cuando se señala que los valores de presión en los nudos de demanda conocida, columna [11] sean mayores que los valores de presión mínima requerida en los mismos, columna [8] para los dos turnos de operación de esta red, esta expresión se relaciona con la [Ecuación 5.18]. La función objetivo, que es la expresión de la Función de Costos [Ecuación 5.2] se vincula con la celda “COSTO TOTAL” [margen superior derecho], que resulta de sumar todos los costos obtenidos en cada tramo de la red, columna [9] y a su vez de emplear los coeficientes  $a$  y  $A$  de la tubería por la longitud de cada tramo. Los valores que se marcan con color negro constituyen la transcripción de los datos topológicos (Entrada Uno), columnas [1,2,3,4,6 y 8] en azul los datos que vienen de la asignación de los turnos, columna [5], en color rojo son los resultados luego de la ejecución de la PNL, columnas [7, 9 y 11] y el COSTO TOTAL. Y

en color púrpura los valores de altura piezométrica en los nudos de la red, columna [10].

Tabla 5.9. Celdas para configurar la PNL

COSTO TOTAL <b>9307,4</b>										
Turno 1										
Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Línea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [USD] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
200			2597.00							
201	200-201	TU1	2573.00	14.71	126.00	130.79	0.00	1709.72	2596.00	23.00
202	201-202	TU2	2562.00	0.44	41.48	21.59	23.00	15.72	2592.40	30.40
203	201-203	TU3	2569.00	14.27	58.14	109.68	0.00	556.05	2594.98	25.98
204	203-204	TU4	2562.00	0.48	40.61	22.49	23.00	16.68	2591.59	29.59
205	203-205	TU5	2568.00	13.78	82.01	108.71	0.00	770.62	2593.56	25.56
206	205-206	TU6	2561.00	0.57	40.61	23.85	23.00	18.76	2590.13	29.13
207	206-207	TU7	2548.00	0.20	81.06	20.00	23.00	26.38	2587.56	39.56
208	205-208	TU8	2567.00	13.21	82.01	107.53	0.00	754.14	2592.18	25.18
209	208-209	TU9	2558.00	0.71	41.00	28.98	23.00	27.88	2590.17	32.17
210	209-210	TU10	2548.00	0.25	80.62	26.26	0.00	45.08	2589.18	41.18
211	210-211	TU11	2537.00	0.25	110.55	20.00	23.00	35.98	2584.19	47.19
212	208-212	TU12	2566.00	12.50	114.00	105.01	0.00	1000.08	2590.23	24.23
213	212-213	TU13	2558.00	2.94	40.79	45.40	0.00	67.64	2587.29	29.29
214	213-214	TU14	2549.00	2.94	80.44	44.76	23.00	129.71	2581.09	32.09
215	214-215	TU15	2544.00	2.12	80.22	42.00	23.00	114.00	2576.44	32.44
216	215-216	TU16	2535.00	1.32	84.48	36.27	23.00	89.70	2572.19	37.19
217	216-217	TU17	2534.00	0.73	40.01	34.88	23.00	39.31	2571.35	37.35
218	217-218	TU18	2532.00	0.00	40.05	33.75	0.00	36.86	2571.35	39.35
219	218-219	TU19	2521.00	0.00	75.80	29.42	0.00	53.09	2571.35	50.35
220	212-220	TU20	2564.00	9.56	72.03	87.01	23.00	434.98	2588.35	24.35

Turno 2										
Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Línea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [USD] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
200			2597.00							
201	200-201	TU1	2573.00	15.86	126.00		0.00	1709.72	2595.85	22.85
202	201-202	TU2	2562.00	0.00	41.48		0.00	15.72	2595.85	33.85
203	201-203	TU3	2569.00	15.86	58.14		0.00	556.05	2594.61	25.61
204	203-204	TU4	2562.00	0.48	40.61		23.00	16.68	2591.23	29.23
205	203-205	TU5	2568.00	15.37	82.01		0.00	770.62	2592.88	24.88
206	205-206	TU6	2561.00	0.57	40.61		23.00	18.76	2589.45	28.45
207	206-207	TU7	2548.00	0.20	81.06		23.00	26.38	2586.88	38.88
208	205-208	TU8	2567.00	14.80	82.01		0.00	754.14	2591.18	24.18
209	208-209	TU9	2558.00	1.50	41.00		23.00	27.88	2583.50	25.50
210	209-210	TU10	2548.00	1.04	80.62		23.00	45.08	2571.00	23.00
211	210-211	TU11	2537.00	0.25	110.55		23.00	35.98	2566.01	29.01
212	208-212	TU12	2566.00	13.30	114.00		23.00	1000.08	2589.00	23.00
213	212-213	TU13	2558.00	2.92	40.79		23.00	67.64	2586.10	28.10
214	213-214	TU14	2549.00	2.14	80.44		0.00	129.71	2582.60	33.60
215	214-215	TU15	2544.00	2.14	80.22		0.00	114.00	2577.86	33.86
216	215-216	TU16	2535.00	2.14	84.48		0.00	89.70	2567.68	32.68
217	216-217	TU17	2534.00	2.14	40.01		0.00	39.31	2561.85	27.85
218	217-218	TU18	2532.00	2.14	40.05		23.00	36.86	2555.00	23.00
219	218-219	TU19	2521.00	1.36	75.80		23.00	53.09	2544.00	23.00
220	212-220	TU20	2564.00	10.38	72.03		0.00	434.98	2586.82	22.82

#### 5.4.3.3 Bloque 3 (Ejecución AG-PNL)

El AG-PNL de optimización se fundamenta en los resultados de la función objetivo “costo óptimo” enviados desde la Entrada Uno (Módulo AG) a la Entrada Dos (Módulo de PNL). Para la comunicación de los dos archivos existe un programa (Main Evolver) que se creó para controlar el envío de los turnos, la ejecución de Risk Solver y el retorno de los datos. En ambos ficheros se controla la transferencia de información, y se supervisa de forma dinámica los dos archivos para evitar la generación de conflictos.

La implementación del algoritmo híbrido AG-PNL se realiza mediante la interconexión de las herramientas EVOLVER (que trabaja el AG) que cumple con la función de buscar la combinación de turnos ideal para encontrar el costo mínimo de diseño y SOLVER (que aborda la PNL) mediante la plataforma EXCEL que realiza el diseño económico mínimo. Cumpliendo las Entradas Uno y Dos del Bloque 1, y las asignaciones del Bloque 2 se procederá con la ejecución del Algoritmo Híbrido.

Dentro del AG-PNL se encuentran archivos de ejecución dinámica con la finalidad de llamar, trasladar, leer la información, y levantar el subproceso para la ejecución de las instrucciones a través de SOLVER. El proceso por cada trial es controlado por EVOLVER, para que se cumpla la rutina que se observa en el Bloque 3 de la Figura 5.6.

Finalizada la implementación del AG-PNL se verifica que el diámetro de diseño de los tramos de tubería de la red, es el mismo para los dos turnos con que opera la red ejemplo. Se comprueba el cumplimiento de la restricción de la presión mínima en cada hidrante y en cada escenario o turno. La ejecución del AG-PNL se da inicio con una asignación impuesta de turnos a los hidrantes que conforman la red.

En la Tabla 5.10 se especifican los diámetros de diseño continuos de todos los tramos que conforman la red ejemplo “Cariyacu”, que resultan de la aplicación de la metodología AG-PNL, estos diámetros serán válidos para el turno uno y dos con los que opera esta red en particular.



**Tabla 5.10. Diseño hidráulico de la red Cariyacu, luego de implementar AG-PNL**

ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]
		TU25	39.47
TU1	130.79	TU26	36.86
TU2	21.59	TU27	34.38
TU3	109.68	TU28	22.95
TU4	22.49	TU29	78.66
TU5	108.71	TU30	39.47
TU6	23.85	TU31	37.85
TU7	20.00	TU32	36.09
TU8	107.53	TU33	33.20
TU9	28.98	TU34	29.00
TU10	26.26	TU35	29.00
TU11	20.00	TU36	28.99
TU12	105.01	TU37	72.06
TU13	45.40	TU38	48.28
TU14	44.76	TU39	44.69
TU15	42.00	TU40	40.14
TU16	36.27	TU41	40.16
TU17	34.88	TU42	36.29
TU18	33.75	TU43	36.28
TU19	29.42	TU44	22.45
TU20	87.01	TU45	21.80
TU21	33.60	TU46	52.54
TU22	29.63	TU47	47.34
TU23	26.53	TU48	28.58
TU24	83.58	TU49	25.81

La asignación del turno en los hidrantes o nudos de consumo de la red que proporciona el diseño de la red ejemplo, se aprecia en la Tabla 5.11.

**Tabla 5.11. Resultados de asignación de turno con modelo AG-PNL en cada hidrante de la red de riego Cariyacu**

Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]
2	1	0.44	21	1	0.29	36	2	0.69
4	2	0.48		1	0.29		1	0.69
	2	0.48	22	2	0.30	38	1	0.75
6	2	0.37		2	0.30		1	0.75
	2	0.37	23	2	0.46	39	2	0.50
7	2	0.20		1	0.46		2	0.50
	1	0.20	25	1	0.55	40	2	0.44
9	2	0.46		1	0.55		2	0.44
	2	0.46	26	2	0.49	42	1	0.67
10	2	0.39		2	0.49		2	0.80
	1	0.39	27	2	0.64	44	2	0.36
11	1	0.25		1	0.64		1	0.36
	2	0.25	28	2	0.51	45	2	0.57
13	1	0.39		1	0.51		1	0.57
	1	0.39	30	1	0.30	47	1	0.49
14	2	0.41		1	0.30		1	0.49
	2	0.41	31	2	0.29	48	2	0.39
15	2	0.40		2	0.29		2	0.39
	1	0.40	32	1	0.31	49	2	0.42
16	2	0.59		2	0.31		2	0.42
17	2	0.73	33	2	0.25			
18	1	0.79		1	0.25			
19	2	0.68	35	2	0.51			
	1	0.68						

## 5.5. Normalización de conductos

Para el diseño hidráulico de una red es indispensable calcular los diámetros de las tuberías que la conforman. En este caso, el modelo de programación AG-PNL proporciona diámetros que son continuos; será necesario, por tanto, traducirlos a diámetros discretos o reales a través de la normalización.

Este proceso es determinante en el costo de la red y sus prestaciones, para lo cual se sustituye el diámetro teórico resultante del método de AG-PNL por el diámetro normalizado más cercano en tamaño de la gama de tuberías, (en unos casos mayores y otros menores). Además, se controlan las pérdidas de carga para llegar con la presión suficiente en los nudos de consumo, de manera que, si la presión

es inferior a la mínima requerida, se amplían los diámetros, dando preferencia a la ampliación de los diámetros de los ramales extremos, lo que provoca como consecuencia que el diseño normalizado tenderá a sobredimensionar dichos tramos. Como se verá en el capítulo 7, esta tendencia originará un efecto beneficioso sobre la flexibilidad de la red. También se verifica que la velocidad del flujo no exceda los máximos prefijados en la totalidad de las conducciones de la red, y si es así se amplía el diámetro hasta que se cumplen las restricciones de velocidad.

Otra consideración adicional e importante, es satisfacer la condición telescópica en la sucesión de tramos de tubería, por lo que también se da preferencia a la ampliación de tramos que no violan este requisito. En consecuencia, el ajuste de diámetros que se ejecuta aplicando todos estos criterios ingenieriles en forma heurística mediante tanteos, no será necesariamente óptimo económico.

Si la red es pequeña, al efectuar la normalización por el protocolo descrito las posibilidades del ajuste que se realiza tienen grados de libertad limitados. Es de prever que cuando la red es de mayor tamaño, al encontrar mayor número de tuberías se multiplican las combinaciones o soluciones de normalización posibles que satisfacen los requisitos de presión, velocidad y telescopia, por lo que la solución normalizada que se elabora mediante tanteo seguramente no será la de menor costo.

Se deduce entonces que, con este proceso de normalización, se pierden algunas de las virtudes de la optimización lograda con el algoritmo AG-PNL, pero si el cambio de las variables continuas a discretas se realiza con criterios racionales y tomando en cuenta el cumplimiento de parámetros idóneos para el funcionamiento de la red; se logran resultados finales acertados en el diseño. Obteniendo también con este proceso, el diseño de referencia para el análisis ulterior.



# Capítulo 6 : Comparación con Métodos Alternativos y Flexibilidad

## 6.1. Introducción

En este capítulo se desarrolla un análisis sistemático que tiene como finalidad validar la correcta implementación del algoritmo híbrido AG-PNL propuesto, e investigar las prestaciones que suministra. Para ello, se aplica el Algoritmo Híbrido AG-PNL a un conjunto de redes reales seleccionadas como “casos de estudio”, y sus resultados se comparan con métodos alternativos de diseño óptimo que emplean otros algoritmos y criterios. Mediante estos mismos casos de estudio se procede, en primer lugar, al ajuste de los parámetros que influyen en los resultados del AG y en la definición del Índice de Flexibilidad ante Cambio de Turnos (*IFCT*).

El proceso de validación sigue la secuencia que se enuncia a continuación:

1. Búsqueda y selección de un número suficiente de casos de estudio representativos y variados.
2. Ajuste de parámetros del AG y análisis de sensibilidad del *IFCT*,

mediante los casos de estudio.

3. Comparación de los resultados del Algoritmo Híbrido AG-PNL con otros métodos de diseño de redes a turnos, y a la demanda en condiciones equiparables.

## **6.2. Búsqueda y selección de casos de estudio**

Para validar y determinar las prestaciones del Método Híbrido AG-PNL se realizan las siguientes consideraciones:










- Se revisaron proyectos reales con documentación disponible de redes ramificadas de riego (que en su día fueron proyectadas generalmente a la demanda) en que la altura piezométrica de cabecera es conocida, condición que corresponde a las restricciones del AG-PNL en su formulación actual.
- Para intentar obtener resultados significativos se hizo un filtrado de estas redes con objeto de seleccionar aquellas con diversidad de condiciones, con altimetría regular e irregular, con única y diversas presiones de consigna, con dotaciones de riego homogéneas y diferentes, con automatización (que permite el riego también en horas nocturnas) y sin ella, provenientes de sistemas de riego reales europeos y ecuatorianos.
- Este conjunto de redes seleccionado posee diferencias en sus requerimientos hídricos y en su caracterización topográfica. Por tanto, esto implicará un amplio espectro de casuística y de variantes, que permitirá obtener conclusiones más representativas. Las especies cultivadas en los sistemas de riego seleccionados para este trabajo son: patata, tomate, alfalfa, maíz, legumbres y árboles frutales. El riego se realiza por aspersión para los cultivos extensivos y por gotero para los árboles frutales.

También se realizó una búsqueda selectiva en la literatura de los casos de estudio referentes al diseño óptimo de sistemas de riego operando a turnos, resultando escasos e insuficientemente documentados. Se encontraron algunos trabajos que generan y comparan diseños a turnos y a la demanda, pero que no aportan información completa que permitan reproducirlos. Únicamente se ha localizado un precedente Farmani, Abadia y Savic (2007) que realizan el diseño óptimo empleando Algoritmos Genéticos y que contempla el uso de tuberías de diferentes Presiones Nominales. No obstante, este caso tampoco fue posible

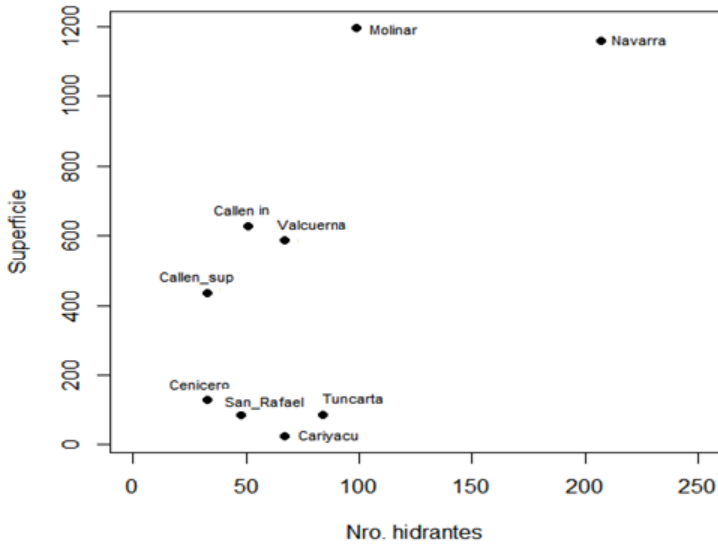
incorporarlo para comparar los resultados ya que en la formulación de AG-PNL en su estado actual, se restringe a una única Presión Nominal en todas las redes. En las redes de riego en que se han basado los Casos de Estudio, se supone han sido proyectadas en base a estudios previos correctamente realizados. En éstos se ha considerado como fundamento para el diseño toda la información sobre: suelos, características físicas del entorno de la zona regable, costumbres y preferencias de los agricultores, prospección del mercado de los productos agrícolas, estudios agronómicos, método de riego, distribución de la propiedad y en general toda la información previa.

Los sistemas de riego finalmente seleccionados para la presente investigación son nueve, tres de ellos corresponden a comunidades rurales de Ecuador y seis a España con superficies de cobertura desde de 26 a 1196 ha, atendidas por un número de hidrantes en el rango de 33 a 207. El caudal ficticio continuo para cada sistema de riego se obtiene partiendo del estudio agronómico, sus valores se encuentran en el rango de 0.29 a 0.80 L/s y ha. Seguidamente se especifican los nombres de los sistemas de riego y las singularidades como número de hidrantes, superficie de riego, caudal ficticio continuo y Jornada Efectiva de Riego (JER) (ver Tabla 6.1). En el epígrafe 6.3 se encuentran la descripción y la topología de los dos grupos de redes estudiadas.

**Tabla 6.1. Área de riego, número de hidrantes de redes de estudio**

Sistema de Riego	Número Hidrantes	Superficie riego [ha]	Caudal ficticio continuo [L/s y ha]	JER [h]	País procedencia red
Callén Inferior	51	628.30	0.80	23.52	
Tuncarta	84	93.56	0.35	23.82	
Cariyacu	67	26.07	0.56	24.00	
Valcuema	67	585.65	0.82	23.62	
Cenicero	33	130.37	0.29	7.02	
Molinar I	99	1196.00	0.81	24.00	
Navarra	207	1160.00	0.59	16.32	
Callén Superior	33	434.15	0.80	19.46	
San Rafael	48	84.42	0.30	17.49	

En la Figura 6.1 se observa la variabilidad de superficies de riego con sus hidrantes ( $N_h$ ), lo que evidencia el amplio espectro de casuística y de variantes que se presentan en las redes seleccionadas.



**Figura 6.1 Correlación superficie de riego y su Nro. Hidrantes**

Las presiones de consigna de las tomas (hidrantes) de las Redes Colectivas de Riego a Presión (RCRP) seleccionadas para el estudio, son diversas. Se observa en la Tabla 6.2 que solamente cuatro de ellas tienen una única presión de consigna, mientras que las restantes deberán cumplir presiones de consigna con diferentes rangos de operación.



**Tabla 6.2. Cota de embalse y presión de consigna redes de estudio**

<b>Sistema de Riego</b>	<b>Cota embalse [mca]</b>	<b>Presión consigna [mca]</b>	<b>Desniveles [Zmáx / Zmín]</b>
Callén Inferior	437.50	45.00 - 65.00	1.30
Tuncarta	1 540.00	40.00	1.19
Cariyacu	2 597.00	23.00	1.04
Valcuerna	399.00	40.00	1.71
Cenicero	710.50	21.25 - 104.27	1.27
Molinar I	436.00	44.37 - 72.42	1.31
Navarra	489.00	34.91 - 97.00	1.43
Callén Superior	455.00	40 - 69	1.27
San Rafael	3 093.00	40.00	1.35

Se cuenta en primer lugar, con los datos de topología y trazado de la red. Para el cálculo de los caudales circulantes en cada sistema de riego se adoptan todos los datos proporcionados en el estudio agronómico como son: jornada efectiva de riego, dotaciones por hidrante rendimiento de la red (si el proyecto original es a la demanda), y en caso de haber turnos en el proyecto original, número de turnos y su tiempo de duración (ver Tabla 6.3).

Las duraciones de los turnos de riego en las diferentes redes, varían desde 2 hasta 12 horas. Esta información facilitará el cálculo del tiempo en que la red está disponible para efectuar el riego en cada caso. También se considera que, en el turno de la tarde, el cálculo se debe realizar considerando que la jornada de riego real es menor que las ocho horas, debido a que los usuarios evitan las últimas horas del día al no disponer de luz natural. Con este antecedente se asume que para las redes que riegan superficies significativamente menores y están conformadas por parcelas de menor tamaño es de suponer que los regantes tienen la posibilidad de atender las necesidades en un tiempo muy inferior al total del día. Este particular es posible que genere la concentración en ciertos días y horas de mayor comodidad. La distinción entre jornada de riego real y jornada total (tiempo en que está disponible la red) se efectúa mediante el valor de la variable rendimiento ( $r$ ) de la red cuando el riego es a la demanda.

**Tabla 6.3. Número de turno y tiempos de riego de redes de estudio**

RED	Nro. Turnos	Turno 1		Turno 2		Turno 3	
		Tiempo riego [Horas]	Caudal [L/s]	Tiempo riego [Horas]	Caudal [L/s]	Tiempo riego [Horas]	Caudal [L/s]
Callén Inferior	2	11.76	771.00	11.76	684.00		
Tuncarta	3	7.94	37.00	7.94	40.00	7.94	40.00
Cariyacu	2	12.00	14.80	12.00	15.90		
Valcuerna	2	11.81	808.00	11.81	757.00		
Cenicero	3	2.34	175.00	2.34	102.00	2.34	177.00
Molinar I	3	8.00	1 025.40	8.00	1 033.50	8.00	857.70
Navarra	3	5.44	1 195.00	5.44	1 157.40	5.44	1 106.00
Callén Superior	2	9.73	677.00	9.73	391.00		
San Rafael	3	5.83	31.00	5.83	35.00	5.83	38.00

Los sistemas de riego que se han decidido diseñar con tres turnos, en función del tiempo de riego de los hidrantes, son: Tuncarta, Cenicero, Molinar I, Navarra y San Rafael. Los tiempos de riego que se usan en cada uno de los turnos se han asignado de acuerdo al estudio agronómico y a las características propias de cada red. La red de riego de Navarra se caracteriza por contar con el mayor caudal circulante en cada uno de los turnos de riego, ya que cuenta con 207 hidrantes e incluye mayor número de usuarios. Por su parte, los caudales circulantes en cada turno en la red de Cariyacu cubren el menor valor de área de riego.

Cuando se relaciona el caudal que circula en las redes por cada turno y la superficie que riegan (ver Figura 6.2), se obtiene un valor de correlación que asciende a 0.98. Las necesidades de los cultivos aun siendo diferentes, serán proporcionales a la superficie de riego, es decir a mayor superficie de riego se necesitará más caudal para satisfacer las demandas.

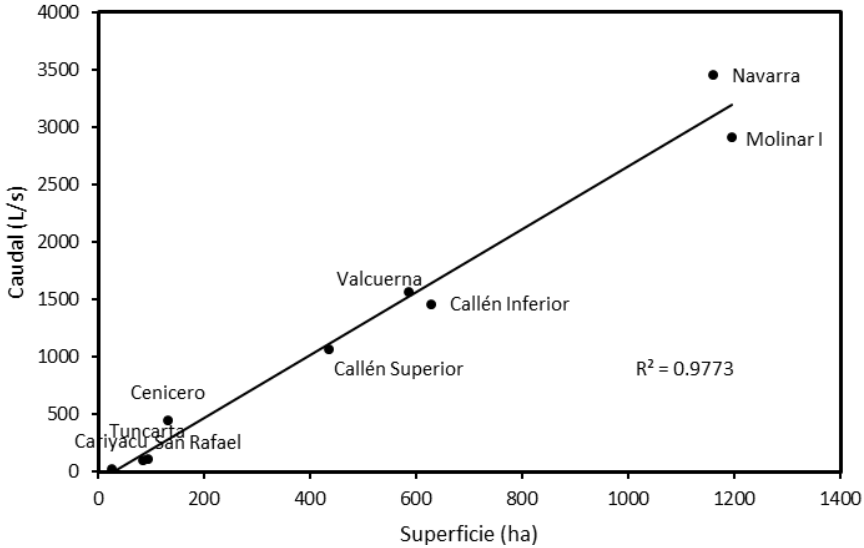


Figura 6.2. Correlación: Caudal requerido y Superficie regada en casos de estudio

### 6.3. Casos de estudio seleccionados

Se describe a continuación la información agronómica e hidráulica para el diseño de cada sistema de riego seleccionado.

#### 6.3.1. Red Callén Inferior

La cabecera de esta red de riego está situada en la provincia de Huesca (España) se abastece del Canal del Flumen, con una altura promedio de 437.5 msnm. Se detalla en la Figura 6.3 su distribución topológica y en la Tabla 6.4 las características agronómicas y singularidades propias. La red se explotará mediante 2 turnos. El Anexo A contiene los datos topológicos necesarios para el diseño y los resultados de la implementación del algoritmo híbrido.

**Tabla 6.4. Datos agronómicos e hidráulicos Red Callén Inferior**

<b>Características de la red</b>	
Número de hidrantes	51.00
Número de líneas	92.00
Superficie de riego [ha]	628.30
Dotación instalada [m <sup>3</sup> /s]	0.34
Cota embalse superficie libre [mca]	437.50
Presiones de consigna [mca]	45-65
Caudal ficticio continuo [L/s y ha]	0.80
Jornada Efectiva de Riego [h]	23.52

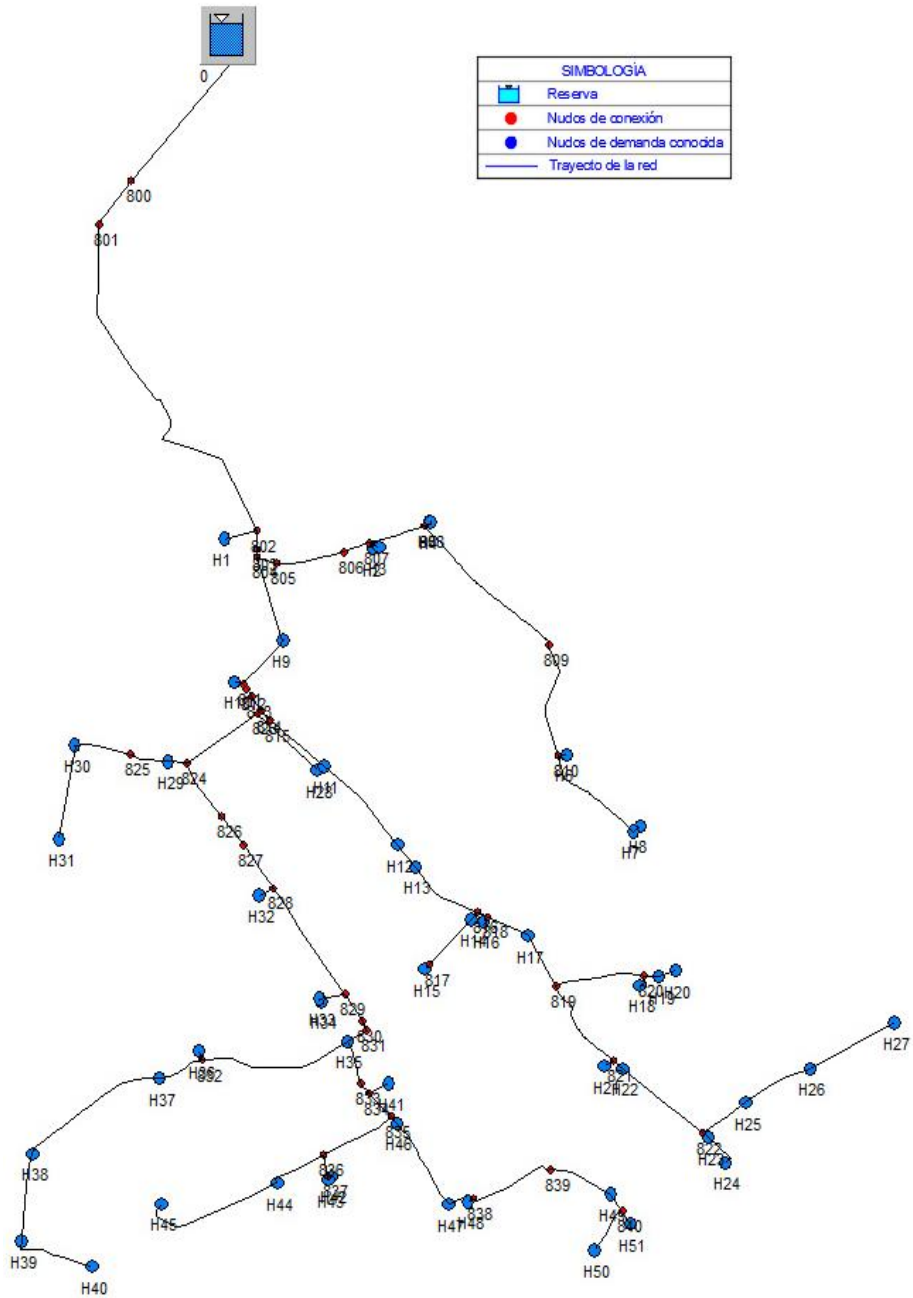


Figura 6.3. Topología Red Callén Inferior

### **6.3.2. Red Tuncarta**

La cabecera de esta red se ubica a una altitud promedio de 2494 msnm. El agua proviene de la quebrada denominada la Sillada. La red está diseñada para operar con tres turnos. Se detalla en la Figura 6.4 la distribución topológica de la red y en la Tabla 6.5 la información pertinente del sistema de riego de la comunidad. En el Anexo B, constan los datos topológicos de la red usados en el diseño y los resultados de la implementación del algoritmo híbrido.

**Tabla 6.5. Datos agronómicos e hidráulicos Red Tuncarta**

<b>Características de la red</b>	
Número de hidrantes	84.00
Número de líneas	140.00
Superficie de riego [ha]	93.56
Dotación instalada [m <sup>3</sup> /s]	0.12
Cota embalse superficie libre [mca]	1 540.00
Presiones de consigna [mca]	40.00
Caudal ficticio continuo [L/s y ha]	0.35
Jornada Efectiva de Riego [h]	23.82

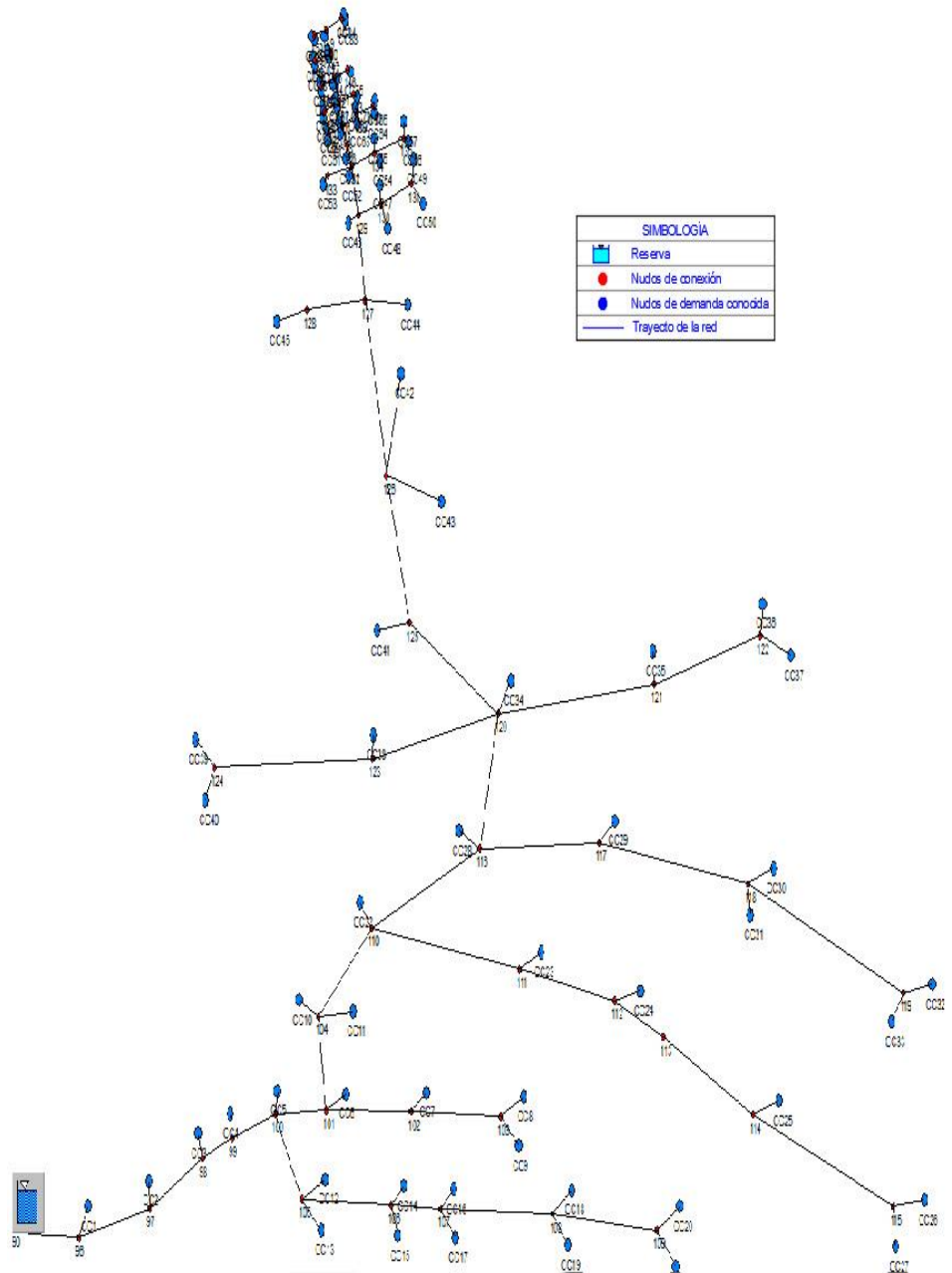


Figura 6.4. Topología Red Tuncarta

### **6.3.3. Red Cariyacu**

La red de riego Cariyacu pertenece a la parroquia La Matriz del cantón Patate provincia de Tungurahua, su cabecera se halla a una altitud promedio de 2400 msnm. La red está conformada por los hidrantes y líneas que se distinguen en la Figura 6.5, se diseñó para operar con dos turnos. Esta comunidad está servida por la acequia “Cima La Pradera”. Se anotan en la Tabla 6.6 los datos empleados en el diseño de la red. En el Anexo C se documentan los datos topológicos de la misma y los resultados de la implementación del algoritmo híbrido.

**Tabla 6.6. Datos agronómicos e hidráulicos Red Cariyacu**

---

<b>Características de la red</b>	
Número de hidrantes	67.00
Número de líneas	116.00
Superficie de riego [ha]	26.07
Dotación instalada [m <sup>3</sup> /s]	0.03
Cota embalse superficie libre [mca]	2 597.00
Presiones de consigna [mca]	23.00
Caudal ficticio continuo [L/s y ha]	0.56
Jornada Efectiva de Riego [h]	24.00

---



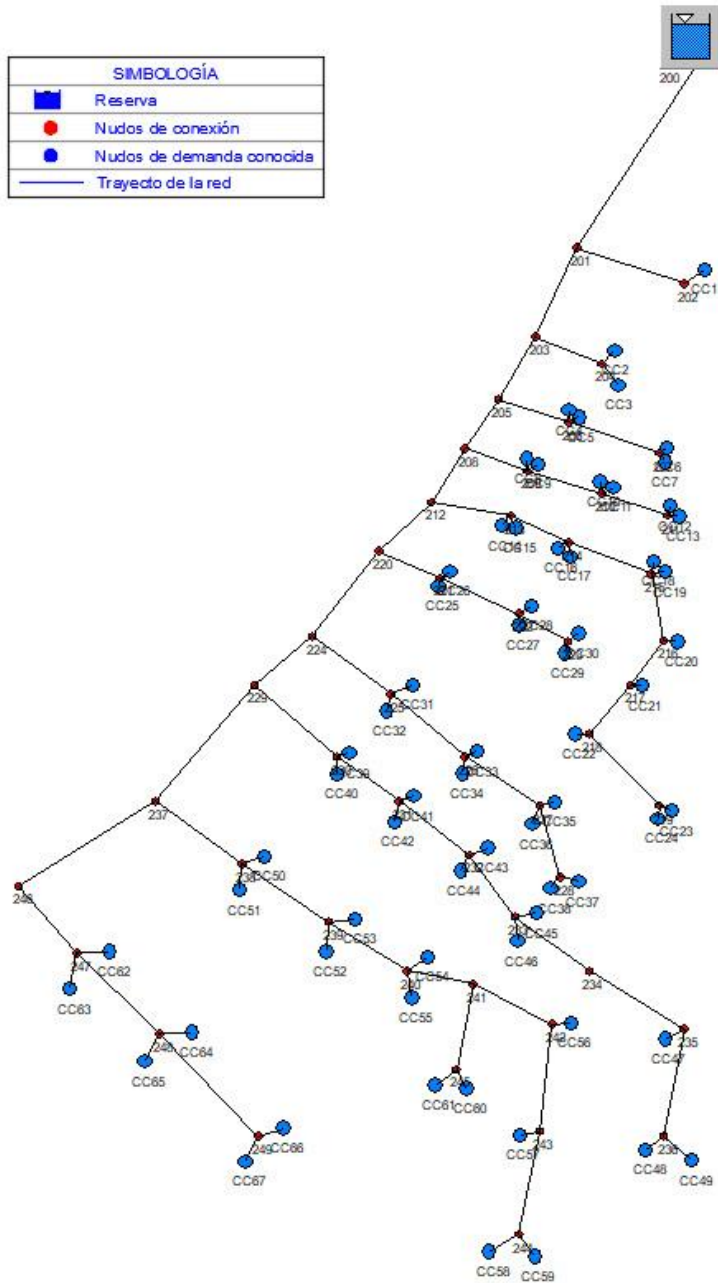


Figura 6.5. Topología Red Cariyacu

#### **6.3.4. Red Valcuerna**

La cabecera del sistema de riego Valcuerna se encuentra en la Provincia de Huesca, y se abastece del Canal de Monegros. El diseño de la red se proyectó para una operación de dos turnos de riego. Se detalla en la Figura 6.6 la distribución topológica de esta red, y en la Tabla 6.7 las características agronómicas y singularidades propias de esta red. El Anexo D contiene los datos topológicos necesarios para su diseño y los resultados de la implementación del algoritmo híbrido.

**Tabla 6.7. Datos agronómicos e hidráulicos Red Valcuerna**

<b>Características de la red</b>	
Número de hidrantes	67.00
Número de líneas	97.00
Superficie de riego [ha]	585.65
Dotación instalada [m <sup>3</sup> /s]	1.57
Cota embalse superficie libre [mca]	399.00
Presiones de consigna [mca]	40.00
Caudal ficticio continuo [L/s y ha]	0.82
Jornada Efectiva de Riego [h]	23.62

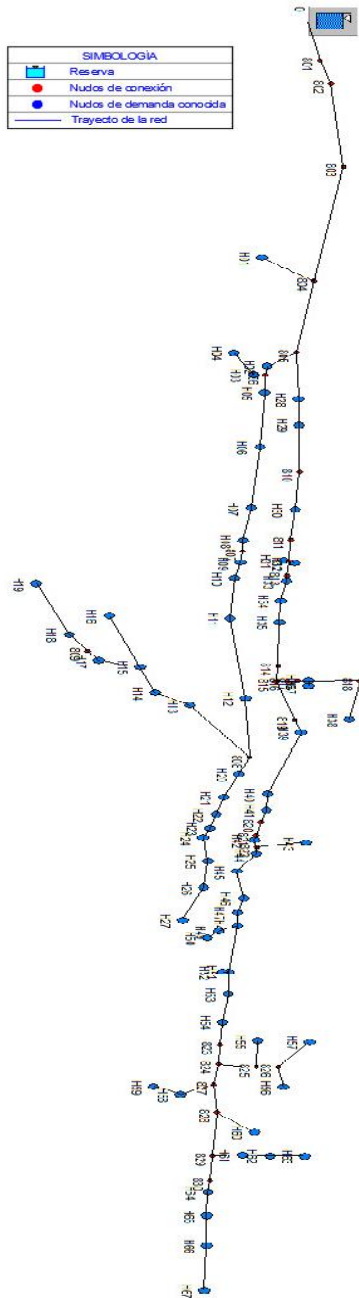


Figura 6.6. Topología Red Valcuerna

### **6.3.5. Red Cenicero**

La cabecera de la red de Cenicero está ubicada en La Rioja (España) y capta el agua del canal de la margen derecha del Najerilla. Tiene una configuración topológica como se observa en la Figura 6.7, y se consideró para su explotación tres turnos para el riego. Se detalla en Tabla 6.8 la información pertinente al sistema de riego de esta comunidad regante y en el Anexo E los datos topológicos empleados para el diseño y los resultados de la implementación del algoritmo híbrido.

**Tabla 6.8. Datos agronómicos e hidráulicos Red Cenicero**

<b>Características de la red</b>	
Número de hidrantes	33.00
Número de líneas	68.00
Superficie de riego [ha]	130.37
Dotación instalada [m <sup>3</sup> /s]	0.45
Cota embalse superficie libre [mca]	710.50
Presiones de consigna [mca]	21.25-104.27
Caudal ficticio continuo [L/s y ha]	0.29
Jornada Efectiva de Riego [h]	7.02

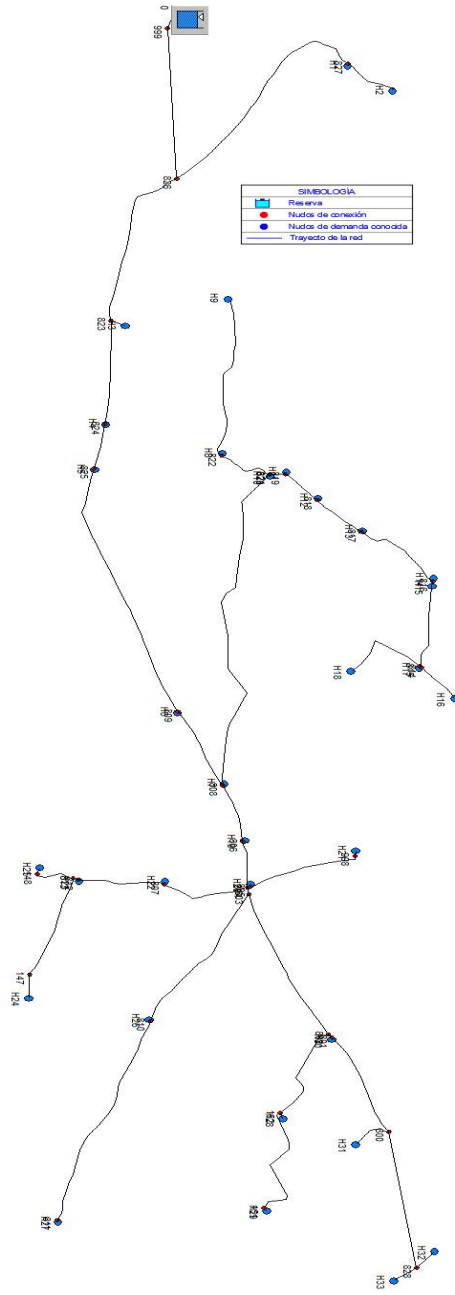


Figura 6.7. Topología Red Cenicero

### **6.3.6. Red Molinar I**

El sistema de riego Molinar I se ubica en la provincia de Huesca (España). La cabecera de la red está a una altura promedio de 436 msnm. La red está conformada por los hidrantes y líneas que se distinguen en la Figura 6.8 y se consideró para su operación tres turnos. Esta red capta el agua del Canal del Flumen Superior. Se observan en la Tabla 6.9 los datos concernientes al diseño de la red y en el Anexo F sus datos topológicos y los resultados de la implementación del algoritmo híbrido.

**Tabla 6.9. Datos agronómicos e hidráulicos Red Molinar I**

<b>Características de la red</b>	
Número de hidrantes	99.00
Número de líneas	200.00
Superficie de riego [ha]	1 196.00
Dotación instalada [m <sup>3</sup> /s]	2.92
Cota embalse superficie libre [mca]	436.00
Presiones de consigna [mca]	44.37-72.42
Caudal ficticio continuo [L/s y ha]	0.81
Jornada Efectiva de Riego [h]	24.00

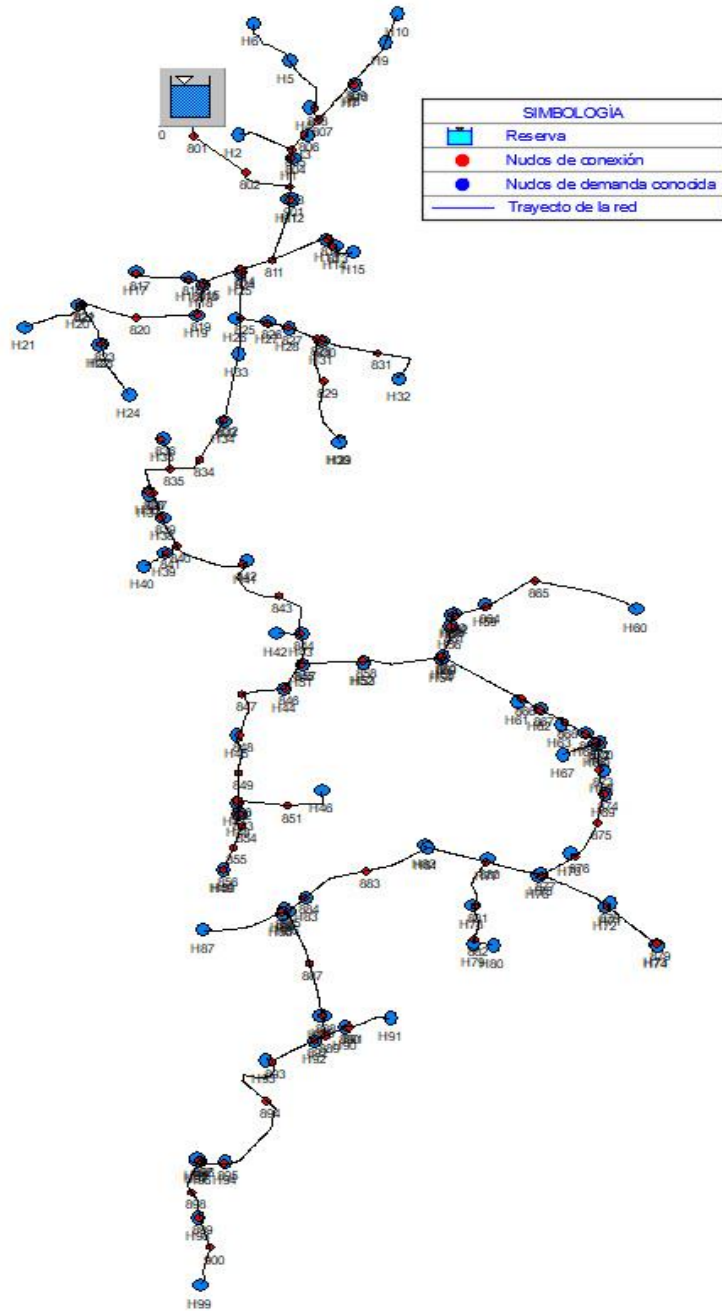


Figura 6.8. Topología Red Molinar I

### **6.3.7. Red Navarra**

La red está configurada por hidrantes y líneas (ver Figura 6.9), con altura promedio de cabecera de 489 msnm. Se diseñó para una explotación de tres turnos. En la Tabla 6.10 se definen las características agronómicas y singularidades propias de esta red y en el Anexo G se encuentran sus datos de topología y los resultados de la implementación del algoritmo híbrido.

**Tabla 6.10. Datos agronómicos e hidráulicos Red Navarra**

<b>Características de la red</b>	
Número de hidrantes	207.00
Número de líneas	279.00
Superficie de riego [ha]	1 160.00
Dotación instalada [m <sup>3</sup> /s]	3.46
Cota embalse superficie libre [mca]	489.00
Presiones de consigna [mca]	34.91-97
Caudal ficticio continuo [L/s y ha]	0.59
Jornada Efectiva de Riego [h]	16.32



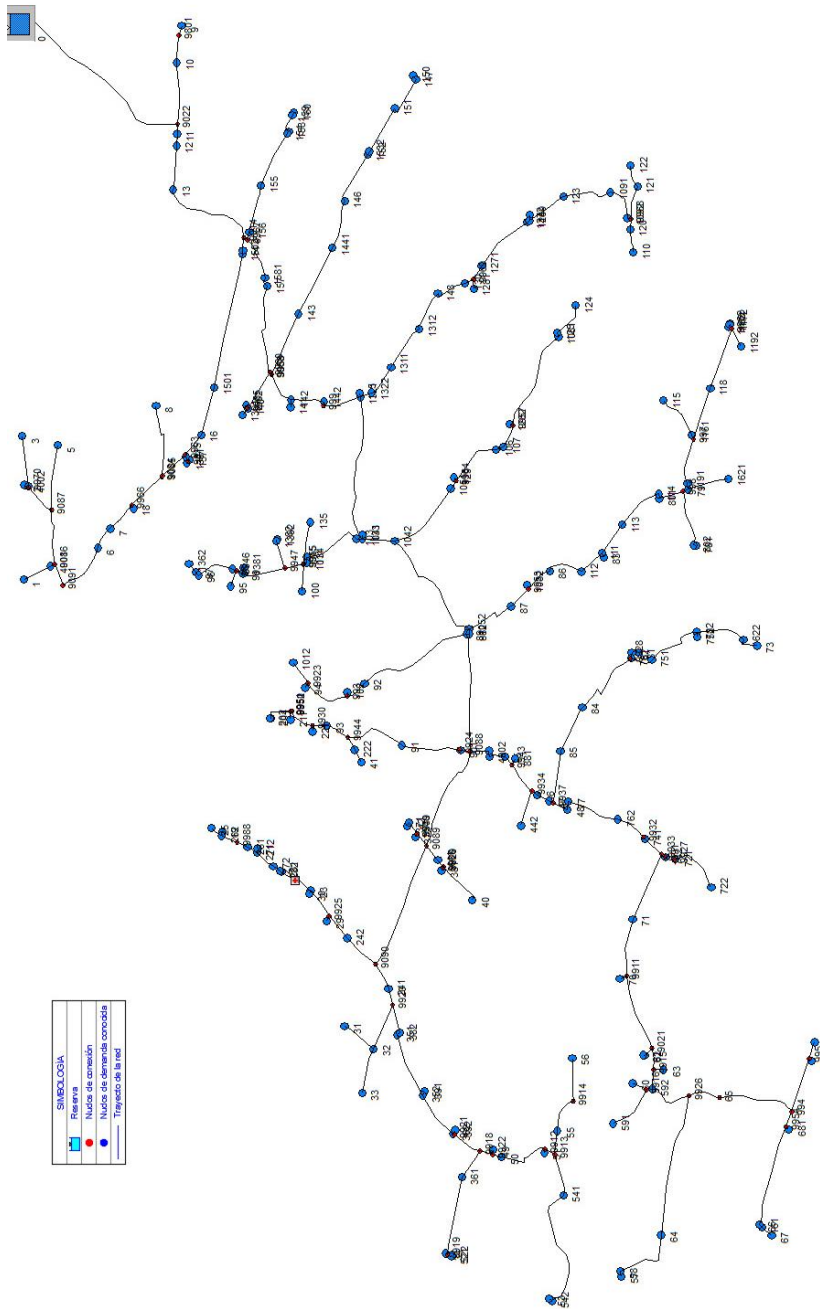


Figura 6.9. Topología Red Navarra

### **6.3.8. Red Callén Superior**

Este sistema de riego situado en la provincia de Huesca (España) se abastece del Canal del Flumen, y su cabecera de red se encuentra a una altura promedio de 455 msnm. La operación de la red se realizará mediante dos turnos. Se detalla en la Figura 6.10 su distribución topológica y en la Tabla 6.11 sus características agronómicas y datos particulares para el diseño. En el Anexo H se documentan los datos de topología de esta la red y los resultados de la implementación del algoritmo híbrido.

**Tabla 6.11. Datos agronómicos e hidráulicos Red Callén Superior**

<b>Características de la red</b>	
Número de hidrantes	33.00
Número de líneas	59.00
Superficie de riego [ha]	434.15
Dotación instalada [m <sup>3</sup> /s]	1.07
Cota embalse superficie libre [mca]	455.00
Presiones de consigna [mca]	40-69
Caudal ficticio continuo [L/s y ha]	0.80
Jornada Efectiva de Riego [h]	19.46

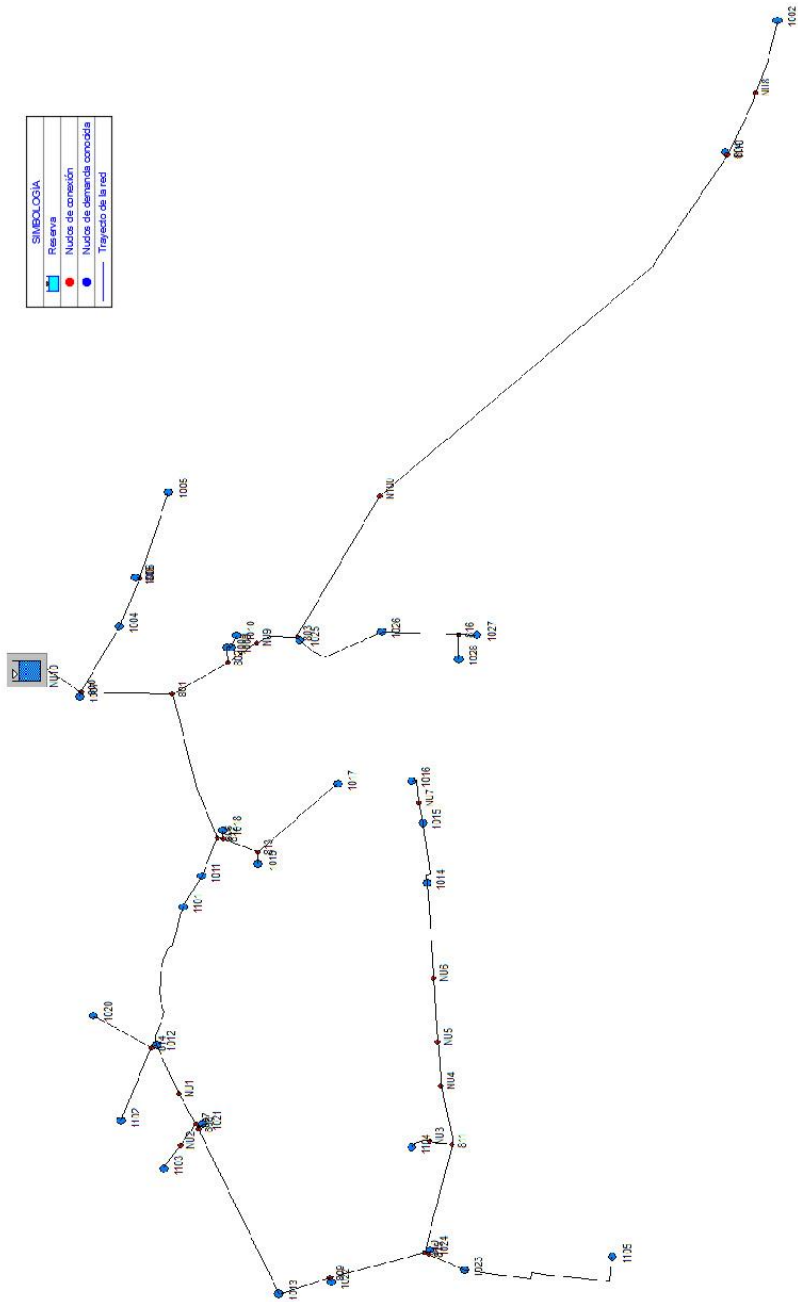


Figura 6.10. Topología Red Callén Superior

### **6.3.9. Red San Rafael**

El sistema de riego “San Rafael de Chuquipogyo”, está ubicado en la provincia de Chimborazo entre la cabecera parroquial San Andrés y la ciudad de Riobamba. Las vertientes de aporte son: Quillumachay Grande y Quillumachay Chico. La distribución de hidrantes y disposición de las líneas de la red se observan en la Figura 6.11 al igual en la Tabla 6.12 las características de la red y en el Anexo I se aportan los datos topológicos de la red y los resultados de la implementación del algoritmo híbrido.

**Tabla 6.12. Datos agronómicos e hidráulicos Red San Rafael**

<b>Características de la red</b>	
Número de hidrantes	48.00
Número de líneas	137.00
Superficie de riego [ha]	84.42
Dotación instalada [m <sup>3</sup> /s]	0.10
Cota embalse superficie libre [mca]	3 093.00
Presiones de consigna [mca]	40.00
Caudal ficticio continuo [L/s y ha]	0.30
Jornada Efectiva de Riego [h]	17.49

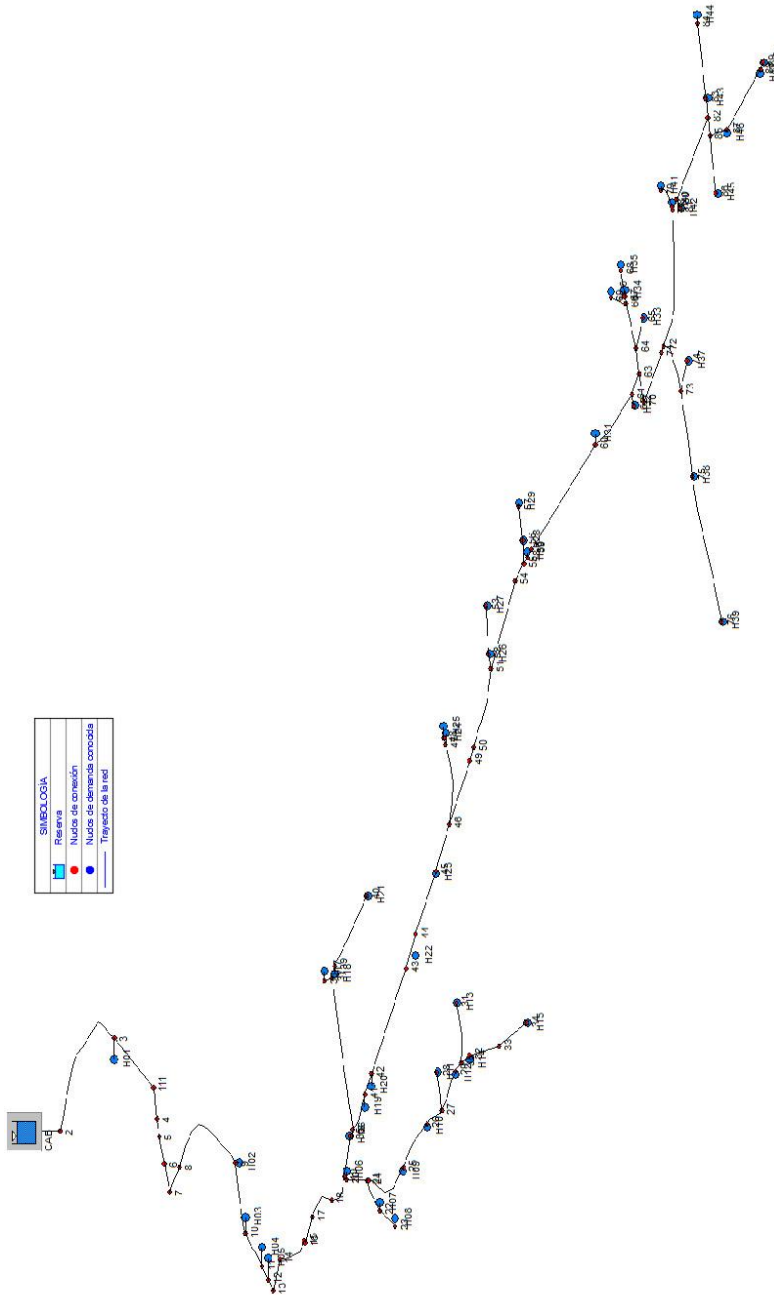


Figura 6.11. Topología Red San Rafael

## **6.4. Criterios de diseño**

Las redes se dimensionaron bajo idénticos criterios de diseño (ver Tabla 6.13) y una base de datos de tubería común con el objeto de facilitar la comparación de los resultados.

**Tabla 6.13. Datos y criterios para diseño de las redes**

Velocidad mínima admisible [m/s]	0.5
Velocidad máxima admisible [m/s]	3
Viscosidad dinámica [kg/m.s]	0.001
Densidad del flujo [kg/m <sup>3</sup> ]	1.00E+03
Rugosidad absoluta tubería [mm]	1.50E-05
Periodo de amortización [años]	25
Tasa de interés [%]	7

La gama de tuberías que se emplea en el presente trabajo es la que se observa en la Tabla 6.14, en donde se detallan los precios de tuberías que han sido recopiladas de catálogos comerciales. El Algoritmo Híbrido AG-PNL en su actual implementación considera un solo timbraje de un material tipo en toda la red. Por ello, se adoptó un timbraje lo suficientemente alto para soportar los máximos valores de presión estática encontradas en las redes de riego estudiadas. El material seleccionado pertenece a tubería de policloruro de vinilo PVC PN 25, cuya gama de diámetros incluye todo el rango que aparece en los distintos diseños. Los diámetros nominales e interiores son los que corresponden a tubería para presión con Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1373, (equivalente a la UNE-EN 1452). Los precios han sido asignados de forma realista de acuerdo a las ofertas comerciales e incluyen sólo los costos de adquisición. Quedan fuera de los objetivos de la tesis otras consideraciones.

En la Figura 6.12 se representa la variación de los precios de la tubería en función de su diámetro discreto. Se realizó el ajuste potencial de la función de costo por el método de los mínimos cuadrados con los diámetros y precios en dólares. Este ajuste se realiza para establecer una función objetivo continua y derivable para aplicar la Programación No Lineal y el Gradiente Reducido Generalizado (GRG).

La relación potencial es del tipo  $C = A \cdot D^b$ , que será:

$$C = 744.93 \cdot D^{1.98}$$

**Ecuación 6.1**

**Tabla 6.14. Gama de tuberías empleada en diseño de redes de riego**

DN [mm]	Dint [mm]	C [USD/m]
20	17.00	0.42
25	22.00	0.56
32	29.00	0.70
40	37.00	1.35
50	46.20	1.98
63	58.20	3.00
75	68.20	4.48
90	83.00	5.67
110	101.60	8.37
125	117.20	12.15
140	131.40	15.83
160	147.60	19.00
200	184.60	27.67
250	230.80	47.04
315	290.80	77.29
355	327.60	100.46
400	369.20	124.00
450	407.00	157.82
500	463.80	193.71
630	570.00	310.17
710	630.00	390.61
800	720.00	490.86
900	810.00	620.00
1000	900.00	750.60
1200	1080.00	1083.00

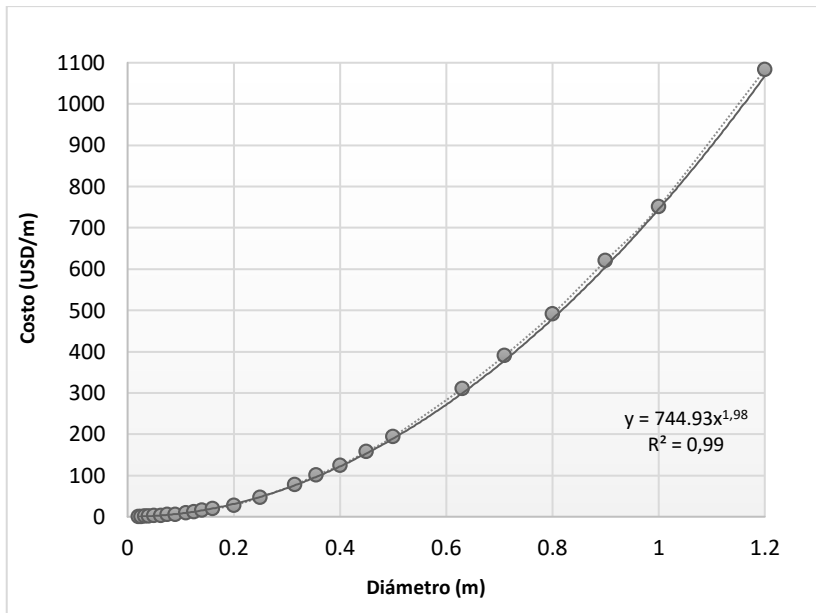


Figura 6.12. Variación real de los costos de tuberías empleadas

## 6.5. Ajuste de parámetros del AG

Los AG pueden facilitar varias soluciones factibles para el diseño de una red en sucesivas ejecuciones y en virtud de la especificación de los parámetros internos de la optimización. Conviene analizar la respuesta de los resultados de cada red diseñada, respecto a los valores de los operadores genéticos de cruce y mutación para encontrar la combinación más favorable y evaluar la sensibilidad de los resultados a los mismos. Para el ajuste se varía el tamaño de población (individuos), las probabilidades de cruce  $P_c$  y de mutación  $P_m$ , se comparan los tiempos de ejecución del algoritmo y el costo total del diseño resultante de la red en diámetros continuos de tubería para cada combinación.

Para este estudio se adoptan como tamaños de la población, valores comprendidos entre 50, 100 y 200 individuos para el conjunto de redes seleccionadas. Además, se fijaron como valores de referencia para el operador de cruzamiento una probabilidad de cruce ( $P_c$ ) de 0.5 (Mora, 2012). Por otro lado, Mora-Melia et al. (2013) proponen determinar la probabilidad de mutación ( $P_m$ ) en función de la cantidad de variables de decisión del problema. Estos autores



proponen tomar la inversa, es decir,  $1/N_h$  y definen el espacio de las soluciones factibles para reducir el tiempo de búsqueda. Valores cercanos a 1 indican que el proceso utiliza un espacio grande para generar la solución óptima, valores cerca de 0.01 limitan la búsqueda.

El número de hidrantes es diferente en cada una de las redes de estudio y se utilizará este criterio como valor de referencia. Así, para ajustar el AG se probaron valores de población de 50, 100 y 200 individuos; probabilidades de cruce de 0.1 y 0.5, y valores de  $P_m$  entre  $1/N_{VD}$  y 0.9. Los resultados del costo de los diseños obtenidos por el Algoritmo Híbrido AG-PNL de cada uno de los Casos de Estudio se muestran en la Tabla 6.15, en función de dos conjuntos de parámetros de configuración del AG de acuerdo a lo expuesto en el párrafo anterior.

En el primer conjunto de parámetros, la configuración de los “Parámetros Uniformes”, la probabilidad de cruce ( $P_c$ ), probabilidad de mutación ( $P_m$ ) y tamaño de población es asignada inicialmente por defecto y de manera uniforme para todos los casos, con valores 0.1, 0.9 y 200 respectivamente. El segundo conjunto denotado como “Parámetros Ajustados” corresponde a una combinación de parámetros ajustados para que, en cada caso, se conduzca al mínimo costo. Con los “Parámetros Ajustados” los tiempos de cálculo se reducen, encontrándose ambas configuraciones en rangos extremos de  $P_m$ . La Tabla 6.15 incluye el tamaño de población seleccionado, el tiempo de ejecución del algoritmo, el número de generaciones, el costo total del diseño de la red directamente obtenido por el AG-PNL con diámetros continuos de tubería y el costo total del diseño una vez normalizados los diámetros según el procedimiento que se describirá en el apartado 5.5. Las características del ordenador empleado son: Core i7, 3.40 GHz, memoria RAM 16.0 GB.

Se observa en la Tabla 6.15 el ajuste para todos los casos de estudio y la diferencia de costos de diseño. Se nota que seis de las nueve redes tienen como resultado final de diseño un valor más elevado en el caso del uso de  $P_c$  y  $P_m$  según los valores uniformes, que representa un 2.50 % en promedio. En el caso de emplear “Parámetros Ajustados” en cuanto a las  $P_m$  y  $P_c$ , el costo disminuye en tres de las redes seleccionadas en un 2 %. Se advierte que las diferencias en el costo de los diseños con diámetros normalizados para los casos de estudio, usando valores de operadores de cruce y mutación iniciales uniformes, o parámetros ajustados para cada caso, que suponen incluso valores extremos, es reducida. Sin embargo, el

tiempo de cálculo disminuye notablemente cuando los parámetros son ajustados, debido al tamaño de población asociado. Un caso particular resultó la red de \*Molinar I, en donde el proceso de convergencia tuvo dificultad en el tiempo de convergencia, cuya causa no se ha indentificado, si bien se presume que puede deberse a estar en presencia de una red con gran diversidad altimétrica y de gran extensión.

**Tabla 6.15. Resultados de análisis de ajuste de  $P_c$  y  $P_m$  del AG**

		$P_c$ (%)	$P_m$ (%)	Tamaño población	Tiempo ejec. [h]	Núm. ensayos	Costo diámetros continuos [USD], M1	Costo diámetros normalizados [USD], M2
<b>Callén-Inf</b>	Parámetros uniformes	0.1	0.90	200	8.45	947	1 717 194.71	1 876 238.34
	Parámetros ajustados	0.5	0.02	50	3.17	1001	1 461 169.30	1 747 343.00
<b>Tuncarta</b>	Parámetros uniformes	0.1	0.90	200	14.10	1463	21 114.63	27 387.44
	Parámetros ajustados	0.5	0.01	50	5.00	2079	20 614.93	27 489.99
<b>Cariyacu</b>	Parámetros uniformes	0.1	0.90	200	15.24	9456	9305.47	9794.39
	Parámetros ajustados	0.5	0.02	50	7.00	3337	8856.17	9701.26
<b>Valcuerna</b>	Parámetros uniformes	0.1	0.90	200	9.55	1970	5 718 114.75	7 111 668.49
	Parámetros ajustados	0.5	0.02	50	4.42	2735	5 416 379.63	6 981 602.00
<b>Cenicero</b>	Parámetros uniformes	0.1	0.90	200	24.34	9624	252 051.74	317 396.95
	Parámetros ajustados	0.5	0.03	50	16.02	5096	228 361.68	316 044.80
<b>*Molinar I</b>	Parámetros uniformes	0.1	0.90	200	18.43	86	4 513 577.35	5 455 811.02
	Parámetros ajustados	0.5	0.01	100	0.44	2	4 467 998.85	5 545 100.00
<b>Navarra</b>	Parámetros uniformes	0.1	0.90	200	11.29	138	4 578 108.84	5 797 372.42
	Parámetros ajustados	0.5	0.03	100	11.24	193	4 408 279.81	5 570 301.00
<b>Callen Sup</b>	Parámetros uniformes	0.6	0.01	100	31.04	14260	955 994.90	1 211 229.86
	Parámetros ajustados	0.5	0.03	50	4.30	1932	946 241.87	1 199 871.00
<b>San Rafael</b>	Parámetros uniformes	0.1	0.90	200	11.20	1154	98 755.75	132 257.19
	Parámetros ajustados	0.5	0.02	50	0.45	104	88 778.01	137 722.00

\* En la Red de Molinar I, no se encontró buena convergencia del AG-PNL

En función de lo anterior, para los análisis y comparativas subsiguientes se adoptarán los resultados encontrados con parámetros uniformes, no ajustados “ad hoc” para cada caso, dado que sería la condición más desfavorable. Además, tomando en cuenta que para el caso que se trata, es el de comparar los costos y valores de flexibilidad cuando se cambia el turno en los hidrantes de las redes estudiadas, esta condición asegura resultados confiables para el análisis que se realiza. Los resultados que se logran, demuestran la robustez y consistencia del Algoritmo Híbrido AG-PNL para encontrar soluciones viables al ser aplicado a casos de estudio de características diversificadas incluso con parámetros  $P_c$  y  $P_m$  muy diversos. A modo de ejemplo, en la Figura 6.13 es posible observar la evolución del AG para la red de Tuncarta. Para este caso (50 individuos, 178 generaciones) se muestra en el eje de las abscisas el número de generaciones y en el eje de las ordenadas el costo.

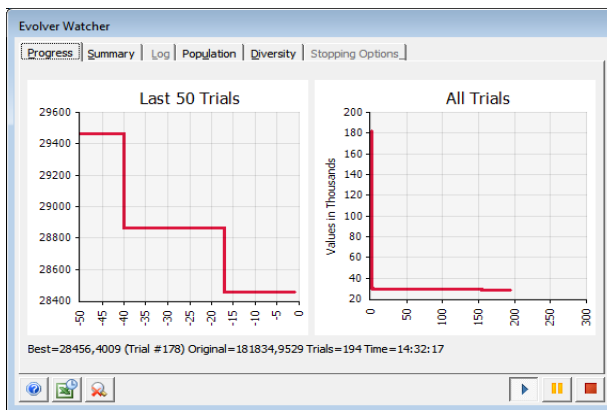


Figura 6.13. Red Tuncarta, evolución del AG

Por otro lado, el ajuste de los operadores evolutivos del Algoritmo Híbrido AG-PNL concluye que dicho algoritmo se muestra robusto frente a la elección de dichos parámetros, y que es el tiempo de cálculo la variable más afectada por dichos parámetros.

## **6.6. Índice de Flexibilidad**

En la construcción del Algoritmo Híbrido AG-PNL para el diseño de una RCRP se aplican dos criterios: (i) cumplir con la presión establecida, y (ii) minimizar los costos de la red con variables de decisión tanto de diámetro de tuberías como la asignación de turnos. En la formulación de la función objetivo no se introducen criterios de fiabilidad o flexibilidad. Sin embargo, en todas las redes a turnos, una vez dimensionadas, es conveniente evaluar su capacidad para continuar dando adecuado servicio en caso de modificación de los turnos, característica que constituirá su flexibilidad respecto a los cambios de turno. Estas modificaciones se producen con frecuencia en las redes a lo largo de su explotación, y conducen a adoptar diferentes combinaciones de hidrantes asignados a un cierto turno respecto a la asignación inicial asumida en el diseño, respetando al menos el caudal total correspondiente al turno.

## **6.7. Indicador de Flexibilidad en Presiones en RCRP**

En Lamaddalena y Sagardoy (2000) para RCRP a la demanda, se encuentra un antecedente que define indicadores, los cuales valoran si el nivel de presión aportado a los hidrantes es suficiente según el número de hidrantes abiertos con caudales totales por debajo o por encima de las condiciones de diseño. Es posible extender estos conceptos a RCRP diseñadas con operación por turnos con el fin de evaluar la flexibilidad de las mismas para encajar cambios de turnos.

El cambio de turno es un suceso impredecible con un gran espacio de posibilidades. Por ello, la confección de indicadores debe explorar escenarios que contemplen cualquier reorganización de turnos con la condición de que se mantenga el caudal total demandado en el turno, que se corresponde con un determinado porcentaje global de hidrantes abiertos. Siempre que la red disponga de un número suficiente de hidrantes con dotaciones semejantes; un cambio en la configuración de turnos puede asimilarse a una apertura aleatoria de un porcentaje de hidrantes igual al que corresponde a cada turno inicial.

Para cada asignación de turnos (aleatoria o determinista), la condición de suficiencia de presión en cada hidrante ( $n$ ) durante un turno ( $t$ ) significa que se satisface la siguiente relación (Lamaddalena y Sagardoy, 2000):

$$H_{n,t} \geq H_{cons_n} \quad \text{Ecuación 6.2}$$

Donde  $H_{n,t}$  representa la presión en el hidrante  $n$  dentro del turno  $t$  al que pertenece, expresada en metros, y  $H_{cons_n}$  es la altura de presión mínima requerida o de consigna del hidrante  $n$  en metros.

La variable de Cumplimiento de Presión ( $CP_{n,t}$ ) en el hidrante  $n$  durante el turno  $t$  se define como una valor binario entre 0 y 1. El valor 1 indica que se verifica la condición de satisfacción de presión y el valor 0 señala que no llega presión suficiente a la toma. Si se genera un número de escenarios distintos  $N_E$  que se asocian al turno  $t$  en que el hidrante  $n$  participa, y se evalúa  $CP_{n,t}^i$  para cada escenario  $i$  en cada hidrante, el parámetro de Fiabilidad en Presiones en cada hidrante ( $FP_n$ ) se define como sigue:

$$FP_n = \frac{1}{N_E} \sum_{i=1}^{N_E} CP_{n,t}^i \quad \text{Ecuación 6.3}$$

$FP_n$  representa la ratio del número de escenarios o turnos en donde la presión fue suficiente respecto al total de posibles turnos ensayados en que el hidrante  $n$  participa. Este parámetro calculado para cada hidrante identifica la vulnerabilidad del hidrante ante cambios en la organización de los turnos, y permite discriminar si existen fallos esporádicos o frecuentes en solo unos hidrantes determinados o en todo el conjunto de ellos.

Si en la red existen  $N_h$  hidrantes en total, el Indicador de Flexibilidad del sistema frente a Cambio de Turnos,  $IFCT$ , se define como el promedio de la fiabilidad en las presiones de todos los hidrantes.

$$IFCT = \frac{1}{N_h} \sum_{n=1}^{N_h} FP_n \quad \text{Ecuación 6.4}$$

El  $IFCT$  es un indicador sintético que amortigua las posibles insuficiencias de presión ante cambios de turnos que estén localizados en pocos hidrantes. Si su valor es alto, es decir próximo a 1, se deduce que todos los hidrantes del sistema mantienen presión suficiente ante cualquier cambio de turno, indicando alta flexibilidad de la RCRP. Si el índice es bajo (valores cerca de 0), la incapacidad de suministrar presión suficiente fuera del turno de diseño es frecuente y afecta a muchos hidrantes de la RCRP (baja flexibilidad).

Una connotación importante es considerar que el indicador *IFCT* puede establecerse con distintas variantes en función de la lo estricto que sea el filtro de existencia de presión suficiente en relación al valor de presión mínima requerido. Es posible establecer una modulación que, en lugar de ser binaria, tenga una variación continua en función de la magnitud del déficit de la presión obtenida respecto al valor de presión mínima requerida. Al haber formulado en esta investigación, este parámetro de forma restrictiva se da por válida solo la condición en que la presión en cada hidrante sea superior a la mínima necesaria. Por tanto, el criterio adoptado en este análisis, es el más sencillo de implementar, y el más exigente. El índice de flexibilidad que se ha definido para redes a turnos puede ser también aplicado en redes a la demanda operando a turnos. Mientras no se supere el caudal de diseño y si en todos los escenarios se obtiene suficiente presión en los hidrantes de la red, el *IFCT* será próximo a 1.

Para efectuar el cómputo de este índice se usa uno de los módulos de la aplicación GESTAR 2016, que se explota para el cálculo del Índice de Flexibilidad ante cambios de Turnos *IFCT*. Este módulo de la aplicación Gestar genera escenarios aleatorios de demanda de apertura de hidrantes de acuerdo al porcentaje prefijado ( $N_T$ ), muestra el número de escenarios en los que los hidrantes estuvieron abiertos ( $N_E$ ) y calcula en cada hidrante un índice que corresponde a la Fiabilidad de Presiones ( $FP_n$ ). Este parámetro calculado para cada hidrante identifica la vulnerabilidad del hidrante ante cambios en la organización de los turnos, y permite discriminar si existen fallos esporádicos o frecuentes, en solo unos hidrantes determinados, o en todo el conjunto de ellos.

## **6.8. Escenarios Propuestos**

La generación de escenarios de apertura aleatoria de hidrantes con un número de hidrantes abiertos que se corresponde con el porcentaje de hidrantes existentes en cada turno, equivale a un cambio de asignación de los turnos aleatorios. El cómputo del promedio de los valores de  $FP_n$ , así obtenidos, genera un *IFCT*. Para ilustrar este procedimiento se presenta el caso de la red de Cariyacu y en la Tabla 6.16 se observa el número de hidrantes o tomas de la red, el ID de los hidrantes, el número de escenarios aleatorios generados y el valor de cumplimiento de la Fiabilidad de la presión por hidrante en cada turno  $FP_n$ .

**Tabla 6.16. Resultados Fiabilidad de presión por hidrante red  
Cariyacu**

Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>	Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>	Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>
1	CC1	436	1.0000	24	CC32	472	0.8856	47	CC21	469	0.6780
2	CC8	429	1.0000	25	CC39	470	0.8809	48	CC60	309	0.6731
3	CC9	460	1.0000	26	CC33	481	0.8669	49	CC56	463	0.6588
4	CC10	511	1.0000	27	CC34	497	0.8592	50	CC13	499	0.6553
5	CC11	464	1.0000	28	CC50	465	0.8559	51	CC57	483	0.6460
6	CC66	478	1.0000	29	CC28	456	0.8333	52	CC22	456	0.6338
7	CC67	468	1.0000	30	CC51	309	0.8188	53	CC12	459	0.6253
8	CC26	501	0.9920	31	CC27	477	0.8176	54	CC7	435	0.6161
9	CC25	484	0.9897	32	CC45	462	0.8117	55	CC6	405	0.5877
10	CC64	455	0.9692	33	CC46	487	0.7988	56	CC30	495	0.5455
11	CC53	464	0.9655	34	CC59	405	0.7877	57	CC48	498	0.5361
12	CC52	430	0.9581	35	CC54	504	0.7718	58	CC37	501	0.5210
13	CC65	449	0.9555	36	CC58	428	0.7594	59	CC2	501	0.5150
14	CC16	502	0.9482	37	CC55	493	0.7586	60	CC29	444	0.5045
15	CC17	474	0.9430	38	CC20	476	0.7416	61	CC3	466	0.4785
16	CC15	473	0.9260	39	CC47	479	0.7265	62	CC38	455	0.4725
17	CC14	486	0.9198	40	CC44	419	0.7136	63	CC4	429	0.4499
18	CC35	477	0.9120	41	CC43	459	0.7124	64	CC49	425	0.4494
19	CC18	478	0.9100	42	CC23	469	0.7122	65	CC5	444	0.4482
20	CC36	477	0.9099	43	CC42	436	0.7064	66	CC62	458	0.4454
21	CC19	479	0.9019	44	CC41	461	0.6963	67	CC63	472	0.4364
22	CC40	460	0.8891	45	CC24	472	0.6907				
23	CC31	481	0.8857	46	CC61	330	0.6818				

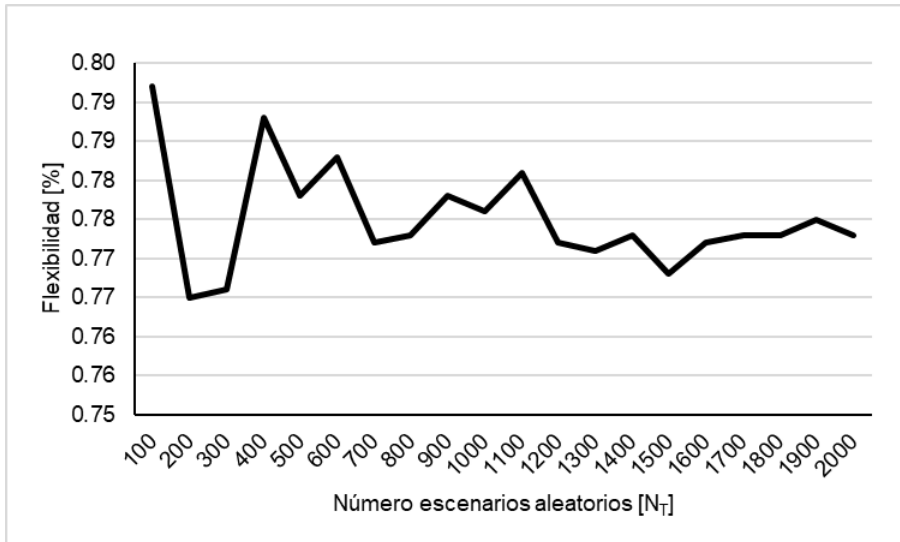
Σ	51.4395
<b>IFCT</b>	<b>0.77</b>

**6.8.1. Número de escenarios aleatorios ( $N_T$ )**

Dado que el cómputo *IFCT* del podría estar sesgado en función del número de escenarios aleatorios  $N_T$  empleados, se investigó esta dependencia, y como era de esperar, el *IFCT* se mostró dependiente del Número de escenarios aleatorios ( $N_T$ ). En consecuencia, se realizó un análisis de repetibilidad y sensibilidad para establecer el umbral a partir del cual los valores de *IFCT* son independientes de  $N_T$ . Con el fin de deducir los valores aconsejables que permitan contar con el número adecuado de escenarios que garanticen resultados significativos se procedió en cada uno de los casos de estudio a incrementar el valor de  $N_T$  hasta que el valor *IFCT* se estabiliza en sucesivas repeticiones.

Se trató de generar múltiples escenarios aleatorios que equivalían al cambio de asignación de turnos en forma aleatoria aumentando gradualmente  $N_T$ . Por ejemplo, se observa en la Figura 6.14 la evolución del valor del *IFCT* en función

del número de escenarios aleatorios ( $N_T$ ) para la Red de Cariyacu diseñada con AG-PNL. En donde el valor resultante del *IFCT* promedio del sistema de Cariyacu es de 0.77, estabilizándose en forma aproximada a partir 1200 escenarios.



**Figura 6.14. Relación Número de escenarios - Flexibilidad**

Se efectúa un análisis similar con los ocho casos de estudio restantes que se documentan en el apartado de Anexos en cada caso de estudio. Se observó que el valor de *IFCT* se estabiliza en forma general cuando el valor del número de escenarios de cada red resulta de multiplicar el número de hidrantes que dispone la red por 20. Resultando, por tanto:

$$N_T = 20 \cdot N_h \quad \text{Ecuación 6.5}$$

Adoptando este principio, el número de escenarios resultante para la Red de Cariyacu con 67 hidrantes es de 1340 que es un valor cercano al de 1200 antes citado. Este criterio se ha adoptado para generar el número de escenarios aleatorios  $N_T$  que permite computar el *IFCT* en los sistemas de riego seleccionados como Casos de Estudio.

Para analizar la asimetría de los valores del parámetro Flexibilidad en Presiones de cada hidrante ( $FP_n$ ) de cada red de estudio, se genera la Figura 6.15 en donde se muestra su variación por cuartiles. Si el valor de  $FP_n$  es bajo (valores cerca de 0), existirá incapacidad de suministrar presión suficiente fuera del turno en los



hidrantes de la red y si en todos los escenarios se obtiene suficiente presión en los hidrantes de la red, el valor de  $FP_n$  será próximo a 1. Partiendo de este criterio y a través de este diagrama se deduce que el 50% de los hidrantes en las redes estudiadas por lo general tienen una  $FP_n$  mayor de 0.7. Valcuerna contiene el 50% de hidrantes con  $FP_n$  mayor a 0.9, en la red de Navarra se observa que el 50% de hidrantes llegan a 0.9 del valor del  $FP_n$ , Tuncarta incluye el 50% de hidrantes con  $FP_n$  mayor de 0.8. El 75% de los hidrantes de la red de Tuncarta obtienen un  $FP_n$  menor de 0.99, mientras que en la red de Navarra el 75% de hidrantes resultan con un  $FP_n$  menor de 0.9. En el caso de la red de San Rafael el 75% de los hidrantes alcanzan un  $FP_n$  de 0.9.

Una red puede resultar con un  $IFCT$  alto, pero sin embargo tener algunas zonas con valores muy bajos de  $FP_n$  en sus hidrantes.

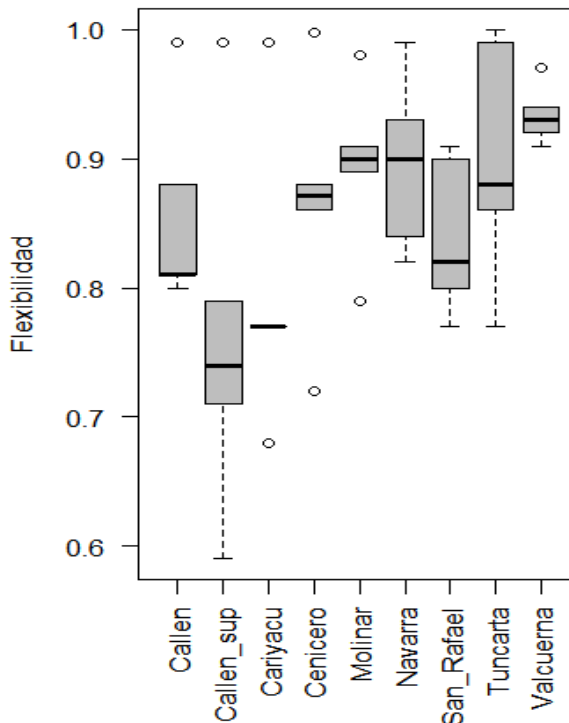


Figura 6.15. Asimetría de valores del parámetro Flexibilidad en Presiones de cada hidrante ( $FP_n$ ) y costo de redes de estudio

## **6.9. Métodos alternativos de comparación**

Para evaluar la efectividad del Algoritmo Híbrido (AG-PNL), en términos del costo de los diseños producidos y de Flexibilidad, se comparan los costos totales obtenidos y el *IFCT* resultante en el proceso de diseño óptimo mediante AG-PNL de los casos de estudio seleccionados, con otros tres métodos de diseño alternativos.

Los tres métodos alternativos utilizan el Método de la Serie Económica-Mejorado, MSE-M (González y Aliod, 2003), que ha sido descrito en el apartado 4.3.4 de esta tesis. El método citado (MSE-M) permite diseñar redes con tuberías de diferentes materiales y timbrajes y normaliza los diámetros con criterios óptimos. El algoritmo ya ha sido usado en la literatura para la comparación de los costos de diseños a turnos y a la demanda (Alduán y Monserrat, 2009; Monserrat et al., 2012). Otra razón para la selección del software GESTAR 2016 es que obtiene resultados optimizados de forma muy rápida y robusta (García, S., Ruiz, R., Aliod, R., Paño, J., & Seral, P., 2011).

Este método fue ampliado para aplicarlo a RCRP a turnos (García et al., 2011) como se ha descrito con detalle en el apartado 4.3.4. En síntesis, dado que en el dimensionado de la Senda Crítica para cada turno se determinan las tuberías que son comunes a más de un turno, algunas conducciones aguas arriba quedan fijadas con un valor de diámetro de tubería mayor requerido en todos los turnos. Resultando entonces que esta conducción estará sobredimensionada para los demás turnos, se procede a redimensionar las conducciones del resto de turnos aguas abajo de dicha línea de cabecera con este diámetro forzado. De esta manera será factible reducir los diámetros de los tramos aguas abajo afectados por otros turnos. El procedimiento se itera hasta que todas las líneas quedan dimensionadas. Este algoritmo aplicable a RCRP a turnos está presente en el paquete de software GESTAR 2016, del que también se ha usado otro de sus módulos para facilitar el cómputo de los índices de  $FP_n$ , en los hidrantes necesarios para el cálculo del *IFCT*.

Puesto que el método híbrido AG-PNL obtiene diámetros continuos que es preciso normalizar al final del proceso, se incorporan en este trabajo ambos resultados. La nomenclatura y descripción de las alternativas de diseño comparadas, se enuncian a continuación:

**Método 1** (AG-PNL, diámetros continuos): Asignación de turnos óptimos

mediante AG y diseño de la red con PNL, sin ajuste de diámetros. Este método se corresponde con el algoritmo híbrido descrito en los capítulos 4 y 5.

**Método 2** (AG-PNL, diámetros normalizados): Método 1 más normalización de los diámetros, mediante asignación a diámetros más próximos y revisión para la verificación de presiones mínimas y velocidades máximas.

Es necesario señalar que el diseño con el Método 2 se adoptará como referencia para comparar los resultados de diseño con los métodos 3, 4, y 5 debido a que su diseño mediante AG-PNL se ajusta a diámetros comerciales.

**Método 3** (MSE-M): Dimensionado óptimo a turnos mediante MSE-M integrado en la herramienta GESTAR 2016 con la asignación de turnos obtenida en el Método 1.

Se desarrolla este método con el objeto de investigar la influencia de la asignación de turnos en los costos, la flexibilidad del diseño de las redes de riego, e identificar la influencia de los procesos de normalización de diámetros. Además, es posible determinar la efectividad del algoritmo de optimización MSE-M una vez se le ha proporcionando la asignación de turnos del AG-PNL.

En este Método 3 se ejecutó el algoritmo de optimización de GESTAR 2016 usando la asignación de turnos que se obtuvo mediante el algoritmo de AG-PNL. El algoritmo MSE-M de optimización de GESTAR 2016 explota el método discontinuo de Labye para proceder a la normalización de los diámetros de cada serie de tuberías dimensionadas. Este Método 3, al suministrársele como input los turnos óptimos encontrados con el AG, puede considerarse una optimización pseudo-híbrida.

Con el Método 3, se obtienen resultados que son bastante próximos a los obtenidos con el algoritmo de AG-PNL, con la ventaja de que suministra diámetros ya normalizados.

**Método 4** (MSE-M-tur-heur): Dimensionado óptimo a turnos, mediante el MSE-M integrado en la herramienta GESTAR 2016, con asignación de turnos basada en criterios heurísticos (sin optimización) que incluyen un cierto grado de arbitrariedad.

Se incluye este Método para conocer el peso de asignar los turnos mediante criterios heurísticos en los resultados de costo de diseño de las redes seleccionadas, y en el *IFCT*. En el proceso de asignación aproximada de turnos a los hidrantes en base a la experiencia ingenieril se han utilizado criterios de equilibrio de caudales en cada turno en algunos casos, igualdad de tiempo de cada

turno, alternancia cíclica de los turnos a lo largo de los diversos ramales y asignación sistemática en las líneas de la red.

Se realizaron varias pruebas con asignaciones de turnos en base a la experiencia previa con diversos tanteos, (que simulan los casos de operación reales de redes de riego en donde es posible se den estos casos). Así, por ejemplo, para los Casos de Estudio que corresponden a las redes de Callén Inferior, Valcuerna, y Cenicero en que se muestran distintos resultados en las Tabla 6.17, Tabla 6.18 y Tabla 6.19 en donde se detectan diferencias en los caudales de cabecera debidos a la diferente asignación de turnos por criterios tentativos.

Realizada la optimización de diseño con asignaciones de turnos en forma heurística, se obtienen: los resultados del costo total de diseño, el *IFCT*, los porcentajes de incremento de *IFCT* y de incremento de costo, y los valores de caudales de cabecera por turnos. Para el análisis posterior, se seleccionó la opción de turnos marcada como “caso 0” siguiendo el pautado de la solución encontrada con el costo óptimo.

**Tabla 6.17. Resultados de Costo y Flexibilidad con asignaciones heurísticas de turnos, Red Callén Inferior**

TURNOS ALEATORIOS	COSTO [USD]	FLEXIBILIDAD	Inc. Costo	%Inc. Costo	Inc. Flexib	%Inc. Flexib	Q [m <sup>3</sup> /s] Turno 1	Q [m <sup>3</sup> /s] Turno 2
0	1 925 877.63	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.66
1	1 921 910.10	0.78	-3967.53	-0.21	-0.02	-2.42	0.75	0.70
2	2 027 527.55	0.87	101 649.92	5.28	0.07	8.99	0.72	0.73
3	2 028 157.04	0.86	102 279.41	5.31	0.05	6.76	0.86	0.59
4	2 118 988.82	0.89	193 111.19	10.03	0.09	10.66	0.88	0.58

**Tabla 6.18. Resultados de Costo y Flexibilidad con asignaciones heurísticas de turnos, Red Valcuerna**

TURNOS ALEATORIOS	COSTO [USD]	FLEXIBILIDAD	Inc. Costo	%Inc. Costo	Inc. Flexib	%Inc. Flexib	Q [m <sup>3</sup> /s] Turno 1	Q [m <sup>3</sup> /s] Turno 2
0	8 370 887.00	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	1.01	0.55
1	7 340 798.57	0.97	-1030088.43	-12.31	0.05	5.06	0.71	0.86
2	8 355 837.69	0.94	-15049.31	-0.18	0.02	2.40	0.57	1.00
3	7 955 127.81	0.93	-415759.19	-4.97	0.00	0.51	0.91	0.66
4	7 424 192.48	0.96	-946694.52	-11.31	0.03	3.79	0.68	0.89

**Tabla 6.19. Resultados de Costo y Flexibilidad con asignaciones heurísticas de turnos, Red Cenicero**

TURNOS ALEATORIOS	COSTO [USD]	FLEXIBILIDAD	Inc. Costo	%Inc. Costo	Inc. Flexib	%Inc. Flexib	Q [m <sup>3</sup> /s] Turno 1	Q [m <sup>3</sup> /s] Turno 2	Q [m <sup>3</sup> /s] Turno 3
0	371 171.07	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.16	0.153
1	341 783.58	0.82	-29387.49	-7.92	-0.07	-7.44	0.17	0.14	0.15
2	402 626.84	0.94	31455.77	8.47	0.05	6.21	0.15	0.16	0.14
3	368 632.71	0.89	-2538.36	-0.68	0.01	0.77	0.15	0.16	0.15
4	360 967.92	0.88	-10203.15	-2.75	-0.01	-0.86	0.14	0.16	0.15

En el caso de la Red de \*Molinar I, como se menciona en el epígrafe 6.5, la convergencia del algoritmo AG-PNL no progresó a pesar de que se cambiaron los parámetros de cruce y mutación. No obstante, se indican sus resultados para incorporar este caso particular. Se observa en la Tabla 6.20 que los turnos que se obtienen son un tanto descompensados, aunque esto no tendría por qué ser necesariamente contraindicado. El problema de convergencia en este caso aislado, condujo a que no se encuentren buenas soluciones, y los costos totales de diseño con reparto de turnos heurístico se encuentran unos con valor superior y en otros podrían ser valores inferiores que el costo considerado como caso “0”.

**Tabla 6.20. Resultados de Costo y Flexibilidad con asignaciones heurísticas de turnos, Red Molinar I**

TURNOS ALEATORIOS	COSTO [USD]	FLEXIBILIDAD	Inc. Costo	%Inc. Costo	Inc. Flexib	%Inc. Flexib	Q [m <sup>3</sup> /s] Turno 1	Q [m <sup>3</sup> /s] Turno 2	Q [m <sup>3</sup> /s] Turno 3
0	5 427 787.00	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	1.06	1.13	0.793
1	5 085 186.79	0.84	-342600.21	-6.31	-0.05	-5.49	0.97	1.08	0.87
2	5 206 979.31	0.85	-220807.69	-4.07	-0.04	-4.23	0.95	1.09	0.88
3	4 854 770.69	0.83	-573016.31	-1.06	-0.05	-6.18	0.93	0.92	1.07
4	4 856 702.11	0.83	-571084.89	-1.05	-0.06	-6.25	0.93	1.00	0.99

**Método 5** Diseño de la red operando a la demanda mediante el MSE-M integrado en la herramienta GESTAR 2016 con tiempo de riego total igual a la suma de los tiempos de los turnos.

Con el objeto de que la comparación de las redes operando a la demanda y a turnos sea análoga, se adoptaron parámetros y condiciones de diseño que implican una duración de la jornada de riego semejante y un escalonamiento de garantía de suministro adecuado. De esta manera se definirá el total del número de horas de uso de la red a la demanda, considerando la suma del número de horas que la red trabaja en todos los turnos. Por ejemplo, si se tiene una red operando

con 3 turnos, con cada turno de 6 horas, el tiempo de riego total será de 18 horas y por tanto en el diseño a la demanda, la jornada de riego será de 18 horas y el rendimiento resultará de 18/24 [0.75].

Para determinar los caudales de diseño a la demanda se utiliza la formulación de Clément y se adoptará el escalonamiento de la garantía de suministro (GS), partiendo de dos premisas:

- a. Se usará un escalonamiento de GS igual para todas las redes con el fin de hacer una comparativa en similares condiciones.
- b. El escalonamiento elegido (ver Tabla 6.21) tiende a reducir los costos del sistema a la demanda y suministra el umbral inferior del costo a la demanda. Este criterio proporciona a esta investigación una solución idónea para hacer una comparativa para el peor de los casos.

**Tabla 6.21. Garantías de suministro utilizadas**

<b>Número de Hidrantes</b>	<b>GS [%]</b>
Apartir de 5 -19	99
Apartir de 20 a 49	95
Apartir de 50 en adelante	90

Es decir, los valores de GS elegidos conducen a diseños a la demanda económicos, y se otorga una condición restrictiva para la comparación con el diseño turnos.

Para la operación a la demanda se especifican: el caudal de Clément (ajustando a una distribución normal los caudales demandados en los tramos de la red), los valores de la relación entre caudal de cabecera y caudal instalado, el tiempo total de riego y el rendimiento de cada red (ver Tabla 6.22).

**Tabla 6.22. Características generales de redes de estudio**

	<b>Qcab/Qinst</b> [%]	<b>Tiempo de riego</b> [h]	<b>Rendimiento</b> [%]	<b>Caudal Demanda</b> [L/s]
Callén Inferior	63	23.52	98	919.90
Tuncarta	36	23.82	99	42.50
Cariyacu	56	24.00	100	17.10
Valcuerna	40	23.62	98	631.00
Cenicero	23	7.02	29	104.96
Molinar I	36	24.00	100	1047.60
Navarra	33	16.32	68	1152.90
Callén Superior	57	19.46	81	609.00
San Rafael	54	17.49	73	56.50

Los sistemas de riego con menor rendimiento son: Cenicero, Navarra, San Rafael, y Callén Superior. Los restantes casos cuentan con un rendimiento aproximado entre el 98 y 100 %, valores que repercutirán directamente en el tiempo de su operación.

Para ilustrar el proceso que se ejecuta en el Método 5, se toma como ejemplo la RCRP de Cariyacu y se consideran los siguientes datos de partida: tiempo de riego iguales tanto para el Turno 1 como para el Turno 2 (ver Tabla 6.23), en donde se muestra que el número de horas máximo de riego es de 12 horas en el hidrante con ID CC56. La presión de consigna en todos los hidrantes de la red es similar con un valor de 23 m.c.a. En consecuencia, la Jornada Efectiva de Riego para esta red será de 24 horas y por tanto su rendimiento igual a 100%.

**Tabla 6.23. Tiempos de riego en el Turno 1, y Turno 2**

ID Nudo	Tiempo Riego [h]	ID Nudo	Tiempo Riego [h]	ID Nudo	Tiempo Riego [h]
CC1	10.75	CC24	11.62	CC48	11.79
CC2	11.61	CC25	11.39	CC49	10.46
CC3	11.61	CC26	11.39	CC47	11.42
CC4	11.03	CC27	10.53	CC50	11.52
CC5	11.03	CC28	10.53	CC51	11.52
CC6	10.75	CC29	10.99	CC52	11.42
CC7	10.75	CC30	10.99	CC53	11.42
CC8	11.09	CC31	11.01	CC54	11.93
CC9	11.09	CC32	11.01	CC55	11.93
CC10	11.83	CC33	11.71	CC60	11.31
CC11	11.83	CC34	11.71	CC61	11.31
CC12	11.09	CC35	11.98	CC56	12.00
CC13	11.09	CC36	11.98	CC57	11.98
CC14	10.68	CC37	11.42	CC59	10.87
CC15	10.68	CC38	11.42	CC58	10.87
CC16	11.99	CC39	11.95	CC62	11.71
CC17	11.99	CC40	11.95	CC63	11.71
CC18	11.26	CC41	11.46	CC64	11.75
CC19	11.26	CC42	11.46	CC65	11.75
CC20	11.78	CC43	10.62	CC66	11.42
CC21	11.81	CC44	10.62	CC67	11.42
CC22	11.82	CC45	11.09		
CC23	11.62	CC46	11.09		



# Capítulo 7 :

# Resultados y Análisis

## 7.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la implementación del algoritmo AG-PNL, su aplicación en casos de estudio y la comparación con otros métodos alternativos de optimización, aplicando la metodología descrita en el capítulo anterior.

Puesto que el método híbrido AG-PNL obtiene diámetros continuos que es preciso normalizar al final del proceso, se incorpora en este trabajo ambos resultados. La nomenclatura y descripción de las alternativas de diseño comparadas se enuncian a continuación:

Método 1 (AG-PNL, diámetros continuos): Asignación de turnos óptimos mediante AG y diseño de la red mediante PNL, sin ajuste de diámetros.

Método 2 (AG-PNL, diámetros normalizados): Método 1 más normalización de los diámetros, mediante asignación automática a diámetros más próximos y revisión para la verificación de presiones mínimas y velocidades máximas.

Método 3 (MSE-M): Dimensionado óptimo a turnos, mediante MSE-M integrado

en la herramienta GESTAR 2016, con la asignación de turnos obtenidos en el Método 1.

Método 4 (MSE-M-tur-heur): Dimensionado óptimo a turnos, mediante el MSE-M integrado en la herramienta GESTAR 2016, con asignación de turnos basada en criterios ingenieriles o heurísticos (sin optimización).

Método 5: Diseño de la red operando a la demanda mediante MSE-M integrado en la herramienta GESTAR 2016, con tiempo de riego total igual a la suma de los tiempos de los turnos.

Como consecuencia del análisis del comportamiento de las redes tanto desde el punto de vista del costo como desde la flexibilidad, se han encontrado resultados colaterales relativos a la conveniencia del diseño de redes de riego operando a turnos o a la demanda.

## **7.2. Análisis de resultados de costos con métodos de optimización**

La aplicación de la metodología presentada en esta Tesis y descrita en capítulos anteriores condujo a soluciones de los costos de las redes de estudio que se recogen en la Tabla 7.1.

**Tabla 7.1. Costos de diseño de redes seleccionadas con M1, M2, M3, M4 y M5**

<b>RCRP</b>	<b>Método 1 USD [\$]</b>	<b>Método 2 USD [\$]</b>	<b>Método 3 USD [\$]</b>	<b>Método 4 USD [\$]</b>	<b>Método 5 USD [\$]</b>
Callén Inferior	1 717 194.70	1 876 238.34	1 900 494.00	1 925 878.00	2 461 679.00
Tuncarta	21 114.60	27 387.40	27 191.10	28 274.60	34 012.90
Cariyacu	9 305.50	9 794.40	9 507.60	9 708.50	11 706.90
Valcuerna	5 718 114.70	7 111 668.50	6 885 207.00	8 370 887.00	6 883 102.00
Cenicero	252 051.70	317 522.60	330 294.20	371 171.10	358 082.30
Molinar I	4 513 577.40	5 455 811.00	5 286 144.00	5 427 787.00	5 699 841.00
Navarra	4 578 108.80	5 797 372.40	4 666 874.00	5 404 688.00	5 229 653.00
Callén Superior	955 994.90	1 211 370.00	1 195 264.00	1 204 058.00	1 545 843.00
San Rafael	9 8755.70	132 257.20	132 976.10	146 556.90	195 698.98

El proceso que se ejecuta para determinar el Índice de Flexibilidad ante Cambios de Turnos (*IFCT*) y los resultados de este indicador para los diseños óptimos de los casos de estudio en los distintos escenarios analizados se presentan en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Valores de IFCT obtenidos por los métodos: M1, M2, M3, M4 y M5

	M1	M2	M3	M4	M5
Callén Inferior	0.88	0.81	0.81	0.80	0.99
Tuncarta	0.77	1.00	0.88	0.86	0.99
Cariyacu	0.77	0.77	0.77	0.68	0.99
Valcuerna	0.91	0.94	0.93	0.92	0.97
Cenicero	0.72	0.87	0.86	0.88	1.00
Molinar I	0.79	0.90	0.91	0.89	0.98
Navarra	0.84	0.93	0.90	0.82	0.99
Callén Superior	0.59	0.79	0.71	0.74	0.99
San Rafael	0.80	0.90	0.82	0.77	0.91

Como es de esperar, se observa en la Tabla 7.1 que el Método 1, resultado directo de aplicar el Algoritmo Híbrido (AG-PNL), con diámetros continuos, previo a la normalización de los diámetros, incluso considerando que en el AG se han tomado parámetros de cruce y mutación “uniformes”, no ajustados para cada caso, aporta el costo más económico en todos los casos. Y como contrapartida, también como era previsible, en la Tabla 7.2 se comprueba que el Método 1 conduce generalmente a los valores más bajos (desfavorables) de *IFCT*. Puesto que el resto de métodos con los que se establece la comparación, utilizan diámetros normalizados, los resultados del Método 2, con diámetros normalizados serán tomados como referencia preferente. El hecho de que el procedimiento de normalización, que lleva del resultado del Método 1 al resultado del Método 2, sea posterior al proceso de optimización y conlleve los procedimientos heurísticos no optimizados, que se han expuesto en el apartado 5.5, implica un resultado previsiblemente sobredimensionado, especialmente en los tramos finales de los ramales.

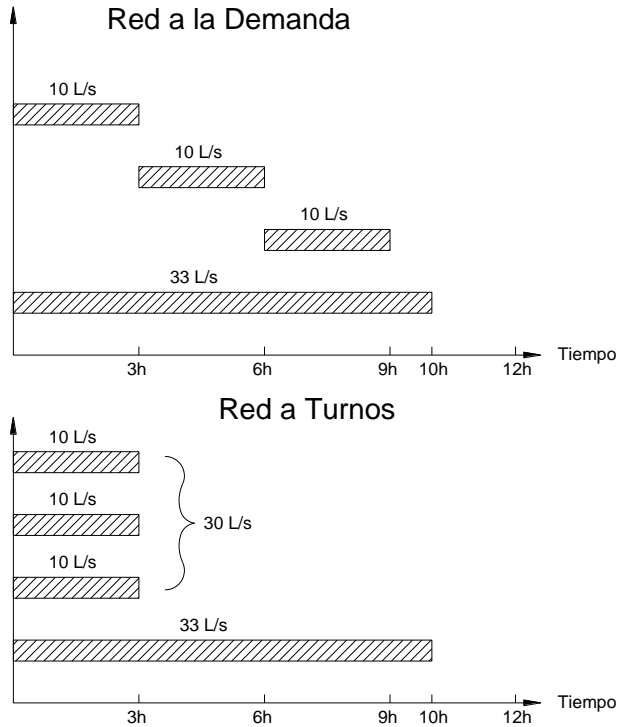
Aun así, se observa que dicho Algoritmo Híbrido (AG-PNL) con normalización posterior (Método 2), obtiene en cinco de las redes estudiadas, menor costo que el procedimiento de diseño a turnos, optimizado mediante algoritmos analíticos tradicionales tipo Serie Económica (MSE-M) con turnos asignados de forma heurística, (Método 4). En este caso se cuentan las redes: Callen Inferior con 2.6%, el caso de la red Tuncarta con 3.14%, la red de Valcuerna con 15.32%, en la red de Cenicero con 14.5%, y en el sistema San Rafael con 9.75%.

Al comparar los resultados del costo de diseño de las redes mediante el Algoritmo Híbrido (AG-PNL) con normalización (Método 2) con el Método 3 (MSE-M), en el que se ha introducido la asignación de turnos resultante del AG-PNL se encuentra que los diseños obtenidos con el Método 3 tienen costos muy semejantes a los encontrados con el Método 2, con diferencias no significativas teniendo en cuenta las incertidumbres del proceso de normalización.

Esto sugiere la determinante influencia de la asignación de turnos en la reducción de los costos en las redes diseñadas operando a turnos, siendo aparentemente esta capacidad del AG-PNL más relevante que el algoritmo en sí empleado en el dimensionado de las conducciones. En el análisis más detallado de la relación costos vs Flexibilidad ante cambios de turnos dada por el (*IFCT*) se observa que el Método 2 obtiene resultados sistemáticamente con algo más de flexibilidad que el Método 3.

Otro hecho relevante es que, en siete de las redes de estudio diseñadas con el Método 5 (diseño a la demanda) el costo del diseño en promedio es mayor en un 24% que el costo de diseño con el Método 2. Como es de esperar esto se debe a que, al ser estos diseños a la demanda el valor del caudal de diseño considerando la garantía de suministro que se especifica en el epígrafe 6.9; es mayor que el valor del caudal a turnos. Sin embargo, en dos casos, de las redes de Valcuerna y Navarra, paradójicamente los diseños a la demanda son más económicos que el diseño a turnos Método 2. Casos particulares como estos suceden cuando las redes tienen hidrantes con tiempos de riego muy distintos y como consecuencia de ello, el caudal de diseño por Clément es menor que el caudal de cabecera de cada turno.

Seguidamente se explica con un ejemplo esta situación particular que se comenta en el párrafo anterior. Se supone que en un cierto ramal en el mismo turno coexisten, un hidrante con tiempo de apertura de 10 horas y 33 L/s de dotación, y otros tres hidrantes con tiempo de apertura de 3 horas, con una dotación de 10 L/s. El caudal punta del turno supone 63 L/s, ya que los hidrantes con tiempos de riego cortos y largos, al entrar en el mismo turno, se abren a la vez con el comienzo del turno. Sin embargo, el modelo de Clément calcula los caudales de forma estadística, por lo cual el consumo de caudal de los tres hidrantes de menor tiempo de apertura no tiene por qué darse de forma sincronizada (Figura 7.1), generando un caudal probable de 43 L/s, o algo mayor. Por lo tanto, el caudal de diseño a la demanda en este caso será menor que el caudal punta del turno.



**Figura 7.1. Caudales de diseño redes a la demanda y turnos en un ramal con hidrantes de muy diferente tiempo de apertura**

En una red a la demanda el sistema da la opción de que los hidrantes de tiempo de apertura más reducido no se sincronicen, generando un caudal punta estadístico que es mayor que el valor de la media, pero menor que el caudal punta “con todo abierto” simultáneamente. Por el contrario, en las redes operando a turnos el caudal de diseño corresponde justamente al valor punta, con todos los hidrantes del turno abiertos simultáneamente. Cuando aumenta el tamaño de la red, el efecto estadístico originado por la probabilidad de apertura de la mayor cantidad de hidrantes que existieran, va disminuyendo. Por lo tanto, en sistemas donde los hidrantes sean muy disjuntos en el tiempo de riego, la modalidad a turnos mal configurada conducirá a diseños costosos.

### **7.3. Análisis de la distribución de caudales y costos de diámetros**

Para tener una visión más detallada de los resultados, se representa, en una gráfica el porcentaje de diámetros existentes en el diseño obtenido y su costo total para cada caso de estudio seleccionado. Se presentan también los caudales en cabecera por turno, de los diseños resultantes de cada caso de estudio con los Método 2, Método 4 y Método 5.

#### **CALLÉN INFERIOR**

Se observan en la Tabla 7.3 los caudales que trasiegan por cada turno en los Método 2 y Método 4, y el caudal de diseño de la red operando a la demanda Método 5. Se evidencia que en la distribución de caudal de cabecera en los turnos 1 y 2 existe un cierto desequilibrio en los Método 2 y Método 4. El caudal a la demanda es mucho mayor que los caudales en los turnos de los Método 2 y Método 4, que producirá posiblemente incremento de costo en este diseño.

**Tabla 7.3. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red Callén Inferior**

	<b>Turno 1 Caudal [L/s]</b>	<b>Turno 2 Caudal [L/s]</b>	<b>Demanda [L/s]</b>
<b>M2</b>	771	684	
<b>M4</b>	800	655	
<b>M5</b>			920

Las redes en España a diferencia de las redes de Ecuador tienen caudales de circulación mucho mayores, datos que influirán en el diseño de las mismas. Cuando las redes son más grandes o más extensas hay una mayor gama de diámetros en el diseño obtenido, con lo cual el análisis es más complejo. La solución del Método 2 a pesar de la distribución de caudales en cabecera no equilibrada en los turnos, es de menor costo que la solución que se obtiene con el Método 4.

Los diseños de esta red con los métodos Método 2, Método 3 y Método 4 resultaron con soluciones en la distribución de diámetros semejantes, por lo que se obtiene un costo total similar de diseño. En los diámetros más grandes el reparto en el Método 2 es equivalente al Método 3 y Método 4, mientras que en

el Método 5 necesita diámetros de tuberías más grandes (hasta 800 mm; Figura 7.2), originando un incremento notable en los costos.

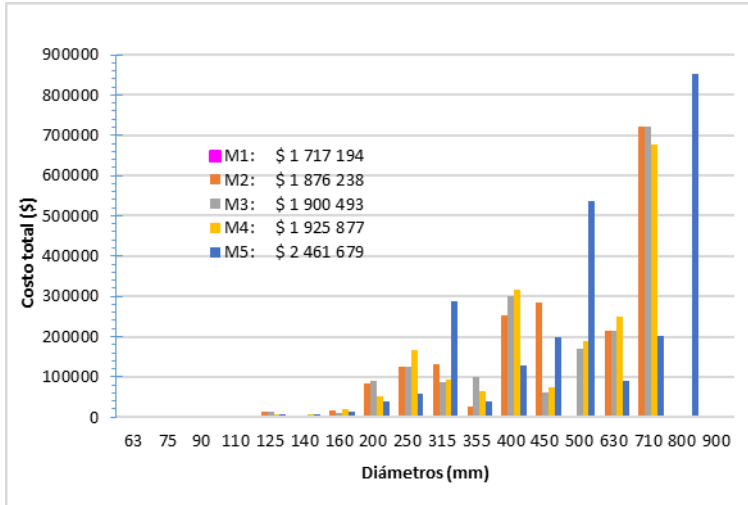


Figura 7.2. Resultados de diseño con métodos 2, 3,4,5 red Callén Inferior

### TUNCARTA

Se observa en la Tabla 7.4 que la distribución de caudal de cabecera en los turnos 1 y 2 es semejante en los Método 2 y Método 4. El caudal a la demanda es similar a uno de los turnos del Método 4.

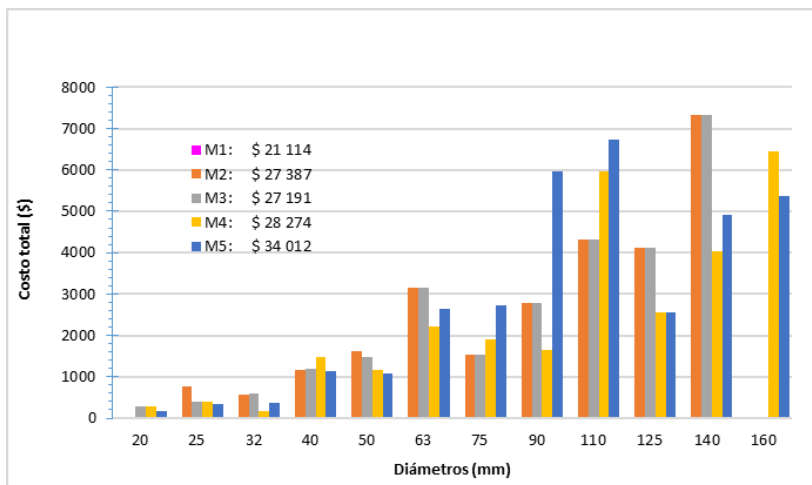
Tabla 7.4. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red Tuncarta

	Turno 1 Caudal [L/s]	Turno 2 Caudal [L/s]	Turno 3 Caudal [L/s]	Demanda [L/s]
<b>M2</b>	37	40	40	
<b>M4</b>	35	43	39	
<b>M5</b>				43

La diferencia de diseño entre los Método 2 y el Método 3 fue mínima, solo de ~200 US\$, es decir la optimización con AG-PNL y el MSE-M demostraron la misma eficiencia para el diseño de esta red. Se observa una distribución de diámetros muy similar, los diámetros más importantes son semejantes, por lo tanto, resulta un costo total equivalente como se muestra en la Figura 7.3.

Posiblemente ha sido en el proceso de normalización de los diámetros pequeños, que se ha realizado en forma heurística en donde se ha adoptado un diámetro más allá de lo necesario. La solución obtenida con el Método 2, resultó más económica en comparación con la solución resultante de los Métodos 4 y 5, que necesitan diámetros más grandes (hasta 160 mm), que produjo un incremento en el costo total de la red.

El costo de diseño de la red con el Método 5 se incrementa en 24 % con referencia al diseño realizado con el Método 2, ya que usa en el diseño diámetros de hasta 160 mm, que están ausentes en el diseño con el Método 2.



**Figura 7.3. Resultados de diseño con métodos 2,3,4,5 red Tuncarta**

## **CARIYACU**

La distribución de los caudales de cabecera en cada turno en los Método 2 y Método 4 son semejantes, por esta razón se advierte un costo de diseño semejante como se observa en la Tabla 7.5. El caudal a la demanda es mucho más alto que los caudales de cabecera en los turnos de los métodos Método 2 y Método 4, lo que producirá posiblemente costos más elevados.

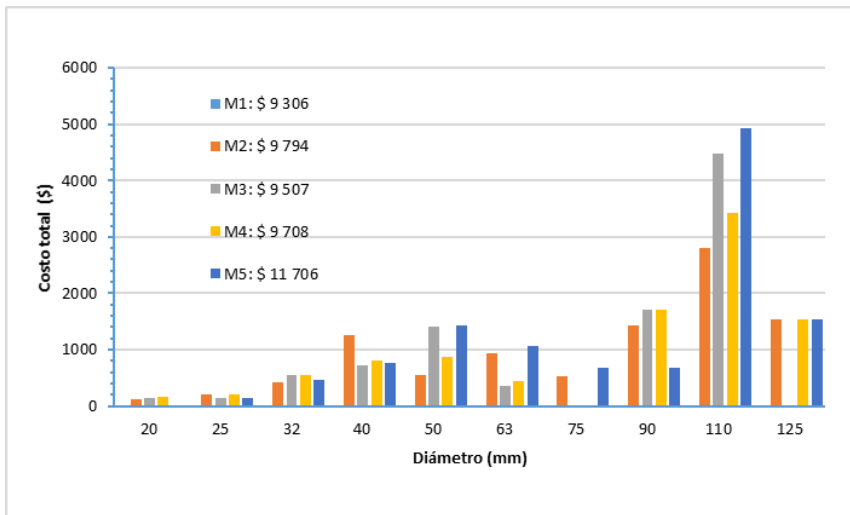


**Tabla 7.5. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red Cariyacu**

	Turno 1 Caudal [L/s]	Turno 2 Caudal [L/s]	Demanda [L/s]
<b>M2</b>	14.80	15.90	
<b>M4</b>	15.50	15.20	
<b>M5</b>			17.10

Como es de esperar los costos totales de diseño de los Método 2 y Método 4 son semejantes debido a la distribución de caudales parecidos. El resultado de diseño con el Método 2 resultó más elevado en un 2% que el diseño con el Método 3, se atribuye al proceso de normalización.

En los diámetros más grandes el reparto en el Método 2 es equivalente al Método 4 y Método 5, que necesitan diámetros de tuberías más grandes (hasta 125 mm; Figura 7.4) originando un incremento en los costos.



**Figura 7.4. Resultados de diseño con métodos 2,3,4,5 red Cariyacu**

## **VALCUERNA**

La distribución de caudales de cabecera en el Método 2 para el turno 1 y el turno 2 es semejante, aunque no idéntica, lo que no sucede en el Método 4 en donde el caudal de cabecera del turno 1 es el doble del caudal de cabecera del turno 2. El caudal de diseño en la red a la demanda es menor que los caudales de cabecera los turnos en los Método 2, y Método 4 (Tabla 7.6).

**Tabla 7.6. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red Valcuerna**

	<b>Turno 1 Caudal [L/s]</b>	<b>Turno 2 Caudal [L/s]</b>	<b>Demanda [L/s]</b>
<b>M2</b>	808	757	
<b>M4</b>	1014	551	
<b>M5</b>			631

En este Caso de Estudio, el diseño a la demanda Método 5 resultó el más económico (debido a la particularidad de hidrantes con tiempos de riego pequeños explicada en el epígrafe 7.2), como existe menor caudal de diseño que el riego a turnos los diámetros grandes están ausentes. Sin embargo, como se puede observar en el diseño con el Método 4, al asignar turnos por un procedimiento no optimizado conduce a un caudal muy elevado, resultando costos más altos. Se calculó una gran cantidad de diámetros de 900mm (ver Figura 7.5), que implican una inversión muy fuerte, generando costos más elevados en comparación con todos los métodos establecidos.

Las soluciones de diseño con el Método 3 y el Método 2 son muy parecidos. El Método 3 utiliza las asignaciones de turnos optimizada, y la aprovecha para lograr costos algo más bajos presumiblemente por el proceso de normalización optimizado que integra el algoritmo del MSE-M. El Método 4 obtiene resultados desfavorables en costos, y se deduce que la elección arbitraria de los turnos no es buena. Una elección arbitraria de turnos en base a alternarlos puede conducir a este resultado. En la operación a la demanda, Método 5, en esta red, el caudal de diseño es menor que en el Método 2, ocasionando por tanto menor costo.

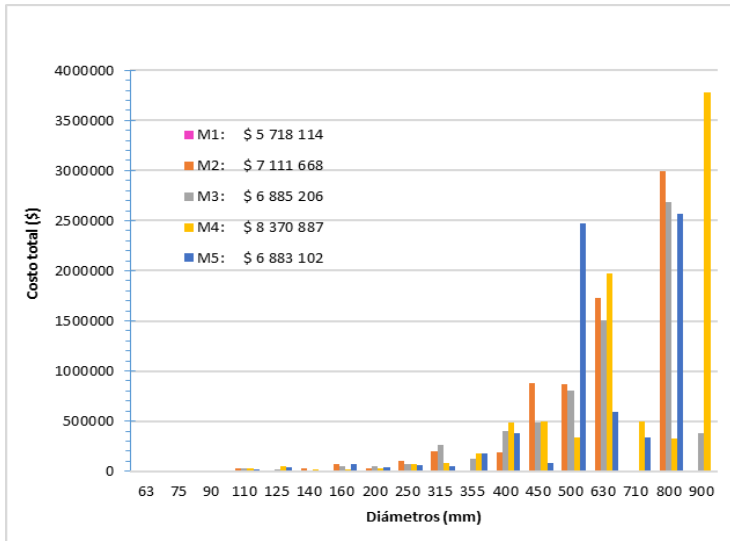


Figura 7.5. Resultados de diseño con métodos 2, 3,4,5 red Valcuerna

El diseño de la red de Valcuerna con el Método 2 es más económico que el diseño con el Método 4, porque dentro de las superposiciones de los tiempos no todos los hidrantes pequeños habrán caído en el mismo turno. Mientras que el diseño con el Método 4, toma turnos al azar y con tiempos de riego muy pequeños por tanto éstos pueden solaparse, lo que producirá un sobrecosto. El Método 5 obtiene costos más económicos que los restantes métodos, como resultado de que usa como caudal de diseño menor valor que los caudales de cabecera de los turnos 1 y 2 de los Método 2 y Método 4.

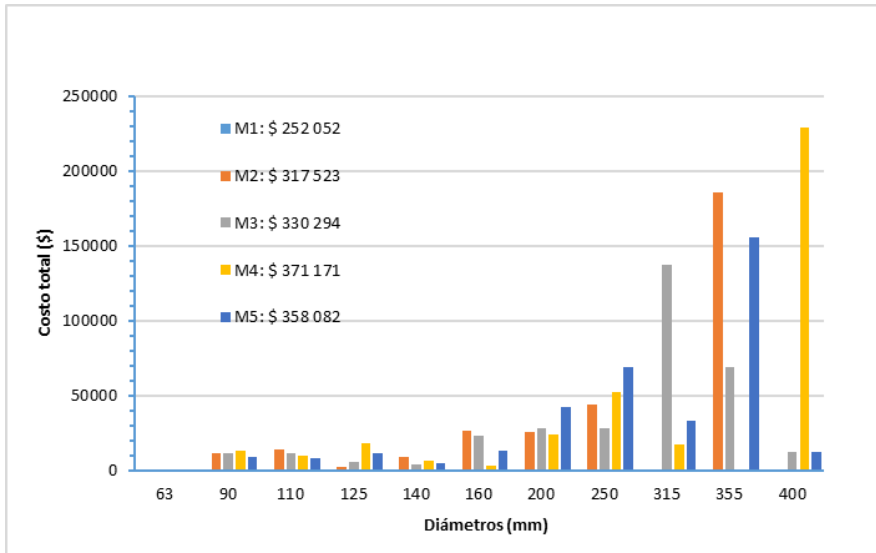
**CENICERO**

Se observan en la Tabla 7.7, que los caudales de cabecera por turnos en el Método 2 presentan cierta asimetría, mientras que en el Método 4 los caudales que se obtienen asignando los turnos en forma heurística tienen más semejanza. Si existen hidrantes con dotaciones iguales, al realizar la repartición de demandas en forma heurística se obtendrá posiblemente un caudal de cabecera igual en todos los turnos, sin embargo, si las dotaciones son distintas se podrán acumular dotaciones mayores en un turno que en otro.

**Tabla 7.7. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red Cenicero**

	Turno 1 Caudal [L/s]	Turno 2 Caudal [L/s]	Turno 3 Caudal [L/s]	Demanda [L/s]
<b>M2</b>	175	102	177	
<b>M4</b>	144	157	153	
<b>M5</b>				105

Se observa en la Figura 7.6 que los Método 2 y Método 3 obtienen los mejores costos a pesar de trabajar con caudales de cabecera de turnos superiores. El Método 4 resulta más caro debido posiblemente a la mala asignación de turnos aleatoria no optimizada.



**Figura 7.6. Resultados de diseño con métodos 2,3,4,5 red Cenicero**

Los diámetros óptimos no son simétricos en los Método 2 y Método 3. La solución con el Método 4 obtiene un costo elevado a pesar de que aparentemente los caudales de cabecera por turnos se encuentran un tanto equilibrados, se puede intuir que en ocasiones equilibrar los caudales en los turnos no es lo idóneo para obtener mejores resultados. La elección óptima de turnos con el método de AG-PNL está generando asimetría notable de caudales de cabecera, con caudales

superiores al Método 4 que aparentemente están equilibrados y también en los caudales de diseño a la demanda Método 5. Se observa, además, que los caudales de cabecera en los turnos 1 y 2 son mayores en los Método 2 y Método 4 que el caudal de diseño en el Método 5, no obstante, los costos de diseño de éstos, resultan menor que el Método 5.

La elección de los turnos es determinante, si se hubiera usado otro método de optimización los resultados serían semejantes ya que tanto los resultados del Método 2 y Método 3 por la elección de los turnos óptimos obtienen costos más bajos, a pesar de que los caudales están desequilibrados y más elevados que a la demanda.

## NAVARRA

La distribución de caudales en los turnos 1 y 2 de los Método 2 y Método 4 tiene cierta semejanza (ver Tabla 7.8), el caudal de diseño de la operación a la demanda es menor que los caudales de cabecera en los turnos de los Método 2 y Método 4, con lo cual se evidencia una reducción de costo en el diseño.

**Tabla 7.8. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red Navarra**

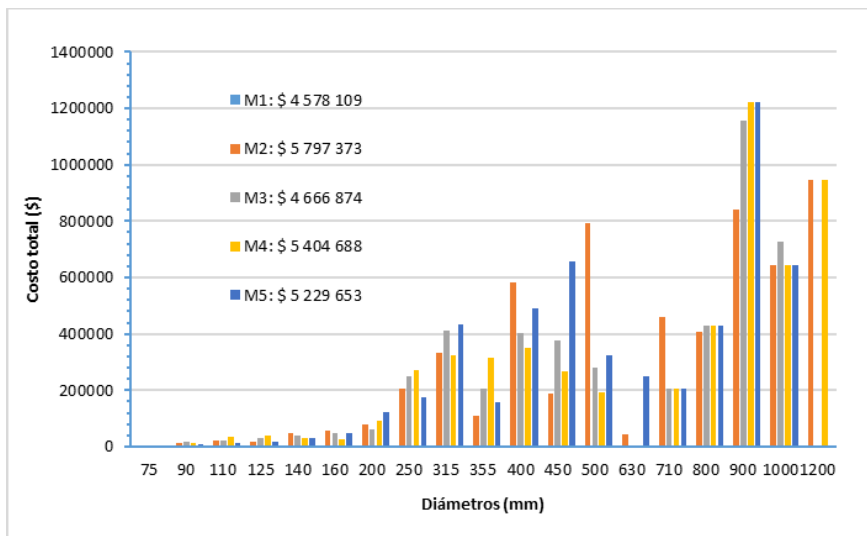
	Turno 1 Caudal [L/s]	Turno 2 Caudal [L/s]	Turno 3 Caudal [L/s])	Demanda [L/s]
<b>M2</b>	1195.90	1157.40	1106.00	
<b>M4</b>	1136.30	1127.50	1195.50	
<b>M5</b>				1152.90

En todos los casos se encontraron soluciones mejores utilizando algoritmos de optimización para el diseño y para la asignación de turnos, con excepción de la red Molinar I, que tuvo problemas de convergencia en la optimización. Posiblemente se puede afirmar que cuando se evalúa costos en una red muy grande el procedimiento con Programación No Lineal es muy lento. Los turnos distribuidos en forma desigual tienden a ser los mejores sobre todo cuando hay diferencias de cota entre zonas, donde unas tienen la presión muy justa y a otras les sobra. Cabe pensar que las soluciones no sean simétricas en algunos ramales. Las soluciones obtenidas con los Método 3 y Método 2, resultan relativamente económicas con turnos óptimos. No obstante, el proceso de normalización

penaliza el costo del Método 2 ya que se cuenta con diámetros en el diseño de hasta 1200mm (ver Figura 7.7)

Igual que en el caso anterior en el Método 4 con asignación de turnos heurísticos, la solución que se obtiene es de mayor costo que en el Método 3, y aunque la distribución de caudales de cabecera por turnos es equivalente a los caudales de cabecera que el Método 2 no se alcanza un costo mejor, lo que permite deducir que el detalle de la asignación de turnos optimizados es influyente.

Con el Método 5 a pesar de contar con un caudal de diseño menor que los caudales de cabecera por turnos de los Método 2 y Método 4 no resultan en menor costo.



**Figura 7.7. Resultados de diseño con métodos 2,3,4,5 red Navarra**

## **CALLÉN SUPERIOR**

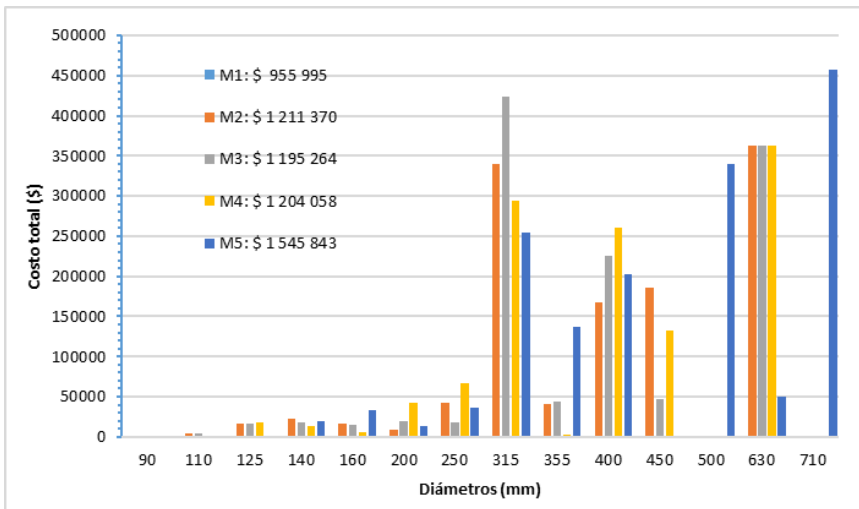
El caudal de cabecera del turno 1 es aproximadamente el doble del caudal del turno 2 en el Método 2, mientras que para el Método 4 la distribución de caudales es semejante, como se muestra en la Tabla 7.9. El caudal para la red operando a la demanda es mucho mayor que los caudales de turnos en los Método 2 y Método 4.

**Tabla 7.9. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red Callén Superior**

	Turno 1 Caudal [L/s]	Turno 2 Caudal [L/s]	Demanda [L/s]
<b>M2</b>	677	391	
<b>M4</b>	549	519	
<b>M5</b>			609

Los caudales de cabecera en los turnos 1 y 2 en el Método 2 son muy distintos, es decir, la distribución de caudales en cabecera de los turnos óptimos en el Método 2, no necesariamente es simétrica. Esto permite intuir que una distribución de caudales equivalente no siempre produce el menor costo. Los métodos Método 2 y Método 3 tienen soluciones muy semejantes (ver Figura 7.8).

La solución del Método 4 con distribución de caudales semejantes es más cara que la solución resultante con el Método 3 en donde los turnos óptimos producen un caudal de cabecera en cada turno que no es semejante.



**Figura 7.8. Resultados de diseño con métodos 2,3,4,5 red Callén Superior**

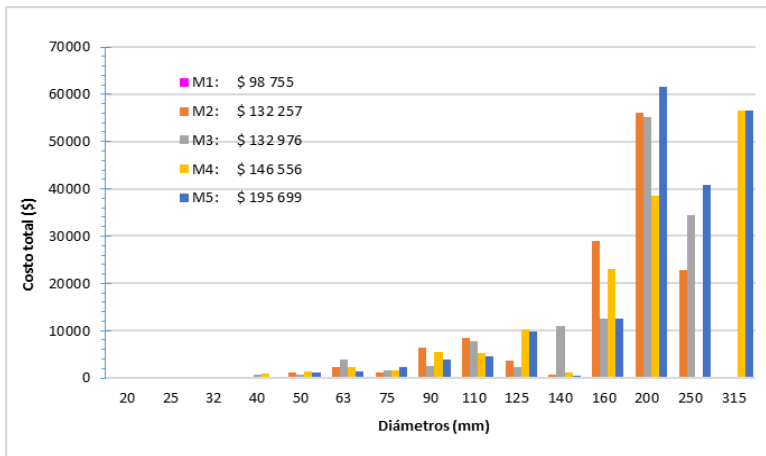
**SAN RAFAEL**

En la Tabla 7.10 se muestran los caudales de cabecera por turnos de los métodos Método 2 y Método 4 que son similares. El caudal de diseño a la demanda es mucho mayor que éstos.

**Tabla 7.10. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red San Rafael**

	Turno 1 Caudal [L/s]	Turno 2 Caudal [L/s]	Turno 3 Caudal [L/s]	Demanda (L/s)
<b>M2</b>	31.00	35.00	38.00	
<b>M4</b>	37.00	38.00	29.00	
<b>M5</b>				56.50

En este caso la solución óptima es coincidente con redes de caudales equidistribuidos que proporcionan caudales de cabecera equivalentes. Nuevamente se encuentra que los turnos optimizados mejoran la solución obtenida en los Método 2 y Método 3. El Método 4 produce resultados de costo mayores que los métodos Método 2 y Método 3 (ver Figura 7.9). No obstante, se tiene una distribución de caudales de cabecera semejantes en los turnos 1, 2 y 3. En el Método 5 el caudal de diseño es mucho mayor que los caudales de cabecera de los turnos en los Métodos 2 y Método 4, este detalle penalizará su costo. Este sobrecosto importante será mayor del 48%.



**Figura 7.9. Resultados de diseño con métodos 2,3,4,5 red San Rafael**



Se encontró un caso de estudio concretamente la Red de Molinar I, en donde el proceso de convergencia del AG-PNL tuvo problemas. Por tanto, los resultados que se obtienen no son representativos. Se incluye este caso con el objeto de conocer la afectación de este suceso y de proporcionar un panorama completo de las redes estudiadas.

## MOLINAR I

La asignación de turnos en los Método 2, Método 4 y Método 5 se presenta en la Tabla 7.11.

**Tabla 7.11. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red Molinar I**

	Turno 1 Caudal [L/s]	Turno 2 Caudal [L/s]	Turno 3 Caudal [L/s]	Demanda [L/s]
<b>M2</b>	1025.40	1033.50	857.70	
<b>M4</b>	1063.50	1132.90	793.20	
<b>M5</b>				1047.60

En el Método 4 se realiza la asignación arbitraria con el mismo caudal de cabecera en los turnos del Método 2 en forma provisional, dado el hecho de la no convergencia que producen los caudales de cabecera que se muestran en la Tabla 7.11, y sigue la misma tendencia que los restantes casos seleccionados. Se observa que los turnos heurísticos con condiciones equilibradas resultan con costos menores. El Método 5 necesita mayor cantidad de diámetros de tuberías más grandes (Figura 7.10), originando un incremento notable en los costos.

Nuevamente la normalización penaliza al Método 2. El Método 3 que usa los turnos óptimos consigue mejores resultados, siendo los caudales de cabecera parecidos con el Método 2. La asignación de turnos mejora los costos de diseño de las redes. Tanto los Método 3 y Método 4 tienen el mismo algoritmo de optimización con la diferencia de la asignación de turno.

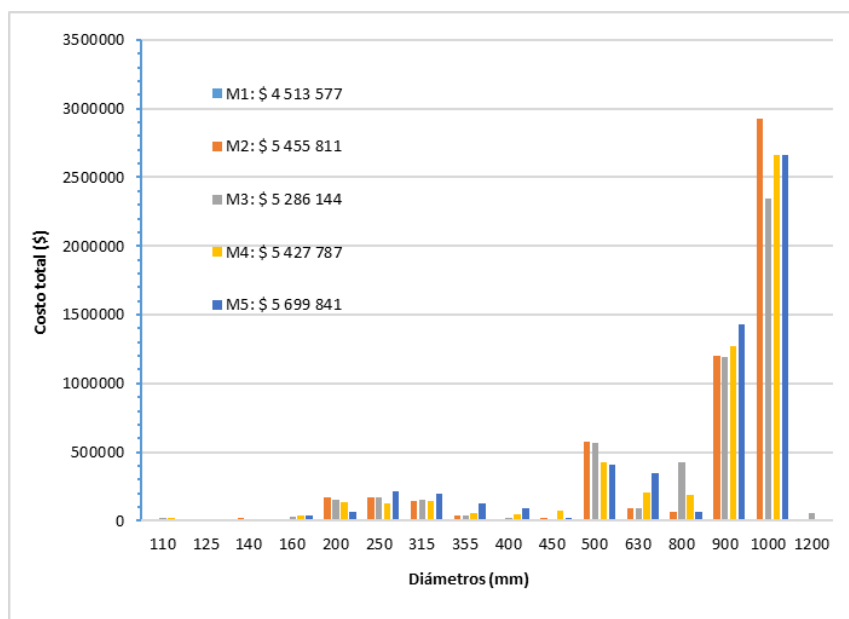


Figura 7.10. Resultados de diseño con métodos 2,3,4,5 red Molinar I

#### 7.4. Análisis de resultados de IFCT y Costo con métodos de optimización

Después de analizar los costos y caudales de cabecera de los diseños de los Casos de Estudio, se procede a estudiar su comportamiento en cuanto a la flexibilidad ante cambios de turnos, evaluada mediante el indicador *IFCT*. Como ya se ha reiterado en el diseño de los sistemas a turnos no, sólo el costo es un factor decisivo, sino también su flexibilidad en servicio. Se reproducen en la Tabla 7.12 los resultados de costo de diseño y del *IFCT* para cada Caso de Estudio con los métodos implementados.

Tabla 7.12. Resultados de costos y de IFCT para los Casos de Estudio

		M1	M2	M3	M4	M5
Callén Inferior	Flexibilidad	0.88	0.81	0.81	0.80	0.99
	Costo	1717194.70	1876238.30	1900494.00	1925878.00	2461679.00
Tuncarta	Flexibilidad	0.77	1.00	0.88	0.86	0.99
	Costo	21114.60	27387.40	27191.10	28274.60	34012.90
Cariyacu	Flexibilidad	0.77	0.77	0.77	0.68	0.99
	Costo	9305.50	9794.40	9507.60	9708.50	11706.90
Valcuerna	Flexibilidad	0.91	0.94	0.93	0.92	0.97
	Costo	5718114.70	7111668.50	6885207.00	8370887.40	6883102.00
Cenicero	Flexibilidad	0.72	0.87	0.86	0.88	1.00
	Costo	252051.70	317522.60	330294.20	371171.10	358082.30
Molinar I	Flexibilidad	0.79	0.90	0.91	0.89	0.98
	Costo	4513577.40	5455811.00	5286144.00	5427787.00	5699841.00
Navarra	Flexibilidad	0.84	0.93	0.90	0.82	0.99
	Costo	4578108.80	5797372.40	4666874.00	5404688.00	5229653.00
Callén Superior	Flexibilidad	0.59	0.79	0.71	0.74	0.99
	Costo	955994.90	1211370.00	1195264.00	1204058.00	1545843.00
San Rafael	Flexibilidad	0.80	0.90	0.82	0.77	0.91
	Costo	98755.70	132257.20	132976.10	146556.90	195698.98

El diseño de las redes de estudio con el Método 1 calcula diámetros continuos obteniendo un *IFCT* entre 0.77 y 0.91 (ver Tabla 7.12), suministrando los valores más bajos en promedio. En los diseños extraídos directamente del AG-PNL (Método1) se encuentran diámetros continuos que no aportan holgura como sucede cuando se utilizan diámetros normalizados. Por tanto, es más difícil el cumplimiento de la presión de consigna cuando se modifica la asignación de los turnos en los hidrantes. En el otro extremo, el Método 5 aporta valores del *IFCT* que se aproximan siempre a 1, como es de esperar en el diseño a la demanda.

El costo que se obtiene con el diseño usando el Método 3 que aprovecha la información de los turnos, es igual o inferior que el resultado de diseño con el Método 2 en seis redes Tuncarta, Cariyacu, Valcuerna, Molinar I, Callén Superior y Navarra; y superior en tres de ellas Callén Inferior, Cenicero y San Rafael. Sin embargo, los valores del *IFCT* obtenidos en los diseños con el Método 3, son iguales o menores respecto al Método 2, para todas las redes de estudio (salvo Molinar I). Esto parece confirmar que la normalización y el ajuste heurístico de diámetros de los ramales finales generan mayor holgura que los procedimientos de normalización optimizada (criterio tipo Labye), lo que se traduce en mayor costo respecto del Método 2 frente al Método 3, pero como consecuencia, esta

mayor holgura conduce también a una mayor flexibilidad en el Método 2 comparada con el Método 3.

Normalizando las tuberías a diámetros discretos más próximos y comparando los valores de presiones y velocidades (Método 2) se observa que generalmente los costos aumentan, pero a la vez, se produce un sensible incremento del 13% en promedio del valor de flexibilidad del Método 2 con respecto al Método 1 en todas las redes (salvo Callen Inferior, Método 1: 0.88 vs. Método 2: 0.81) y (Cariyacu, que se mantiene). En consecuencia, la mayoría de los hidrantes de los sistemas de riego analizados mantienen la suficiente presión para dar servicio adecuado cuando se cambia la asignación de turnos en los mismos. Una posible interpretación de este suceso, será que es debido a la holgura de diámetros que se introduce en el método heurístico de normalización.

Al usar el Método 4 resultan diseños menos flexibles, y paradójicamente más costosos. Así, los valores del *IFCT* obtenidos (ver Tabla 7.12) son menores que los obtenidos con el Método 2. En las redes que se diseñaron con el Método 4, la media general por incremento de costo con respecto a las redes diseñadas con el Método 2 es mayor en 9% y con el Método 3 es mayor en 7%, que se atribuye a que se colocó los turnos sin ningún criterio de optimización, sino de acuerdo a criterios arbitrarios o dictados por la experiencia. Por otro lado, los resultados del Método 4 tienden a perder flexibilidad en un promedio de 8.5% respecto del Método 2, y en 5% con respecto al Método 3. Esta menor flexibilidad del Método 4 con respecto al Método 2, es debida al proceso de normalización seguido por el Método 2, que además de la combinación óptima de turnos para reducir el costo de la red, genera mayor holgura en los ramales finales, permitiendo mayores combinaciones de apertura de hidrantes favorables.

Cuando se diseñan los sistemas de riego operando a la demanda (Método 5) se encuentran *IFCT* próximos a la unidad para todas las redes seleccionadas con valor medio de 0.99. Este Método 5 estima que un número máximo de hidrantes igual a la simultaneidad de diseño, pueden estar abiertos al mismo tiempo, prácticamente en cualquier combinación aleatoria que se adopte. La simultaneidad de diseño se obtiene en función de la garantía de suministro (GS) y se comprueba que, aunque se adoptan valores de GS bajos en cabecera (90% a partir de 50 hidrantes, que es el umbral inferior de una red a la demanda), se confirma que el *IFCT* no solo es el más alto, sino que está próximo a la unidad para todas las redes seleccionadas. Dado que una red diseñada a la demanda

puede ser operada a turnos, si el caudal del turno no excede el caudal de diseño a la demanda, y los turnos se reparten considerando una asignación de turnos basada en la experiencia o criterios ingenieriles entre dos ramales, esta red gozará de flexibilidad total ante cambios de operación.

En resumen, el algoritmo híbrido aplicado (AG-PNL) facilitó los turnos para lograr diseños más económicos con los Método 2 y Método 3. El Método 4 obtiene diseños más costosos para todas las redes, debido a la falta de la optimización de turnos, que indica la necesidad de aplicar un método de asignación de turnos óptimo. Los Método 2 y Método 3 que utilizan los resultados del algoritmo híbrido (AG-PNL) encontraron costos menores, que demuestra la similar eficiencia de los métodos para la optimización de los diámetros de las tuberías en función de la distribución de turnos. Sin embargo, el Método 3, utiliza un criterio de normalización de diámetros de mínimo costo, que tiende a reducirlos también en los extremos de los ramales, y como consecuencia obtiene diámetros más pequeños que el Método 2, cuya normalización heurística, tiende a mayorar los diámetros extremos. Estos diámetros pequeños en el diseño con el Método 3, reducen algo el costo, pero afectan la flexibilidad del sistema, dado que tienen menos holgura ante cambios en la operación que en el Método 2. Por la misma razón, el Método 4 a pesar de ser más costoso, presenta además la menor flexibilidad. El Método 3 es más flexible que el Método 4 en general con un porcentaje promedio del 5%.

El *IFCT* más alto para todas las redes seleccionadas fue obtenido para el diseño a la demanda, originado por los diámetros grandes necesarios, que facilitan la flexibilidad de operación ante cualquier cambio eventual. No obstante, las redes a la demanda son en general más costosas en todas las redes menos dos, para las cuales una operación a turnos es favorable.

Dado que se comprueba existe una relación entre costo de la red y su flexibilidad ante cambios de turnos, es de interés analizar con más detalle esta correlación, para los diversos métodos. Para ello se comparan los costos y flexibilidad de los diseños con el AG-PNL (Método 2), respecto a los métodos alternativos de diseños presentados en este estudio.

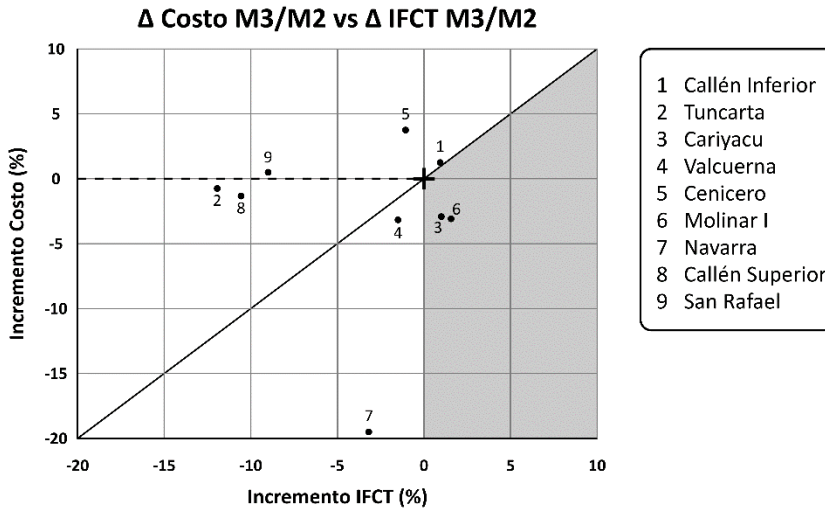
En la Tabla 7.13 se muestran las variaciones porcentuales de los costos de tuberías y del *IFCT* de los casos de estudio seleccionados en los Método 3, Método 4 y Método 5 con respecto al Método 2 que se toma como referencia en todas las variantes. Los porcentajes de incrementos de costos positivos ( $\Delta$ )

Costo%) y de incrementos de *IFCT* negativos ( $\Delta IFCT$  %) implican mayor precio y menor flexibilidad respectivamente de la alternativa indicada, respecto a los resultados del AG-PNL (Método 2).

**Tabla 7.13. Valores de  $\Delta$  costos y de  $\Delta$  IFCT para Redes de Estudio**

RED	(M3-M2)/M2 %		(M4-M2)/M2 %		(M5-M2)/M2 %	
	$\Delta$ IFCT (%)	$\Delta$ Costo (%)	$\Delta$ IFCT (%)	$\Delta$ Costo (%)	$\Delta$ IFCT (%)	$\Delta$ Costo (%)
<b>Callén Inferior</b>	0.93	1.29	-0.35	2.65	22.66	31.20
<b>Tuncarta</b>	-11.97	-0.72	-13.71	3.24	-0.41	24.19
<b>Cariyacu</b>	1.01	-2.93	-11.49	-0.88	29.33	19.53
<b>Valcuerna</b>	-1.48	-3.18	-2.01	17.71	3.33	-3.21
<b>Cenicero</b>	-1.09	4.02	1.09	16.90	14.60	12.77
<b>Molinar I</b>	1.54	-3.11	-0.63	-0.51	9.80	4.47
<b>Navarra</b>	-3.21	-19.50	-11.62	-6.77	6.80	-9.79
<b>Callén Superior</b>	-10.57	-1.30	-6.26	-0.60	24.74	27.61
<b>San Rafael</b>	-8.97	0.54	-13.94	10.81	1.42	47.97

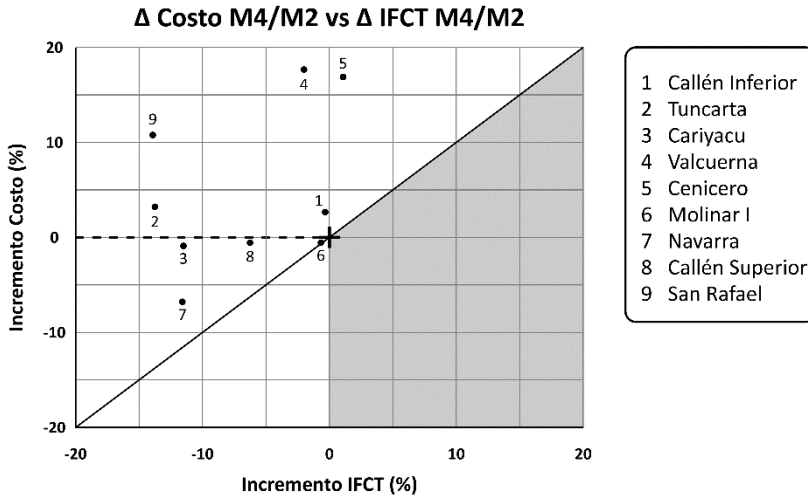
Se observa en la Tabla 7.13, columna primera, y Figura 7.11 que en los diseños de RCRP a turnos con el Método 3 (se ha requerido de información de los turnos óptimos obtenidos del Método 2) los costos son semejantes al Método 2 pero éste genera diseños más flexibles. Con el Método 3 la flexibilidad de las redes disminuye en un promedio total de -6.21%, excepto para las redes de Callén Inferior, Cariyacu y Molinar I, donde la flexibilidad aumentó ligeramente (1.16%) en promedio.



**Figura 7.11. Relación de incremento de costo vs incremento de IFCT, M3/M2**

El Método 4, no solamente genera diseños más costosos sino además menos flexibles que el Método 2, (ver Tabla 7.13, columna segunda y Figura 7.12). Se observa una tendencia de incremento de los costos totales de las redes (promedio: 9.0%) y una reducción de la flexibilidad (promedio: -8.50 %).

La razón, ya comentada, es la falta de optimización de los turnos que supone el Método 4, a lo que se añade el ajuste excesivo de los diámetros en los ramales finales, lo que nuevamente subraya la gran importancia de la asignación de turnos en la concepción del diseño. Es posible concluir que el MSE-M obtiene diseños algo más económicos, sólo gracias a su proceso de normalización optimizado, aunque menos flexibles.



**Figura 7.12. Relación de incremento de costo vs incremento de IFCT, M4/M2**

Estos resultados indican que no sólo el Algoritmo AG-PNL genera turnos cuyos diseños son más económicos que los procedimientos de asignación de turnos arbitrario, sino que éstos son igualmente flexibles frente a los cambios de turnos sobrevenidos.

Se observa una elevada variabilidad de las diferencias de costos entre diseños a la demanda y a turnos según la red de cada Caso de Estudio, con unos ahorros en el diseño a turnos respecto a la demanda situados entre el 4.5% y el 48%. Estas variaciones están en línea con lo observado en otras investigaciones centradas en establecer comparativas entre diseños a la demanda y a turnos. En la red estudiada en Espinosa et al. (2016) el ahorro del sistema a turnos respecto a la demanda es del 22%. En la red analizada por Alduán y Monserrat (2009) este ahorro es del 15% y en los tres casos encontrados en Monserrat et al. (2012) se encuentra en un rango del 5% al 9%. El que en esta investigación se hayan encontrado ahorros generalmente mayores se interpreta que es debido al hecho de haber optimizado la asignación de turnos, como sucede también en el caso presentado en Farmani et al. (2007) en el cual el ahorro ascendía hasta el 55%.

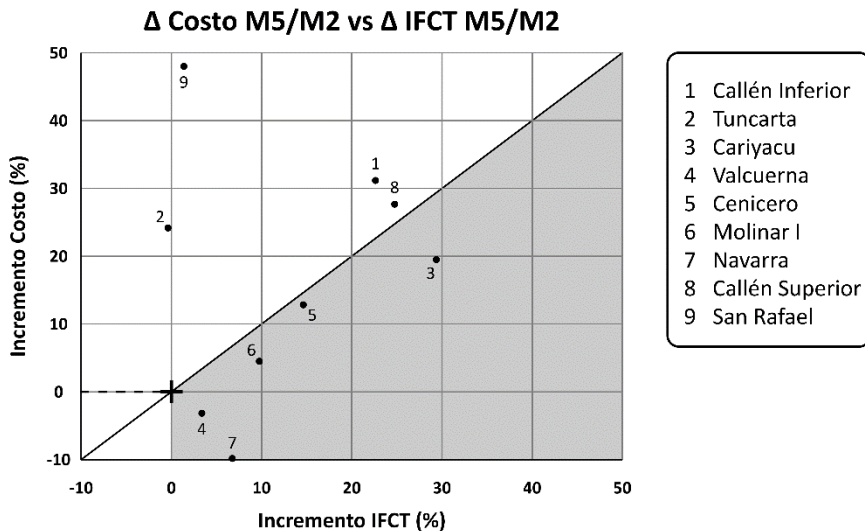
El análisis precedente permite además formular un criterio racional en la toma de decisiones a la hora de establecer la conveniencia de un diseño a turnos o a la demanda de una nueva RCRP. Siguiendo la secuencia que se especifica en el



epígrafe 5.4.2, se puede adoptar un criterio que es posible visualizar a través de una gráfica, en donde:

El eje de las abscisas representa el valor del incremento del *IFCT* del diseño a la demanda (Método 5) respecto al diseño a turnos (Método 2). Este porcentaje siempre es igual o mayor que cero, al pasar de un diseño a turnos o a un diseño a la demanda.

El eje de las ordenadas indica el porcentaje de incremento de costo del diseño a la demanda (Método 5) en relación con el diseño a turnos (Método 2). Valores positivos representan costos más elevados y valores negativos costos más económicos. La línea diagonal marcada indica la región donde el incremento de costos crece de forma paralela al incremento de flexibilidad, (ver Figura 7.13).



**Figura 7.13. Relación de incremento de costo vs incremento de IFCT, M5/M2**

En los casos en que los incrementos de costo vs incremento del *IFCT* se localicen netamente por encima de dicha línea, el diseño a turnos será el más indicado, ya que los incrementos de costo del diseño a la demanda superarán a los aumentos de flexibilidad. Los casos que se sitúen próximos a dicha línea o netamente por debajo (zona sombreada de la Figura 7.13) indicarán una preferencia de un diseño a la demanda. Estas condiciones se pueden formalizar como sigue: El diseño a la demanda será recomendable si:

$$\frac{\Delta C (\%)}{\Delta IFCT (\%)} \leq 1$$

**Ecuación 7.1**

En caso contrario, será más recomendable realizar un diseño a turnos. Este criterio no puede tomarse de forma absoluta sino indicativa y debe complementarse con otros parámetros importantes en la toma de decisiones como se expone en Espinosa et al. (2016).

A partir de una ratio en donde se evidencia el incremento del valor de flexibilidad con respecto al incremento del costo en las redes operando con la modalidad a la demanda o turnos, se elegirá uno u otro diseño. Así, los sistemas que resulten más costosos con la modalidad a turnos sin incremento de la flexibilidad será mejor que operen con la modalidad a la demanda.

Al aplicar este criterio a los nueve casos de estudio, se evidencia que en las redes Tuncarta y San Rafael el costo se incrementa notablemente (promedio: 36%) sin mejorar la flexibilidad y en la Figura 7.13 los puntos que las representan se sitúan netamente muy por encima de la zona sombreada. Los resultados de estas redes se ubican sobre la diagonal muy por encima de ella, que evidencia que la modalidad de operación por turnos es el diseño ideal para estas redes.

Para las redes de Callén Inferior, Callén Superior, Cariyacu, Cenicero y Molinar I tanto el valor del *IFCP* y el valor del costo aumentaron en promedio de 19% y 20% en promedio y respectivamente, situándose en el umbral de la conveniencia del diseño a la demanda y muy próximos a la diagonal. En este caso los recursos disponibles serán un factor clave para la decisión de diseñar las redes a turnos o a la demanda. Si los usuarios cuentan con suficiente economía, entonces el diseño a la demanda será el adecuado ya que con éste se logra mayor flexibilidad, caso contrario se definirá el diseño de las redes para su explotación a turnos.

El diseño a la demanda resultó en menor costo que el diseño a turnos para las redes de Valcuerna y Navarra, debido a que los tiempos de apertura de los hidrantes son muy distintos, y en consecuencia los caudales de diseño a la demanda resultan menores que los de diseño a turnos. Por ello, la mejor opción será realizar el diseño a la demanda, a no ser que se redefiniera el número de turnos, la duración de los mismos y se procediera a modificar las dotaciones para homogeneizar los tiempos de apertura de los hidrantes.

Para las redes de Cariyacu, Cenicero, Molinari, Callén Inferior y Callén Superior existe un incremento en el costo de 19% en promedio, con respecto al diseño por turnos. Sin embargo, la flexibilidad se incrementa en un promedio de 20%, siendo

más idóneo contar con este margen de flexibilidad en operación, no obstante, el alza del costo. Este análisis permite determinar conveniente un diseño a la demanda para estas redes. Se destaca que los sistemas de riego de Cariyacu, Cenicero, Molinar I, Valcuerna y Navarra se encuentran bajo la diagonal de la Figura 7.14, que indicará que es más eficaz el diseño a la demanda.

Se muestra en la Figura citada el resumen del criterio que se formula para definir el diseño más conveniente a la hora de operar las nueve redes de estudio.

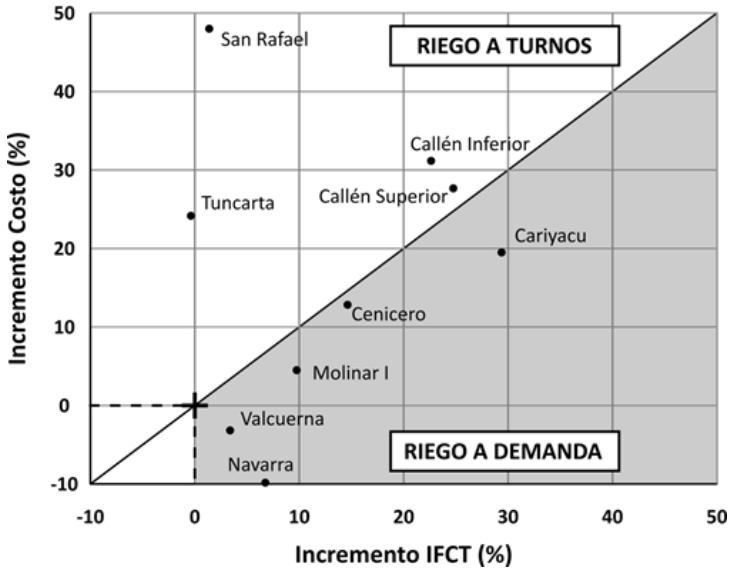


Figura 7.14. Criterio para definir Modalidad de riego conveniente Casos de Estudio



# Capítulo 8 :

# Conclusiones

## 8.1. Presentación

Esta contribución presenta un Algoritmo Híbrido que combina un Algoritmo Genético (AG) con una optimización basada en la Programación No Lineal (PNL) para el diseño óptimo de redes presurizadas de riego operando a turnos. Como consecuencia de este proceso, se implementa un indicador para evaluar la flexibilidad de los diseños resultantes del Algoritmo Híbrido. El objetivo principal es la minimización del costo económico de la red de tuberías y la evaluación de la flexibilidad de los diseños resultantes. La investigación considera como variables de decisión la asignación de turnos a las tomas de riego (hidrantes) y el dimensionado de las conducciones para reducir los costos de implementación. Con los resultados de la optimización se analiza la flexibilidad de la red hidráulica en base de la reasignación heurística de turno a los hidrantes, que simulan las modificaciones susceptibles de ocurrir durante la explotación de la red. Para validar el algoritmo, una vez ajustado, éste fue aplicado al diseño de nueve sectores de riego reales de Ecuador y España.

Con las soluciones obtenidas se concluyen seguidamente las aportaciones más significativas presentadas en esta investigación.

## **8.2. Aportaciones**

### ***8.2.1. Algoritmo Híbrido AG-PNL.***

Como eje central de esta investigación se ha desarrollado la formulación, implementación y validación de un Algoritmo Híbrido AG-PNL que optimiza simultáneamente la asignación de los turnos a los hidrantes y de diámetros a las conducciones, para encontrar la solución de mínimo costo en el diseño de Redes Colectivas de Riego a Presión (RCRP) operando a turnos. En el estado de desarrollo actual el algoritmo se restringe al uso de redes estrictamente ramificadas, formadas de tuberías de un solo material y timbraje, y con altura piezométrica de cabecera impuesta.

Dado que en este proceso subyacen dos problemas de optimización acoplados, pero distintos, como son la asignación de turnos, por un lado, y el diseño de la red, por otro, el Algoritmo Híbrido integra dos tipos de algoritmos, orientados cada uno de ellos a resolver estos problemas.

La resolución del diseño de redes ramificadas es un problema suficientemente resuelto mediante métodos deterministas. Sin embargo, la inclusión del reparto de turnos en el proceso de diseño complica notablemente el problema. El algoritmo propuesto combina el problema discreto de la asignación de turnos (resuelto mediante un AG) con el dimensionamiento mediante un método determinista (PNL) obteniendo como resultado un algoritmo rápido y eficiente para la resolución de dicho problema.

Las características y prestaciones del Algoritmo Híbrido, se mencionan a continuación:

- ✓ La formulación del Algoritmo Híbrido permite disminuir la dimensionalidad del problema a resolver, ya que la determinación de los diámetros óptimos para una asignación de turnos dada, en el caso de redes ramificadas tiene una solución analítica proporcionada en este trabajo por el algoritmo de Programación No Lineal GRG, que es netamente determinístico. El fundamento de la PNL es que todas las soluciones se encuentran en la zona factible, de forma que el valor de la

---

función objetivo siempre disminuye sin violar ninguna restricción. El empleo del Algoritmo Genético se ha restringido a la búsqueda de turnos, puesto que, no existe garantía de que el problema sea convexo. De esta manera se otorga mayor generalidad al procedimiento, si bien como método metaheurístico no se alcanza el óptimo absoluto.

- ✓ Luego del ajuste de los operadores evolutivos del Algoritmo Híbrido AG-PNL se concluye que dicho algoritmo se muestra consistente y robusto frente a la elección de dichos parámetros, y que es el tiempo de cálculo la variable más afectada. Los valores que se recomiendan emplear son, para la Probabilidad de Cruce  $P_c$  un valor de 0.5 y para la Probabilidad de Mutación  $P_m$  un valor de  $1/N_{VD}$ . En este caso  $N_{VD}$  representa el número de hidrantes de la red de riego. Cabe anotar que existió un sólo caso, la red de Molinar I, en donde se encontró excesiva lentitud de convergencia en cualquier condición de ajuste de operadores. Esta falta de convergencia podría deberse a un excesivo número de mínimos locales, lo cual constituye una de las limitaciones de los algoritmos heurísticos como el AG.
- ✓ Para la implementación del Algoritmo Híbrido se combinaron herramientas de PNL (SOLVER) y AG (EVOLVER) en un entorno operativo unificado que permite trabajar con redes de tamaño arbitrario. Posteriormente, se procedió a la validación exhaustiva del Algoritmo Híbrido mediante su aplicación sistemática a un batería de nueve Casos de Estudio distintos, extraídos de proyectos reales, con una amplia diversidad de condiciones operativas, topográficas, y dimensión (entre 33 y 207 hidrantes). Esto implica un extenso espectro de casuística y de variantes, que ha permitido obtener conclusiones más representativas.
- ✓ En el algoritmo PNL-GRG los resultados de los diámetros óptimos directamente obtenidos no son comerciales, lo que requiere realizar una etapa de reajuste posterior y externa al Algoritmo Híbrido de optimización. Esta etapa de reajuste contempla aspectos heurísticos que introducen una cierta variabilidad al resultado final. Así, el proceso de normalización influye en el costo de la red final de la red y en sus prestaciones.  
En el procedimiento de post-normalización los diámetros de los ramales finales de las redes que es en donde se localizan los diámetros más

pequeños, tienden a ser supra-normalizados. Este particular genera un impacto en el costo moderado, que sin embargo es favorable en cuanto a la flexibilidad posterior de la red resultante.

### ***8.2.2. Caracterización de la Flexibilidad de las redes a turnos.***

La principal diferencia entre el riego a la demanda y el riego a turnos está en la flexibilidad que da el riego a la demanda al comportamiento de los regantes. Por ello, y con el propósito de evaluar la RCRP, se aportó la definición de un nuevo parámetro denominado Indicador de Flexibilidad del sistema frente a Cambio de Turnos (*IFCT*). Este indicador estimará la flexibilidad de una RCRP para suministrar presión suficiente en las tomas ante posibles cambios de asignación de los turnos de riego durante la explotación de la misma. Para el cómputo fiable de este parámetro se generaron un número de alternativas de turnos del orden de 20 veces el número de hidrantes.

El *IFCT* junto con el análisis estadístico de la distribución de fallos en la presión a suministrar ante cambios de turnos, contribuyen a identificar las zonas con hidrantes menos resilientes a la modificación de turnos. Así, a través de un análisis de asimetría de los valores de la fiabilidad en presiones  $FP_n$  de cada hidrante de cada red de estudio, se evidencia que el 50% de los hidrantes en las redes analizadas cuenta con una fiabilidad de presión ante cambios de turnos, generalmente con valores mayores del 70 %. Una red puede resultar con un *IFCT* alto, pero sin embargo tener algunas zonas con valores muy bajos de  $FP_n$  en sus hidrantes.

### ***8.2.3. Comparación de las prestaciones del Algoritmo Híbrido AG-PNL.***

Los resultados del Algoritmo Híbrido AG-PNL, han sido comparados en términos de costo de los diseños producidos y en cuanto al *IFCT*, con los encontrados mediante métodos alternativos de dimensionado en diámetros continuos. Estos métodos alternativos, se fundamentan en un algoritmo de tipo Multiplicadores de Lagrange, que mediante diversas extensiones y mejoras permite efectuar el dimensionado óptimo de redes, tanto a turnos como a la demanda. El MSE integra el algoritmo de dimensionado discontinuo de Labye para proceder a la normalización de los diámetros (que se ha referido como MSE-



M). A continuación, se resumen algunas consecuencias de la comparación efectuada con los métodos alternativos:

- ✓ Los costos de los diseños resultantes con el Método 2 (que encierra la normalización final de los resultados del Algoritmo Híbrido AG-PNL, afectados de la pérdida de optimización) con el algoritmo del MSE-M y la utilización de turnos no optimizados, Método 4, ha conducido a costos más económicos a favor del Algoritmo Híbrido AG-PNL en hasta 10.3%, y a una superior flexibilidad, lo que supone un notable avance respecto a las técnicas de diseño tradicionales para sistemas de riego presurizados operando a turnos.
- ✓ Los costos de las redes dimensionadas mediante MSE-M usando los turnos óptimos hallados por el Algoritmo Híbrido AG-PNL, (Método 3), son semejantes a los costos resultantes empleando el Algoritmo Híbrido AG-PNL con diámetros normalizados, (Método 2). Se deduce que, para la reducción de los costos de un diseño a turnos, la optimización de los turnos es más relevante que el tipo de método de optimización empleado para el dimensionado de los diámetros de las conducciones. Esto sugiere la determinante influencia de la asignación de turnos en la reducción de los costos en las redes diseñadas operando a turnos, siendo aparentemente esta capacidad del AG-PNL de mayor impacto que el algoritmo en sí empleado en el dimensionado de las conducciones.

En función de lo anterior se induce que, en el cómputo de la función objetivo para evaluar el fitness de una asignación de turnos del AG, podría utilizarse otro tipo método de dimensionado óptimo de la red correspondiente, que requiera muy poco tiempo de cálculo y aunque su resultado sea un valor aproximado del costo de las conducciones de la red, sería suficiente para clasificar las soluciones más adaptadas. Reservando los procedimientos más refinados para una etapa de dimensionado final con la asignación de turnos óptimos.

- ✓ Los resultados del Algoritmo Híbrido AG-PNL una vez normalizados (Método 2) conducen además a redes con una mayor flexibilidad (6.21 %) que las encontradas con el MSE-M incluso partiendo de los turnos optimizados por el Algoritmo Híbrido AG-PNL (Método 3). Se atribuye este

comportamiento al proceso de normalización heurística del AG-PNL, que tiende a mayorar los diámetros en los ramales finales. En el MSE-M, por el contrario, se usa un criterio de normalización de diámetros más estricto que ajusta todas las tuberías de la serie, incluyendo los extremos de los ramales, para minimizar su costo. Como consecuencia, obtiene soluciones con menos holgura de presión, y con menor capacidad de soportar cambios en la distribución de caudales respecto a las condiciones de diseño.

Esta hipótesis se verifica al encontrar que los valores del *IFCT* obtenidos en los diseños con el algoritmo MSE-M con turnos de asignación con criterio ingenieril o heurístico (Método 4) resultan menos flexibles, en un valor promedio de 8.5%, respecto al diseño resultante con el Método Híbrido AG-PNL (Método 2) para 8 de las 9 redes de estudio. Sin embargo, como se ha comentado, son redes en 10.3% más costosas en promedio que las derivadas del Método 2. La aparente paradoja de que un mayor costo de una red a turnos optimizada en diámetros no lleve necesariamente aparejada una mayor flexibilidad, se explica en términos de que una asignación no óptima de turnos induce caudales y conducciones intermedias de mayor tamaño y, sin embargo, los extremos se encuentran ajustados al máximo para una cierta asignación de turnos, perdiendo flexibilidad.

- ✓ Al realizar el análisis de la conveniencia de la homogeneidad de los caudales circulantes en cada tramo para los diferentes turnos, se entiende que es un criterio de diseño heurístico usualmente adoptado como beneficioso para aprovechar en forma permanente la capacidad de transporte de las conducciones y reducir el costo del sistema. No obstante, en teoría pueden darse casos en que dicha uniformidad no conduzca necesariamente a diseños más económicos, como por ejemplo sucedería en redes con ramales que se bifurcan en un punto y discurren por zonas de muy diferente cota. En dos casos de los analizados, Cenicero y Callén Superior, los turnos optimizados han conducido a caudales de cabecera significativamente distintos en algún turno. Sin embargo, estos resultados no son concluyentes, dejando la discusión abierta.

Como principal conclusión obtenida de esta comparación, cabe señalar que se ha demostrado la importancia de una óptima selección de los turnos para reducir los costos del proyecto de una red de riego. Esta adecuada selección de los turnos

tiene incluso más importancia que el método de diseño empleado para el dimensionamiento.

Además, durante el proceso de normalización de diámetros, se ha comprobado que los ramales extremos son más sensibles a la normalización que los conductos principales.

Los resultados del Algoritmo Híbrido AG-PNL, han sido comparados en términos de costo de los diseños producidos y en cuanto al *IFCT*.

#### **8.2.4. Sistemas a Turnos vs Sistemas a la Demanda.**

Con el objeto de comparar en términos de costo y flexibilidad, los diseños a turnos más económicos encontrados con el Algoritmo Híbrido AG-PNL (Método 2) o mediante el MSE-M con los mismos turnos (Método 3) con diseños operando a la demanda, se efectuó para cada Caso de Estudio un diseño a la demanda mediante el MSE-M (Método 5) en condiciones análogas de Jornada de Riego, y con Garantías de Suministro que minimizan el costo del diseño a la demanda. Se citan a continuación las principales deducciones de esta comparación.

- ✓ Generalmente se interpreta que las redes funcionando a turnos son más económicas que las redes a demanda, dando por supuesto que los caudales de diseño a la demanda en las conducciones principales con cualquier nivel de Garantía de Suministro habitual (entre el 90 y el 98%), se corresponden con picos extremos de superposición de consumos sincronizados que superan los estrictos caudales acumulados del turno. Esto se ha comprobado que sucede en el 78% de los Casos de Estudio. Sin embargo, en el 22% restante de redes estudiadas, los caudales de diseño a la demanda en las conducciones de cabecera resultaron ser menores que los encontrados en el diseño a turnos, con turnos optimizados o heurísticos.

Este comportamiento, que ya había sido descrito en la literatura, se ha confirmado que acontece cuando los tiempos de apertura de los hidrantes son muy distintos y en un mismo turno se combinan varios hidrantes de tiempo riego corto con hidrantes de mayor tiempo. En la operación a turnos se asume que todos los hidrantes del turno comienzan a regar en el instante del comienzo de turno, solapándose el caudal demandado por todos ellos. Sin embargo, los caudales de diseño a la demanda (Clément) contemplan estadísticamente la posibilidad de que varios de estos hidrantes de corto tiempo de riego abran secuencialmente. Es decir, uno después de otro,

resultando un menor caudal de diseño. Será importante entonces, redefinir el número de turnos, la duración de los mismos y/o modificar las dotaciones para homogeneizar los tiempos de apertura de los hidrantes.

- ✓ Dado que una red diseñada a la demanda puede ser operada a turnos con la condición de que el caudal del turno no exceda el de diseño a la demanda y que los turnos se repartan en forma distribuida entre dos ramales. En este caso, cuando se calcula el *IFCT*, se comprueba que este tipo de diseño es próximo a la unidad para todas las redes seleccionadas. Además, este valor de flexibilidad es el más alto de todas las alternativas, incluso teniendo en cuenta que en este estudio se adoptaron valores de Garantía de Suministro bajos en cabecera, del 90% a partir de cincuenta hidrantes (que es el umbral inferior de una red a la demanda).
- ✓ En lo que se refiere al aspecto económico, se observa una elevada variabilidad de las diferencias de costos entre diseños a la demanda y a turnos en cada Caso de Estudio, con unos ahorros en el diseño a turnos respecto a la demanda situados entre el 4.5% y el 48%. Estas variaciones están en línea con lo observado en otras investigaciones centradas en establecer comparativas entre diseños a la demanda y a turnos. El que en esta investigación se hayan encontrado ahorros generalmente mayores que en trabajos previos en donde los turnos se asignaban heurísticamente, se interpreta que es debido al hecho de haber optimizado la asignación de turnos.
- ✓ Como resultado colateral, se ha formulado una posible aplicación adicional del indicador de flexibilidad (*IFCT*) como criterio de ayuda a la decisión, sobre la conveniencia de selección de un diseño a turnos o la demanda. Esta aplicación se logró correlacionando la variación relativa de la flexibilidad con la variación relativa del costo de todas las RCRP, al pasar de un diseño a turnos a un diseño a la demanda. Así, en los sistemas cuyo incremento relativo de costos al ser diseñados a la demanda en lugar de a turnos, sea mucho menor que el incremento de la flexibilidad logrado, será mejor que operen con la modalidad a la demanda. Este criterio puede ser aplicado independientemente del algoritmo de optimización utilizado en el diseño. Se

considera que este criterio es de tipo orientativo y complementario de otros criterios para establecer si un nuevo diseño conviene concebirlo para ser operado a la demanda o a turnos. La limitación los recursos presupuestarios puede ser en ocasiones un factor más limitante que el propio indicador en la toma de decisiones.

### **8.3. Trabajos Futuros**

Además de las conclusiones y aportaciones señaladas en párrafos anteriores, han quedado algunas líneas de investigación abiertas para contribuciones futuras. Estas líneas se pueden agrupar en dos grandes grupos: aquellas relacionadas con el dimensionamiento de la red y las ligadas a los aspectos de flexibilidad y fiabilidad.

#### ***8.3.1. Desarrollos relacionados con el diseño de la red***

Esta Tesis se ha realizado tomando como hipótesis que las redes se alimentan por gravedad. Además, los métodos de dimensionamiento no formaban parte de los objetivos de la misma, empleándose métodos suficientemente conocidos. Esto deja la puerta abierta a nuevos desarrollos:

- ✓ El diseño se ha basado en gamas de diámetros correspondientes a una sola presión nominal. Por tanto, queda abierta la posibilidad de ampliar el alcance del Algoritmo Híbrido para considerar la instalación de tuberías de diferentes Presiones Nominales.
- ✓ Extender el alcance del Algoritmo Híbrido para contemplar sistemas de bombeo en cabecera, incorporando la posibilidad de integrar los costos energéticos en el proceso de optimización del diseño.
- ✓ Investigar la posibilidad de utilizar un método simplificado y de rápida ejecución en la evaluación de la función objetivo (costo de la red asociada a un individuo del espacio de turnos) dentro del AG, que evalúe esta función de costos, reservando el procedimiento de dimensionado óptimo mediante PNL o PL para la etapa final, una vez optimizados los turnos.
- ✓ Integrar en el Algoritmo Híbrido la optimización del diseño en términos de diámetros discretos, bien sea mediante la sustitución de la etapa de

dimensionado por una técnica de PL, o mediante la incorporación de procesos de normalización optimizados automáticos.

- ✓ Reducir la complejidad del problema en tal caso mediante un pre-diseño que reduzca el número de diámetros candidatos para cada tramo.
- ✓ Investigar y sistematizar técnicas adecuadas de ligero sobredimensionado de ramales finales para aumentar la flexibilidad de las redes a turnos, limitando su sobre costo.
- ✓ Analizar la relación que existe entre la distribución de los caudales en las ramificaciones, la altura piezométrica necesaria y el costo del diseño.

### ***8.3.2. Desde el punto de vista de la flexibilidad / fiabilidad:***

Una de las principales aportaciones de esta Tesis es la inclusión de la flexibilidad en el proceso de diseño de la red, dando la oportunidad a los gestores de disponer de una herramienta que facilite la toma de decisiones. En este sentido, solo se ha dado un primer paso que sin duda deberá dar lugar a un estudio más detallado en diversos aspectos:

- ✓ Integrar la flexibilidad como criterio de diseño dentro del algoritmo híbrido, ponderándola dentro del cómputo de la función objetivo que evalúa la aptitud de la población del AG. Esto puede provocar objetivos contrapuestos, lo que abre la puerta a la utilización de algoritmos multiobjetivo.
- ✓ Se ha utilizado una única definición de la flexibilidad. Sin embargo, existen diferentes definiciones y formulaciones de la misma. Así, quedan por estudiar las repercusiones que los distintos diseños y las distintas asignaciones de turnos pudieran tener en conceptos como la fiabilidad, la robustez, la flexibilidad o la resiliencia.

# Capítulo 9 :

# Bibliografía

- Afshar, M. H., Akbari, M., Mariño, M.A. & Hon, M. (2005). Simultaneous layout and size Optimization of Water Distribution Networks: Engineering Approach. ASCE. JIS. 11(4). 221-230.
- Afshar, A., Masoumi, F. & Sandoval, S. (2015). Reliability Based Optimum Reservoir Design by Hybrid ACO-LP Algorithm. Water Resour Manage. 29. 2045-2058. doi: 10.1007/s11269-015-0927-9
- Alduán, A. y Monserrat, J. (2009). Estudio comparativo entre la organización a la demanda o por turnos en redes de riego a presión. Ingeniería del agua, 16(3), 235-244. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/2951/2954>
- Alexandratos, N. and Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper No. 12-03. Rome, FAO.
- Aliod, R. y Corominas, J. (2017). Módulo 4: El agua en la agricultura. Máster en Gestión Sostenible del Agua. Universidad de Zaragoza. España.

- Alperovits, E., Shamir, U. (1977). Design of Optimal Water Distribution Systems. *Water Resources Research*. 13(6). 885-900.
- Ángeles, M.V. (2000). Diseño agronómico de sistemas de riego presurizado (aspersión, microaspersión y goteo). Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco. México.
- Apollin, F. y Eberhart, C. (1998). Sistema de capacitación para el manejo de los recursos naturales Renovables. Riego Andino. CESA. Metodologías y análisis del diagnóstico de sistemas de riego campesino. CAMAREN. Quito-Ecuador  
Recuperado de: [http://www.asocam.org/biblioteca/R0107\\_completo.pdf](http://www.asocam.org/biblioteca/R0107_completo.pdf)
- Arviza, J. (2007). Rg y Epanet. Un manual para sacar partida a ambas aplicaciones. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de: <http://www.etsmre.upv.es/dira/Imagenes/files/Dimensionado%20con%20Rg%20y%20Epanet.pdf>
- Babayan, A., Kapelan, Z., Savic, D. & Walters, G. (2005). Least cost design of water distribution networks under demand uncertainty. *J Water Res Pl-ASCE*. 131(5). 375-282.
- Baños, R. (2006). Meta-heurísticas Híbridas para optimización. Mono-objetivo y Multi-objetivo. Paralelización y Aplicaciones. (Tesis de Doctorado). Universidad de Almería.
- Bao, Y. & Mays, L.W. (1990). Model for water distribution system reliability. *J Hydraul Eng. ASCE* 116(9): 1119-1137.
- Bargiela, A. & Hainsworth, G. (1989). Pressure and flow uncertainty in water system. *J Water Res Pl-ASCE*. 115(2). 212-229.
- Bhave, P.R. (1979). Selecting Pipe Sizes in Network Optimization by Linear Programming. *Journal of the Hydraulics Division (ASCE)*. 105(HY7). 1019-25
- Boulos, P.F., Wu, Z.Y. & Orr, C.H., Ro, J.J. (2000). Least Cost Design and Rehabilitation of Water Distribution Systems Using Genetic Algorithms. *Proceedings of the AWWA IMTech. Conference*. April 16-19. Seattle. WA.
- Boulos, P. F., Wu, Z., Orr, C. H., Moore, M., Hsiung, P. y Thomas, D. (2001). Optimal pump operation of water distribution systems using genetic algorithms. In *Distribution System Symposium*. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Optimal-Pump-Operation-of->



- Water-Distribution-Using-Boulos-  
Wu/30bd0b8898b9c7eede6581df60fe8aaf2964d0f7
- Calhoun, C. A. (1970). Optimization of Pipe Systems by Linear Programming. Proc. on Control Flow in Closed Conduits. Ed. J. P. Tullis. Colorado State Univ. Fort Collins CO (EEUU). 175-192.
- Castillo, E., Conejo, A., Pedregal, P., García, R. y Alguacil, N. (2002). Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia. Universidad de Castilla-La Mancha. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. España.
- Cavazzuti, M. (2013). Deterministic optimization in Optimization Methods. Berlin. Germany. Springer. 77–102.
- Cieniawski, S. E., Eheart, J.W., and Ranjithan, S. (1995). Using genetic algorithms to solve a multiobjective groundwater monitoring problem. *Water Resour. Res.*, 31(2), 399-409.
- Cisty, M. & Bajtek, Z. (2009). Hybrid Method for least-cost design of the Water Distribution Systems. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 57 (2). 130-141.
- Clark, R.M., Stafford, C.L. & Goodrich, J.A. (1982). Water distribution systems: A spatial and cost evaluation. *Journal Water Resources Planning and Management Division* 108(3). 243-56.
- Clément, R. (1966). Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant à la demande. *La Houille Blanche*, (5), 553-576, DOI:10.1051/lhb/1966034.
- Cohen, G. (1982). Chapter 8: Optimal Control of Water Supply Networks. Tzafestas. S.G. (ed.). *Optimization and Control of Dynamic Operational Research Models*. 4. North-Holland Publishing. Amsterdam. 251-276.
- Cortés-Martínez, F., Treviño-Cansino, A., Alcorta-García, M. A., Sáenz-López, A. y González-Barrios, J. L. (2015). Optimización en el diseño de lagunas de estabilización con programación no lineal. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(2), 85-100. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n2/v6n2a6.pdf>
- Cross, H. (1936). Analysis of flow in networks of conduits or conductors. *University of Illinois Bulletin* No. 286. November.

- Cullinane, M. J., Lansey, K.E. & Mays, L.W. (1992). Optimization-availability based Design of Water Distribution Networks. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118(3). 420-441.
- Daccache, A., Lamaddalena, N. & Fratino, U. (2010). On-demand pressurized water distribution system impacts on sprinkler network design and performance. *Journal of Irrigation Science*. 28. 331-339.
- Dandy, G. C., Simpson, A.R. y Murphy, L. J. (1996). An Improved Genetic Algorithm for Pipe Network Optimization. *Water Resource Research*. 32, N° 2, 449-448.
- Davies, J.P., Clarke, B.A. Whiter, J.T. & Cunningham, R.J. (2001). Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes. *Urban Water* 3. 73-89.
- Díaz, A., Glover, F., Ghaziri, H.M., Gonzalez, J.L., Laguna, M., Moscato, P. y Tseng, F.T. (1996). *Optimización Heurística y Redes Neuronales*, Paraninfo, Madrid.
- Eiger, G., Shamir, U. & Ben-Tal, A. (1994). Optimal design of water distribution systems. *Water Resource Research*. 30(9). 2637-2646.
- Espinosa, E., Flores, M., Hernández, R.A. y Carrillo, F. (2016). Análisis técnico y económico del diseño de un sistema de riego a hidrante parcelario utilizando el método por Turnos y la técnica de Clement. *Terra Latinoamericana*, 34(4), 431-440. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n4/2395-8030-tl-34-04-00431.pdf>
- Faci, E., García, S., Aliod, R., Paño, J., Seral, P. y García, A. (Octubre, 2015). Algoritmos y Herramientas para la Aplicación de Estrategias de Reducción de Costes Energéticos en Sistemas de Riego a Presión. J. Roldán Cañas (Presidencia), La precipitación y los procesos erosivos. Simposio llevado a cabo en las IV Jornadas de Ingeniería del Agua, Córdoba, España. Recuperado de <http://www.uco.es/jia2015/ponencias/b/b022.pdf>
- Farmani, R., Abadia, R. y Savic, D. (2007). Optimum Design and Management of Pressurized Branched Irrigation Networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(6), 528–537, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:6(528)
- Food and Agriculture organization of the United Nations. FAO (2007). *Handbook on Pressurized irrigation techniques*. 2da. edition. Roma.

- Food and Agriculture organization of the United Nations. FAO. (2012). Sistema de Información sobre el Uso del Agua en la Agricultura y el Medio Rural de la FAO.
- Frontline Systems Inc. (2011). Frontline Solvers User Guide For Use With Excel 2003-2010 (Versión 11.5). Recuperado de [https://www.solver.com/files/\\_document/FrontlineSolvers\\_UserGuideV11.pdf](https://www.solver.com/files/_document/FrontlineSolvers_UserGuideV11.pdf)
- Fuertes, V.S., García-Serra, J., Iglesias, P.L., López, G., Martínez, F.J. y Pérez, R. (2002). Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua. Grupo Mecánica de Fluidos. Dep. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. España.
- Fujiwara, O. & Li, J. (1998). Reliability Analysis of Water Distribution Networks in Consideration of Equity. Redistribution. and Pressure-dependent Demand. *Water Resources Research*. 34(7). 1843-1850.
- Galante, M. (1993) Un Algoritmo Genético Simple para la Optimización de Estructuras Planas Articuladas. *Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 9(2). 179-199.
- García, S., Ruiz, R., Aliod, R., Paño, J., Seral, P., y Faci, E. (Junio, 2011). Nueva herramienta implementadas en GESTAR 2010 para el Dimensionado de Tuberías Principales en Redes de Distribucion en Parcela y Redes de Distribución General a Turnos. J. Berbel Vecino (Presidencia), Hacia un regadío eficiente y rentable. Simposio llevado a cabo en el XXIX Congreso Nacional de Riegos. Córdoba, España. Recuperado de <http://www.aeryd.es/escaparate/gmms/aeryd/buscadortrabajos?accion=ver&id=7355>
- García, S. (2013). Desarrollo e Implementación de Estrategias y Herramientas en GESTAR2014 para el Dimensionado de Redes de Riego Presurizadas con Funcionamiento a Turnos. Tesis de Máster. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Diciembre.
- Gargano, R. & Pianese, D. (2000). Reliability as Tool for Hydraulic Network Planning. *Journal of hydraulic Engineering*. 126(5). 354-364.
- Gheisi, A. & Naser, G. (2014). Water distribution systems reliability under simultaneous multicomponent failure scenario. *J. Am. Water Work Assoc.* 106 (7). E319-E327.

- Golberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison Wesley Publishing Company, Inc.
- Gomes, H. P. (1994). *Engenharia de irrigacao: sistemas pressurizados, aspersao e gotejamento*. Ed. Universitaria/UFPB. Joao Pessoa (Brasil)
- González, C. y Aliod, R. (Mayo, 2003). Mejoras en el método de la serie económica para el dimensionado de redes ramificadas. A. Vélez Sánchez (Presidencia), Ingeniería del riego. Simposio llevado a cabo en el XXI Congreso Nacional de Riegos, Mérida, España. Recuperado de <http://www.aeryd.es/escaparate/gmms/aeryd/buscadortrabajos?accion=ver&id=6715>
- González, C. (2006). *Diseño Hidráulico Avanzado de Sistemas de Riego Presurizado mediante Técnicas de Simulación y Optimización*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. Huesca. Mayo.
- González Bastos, A., Fandiño Beiro, M., Gómez Pérez, A., Souto Jorge, FJ., Cuesta García, TS., Neira Seijo, XX., Cancela Barrio JJ. (Septiembre, 2007). Estudio de Caso: Diseño de Redes de Riego a presión Terra Chá (Galicia). XI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos Lugo. Recuperado de [https://www.aepro.com/files/congresos/2007lugo/ciip07\\_0160\\_0169.375.pdf](https://www.aepro.com/files/congresos/2007lugo/ciip07_0160_0169.375.pdf)
- Goulter, I. & Bouchart, F. (1990). Reliability-constrained pipe network model. *J Hydraul Eng. ASCE* 116(2). 211-229.
- Goulter, I. (1993). Modern concepts of a water distribution system. Policies for improvement of networks with shortcomings. In: Cabrera. E. Martínez F. (eds) *Water supply systems: state of the art and future trends*. Valencia (Spain). *Comput Mech Publ. Southampton*. 121-138.
- Goulter, I. (1995). Analytical and simulation models for reliability analysis for water distribution systems. In: Cabrera E. Vela AF (eds) *Improving efficiency and reliability in water distribution systems*. Kluwer. London. 235-266.
- Granados, A. (1986). *Infraestructura de regadíos: redes colectivas de riego a presión*. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid (España)
- Gupta, R. & Bhave, P.R. (1994). Reliability Analysis of Water Distribution Systems. *Journal of Environmental Engineering*. 120(2). 447-460.

- Gupta, R. & Bhawe, P.R. (1996). Reliability-based Design of Water Distribution Systems. *Journal of Environmental Engineering*. 122(1). 51-54
- Haghighi, A., Samani, H.M. & Samani, Z.M. (2011). GA-ILP Method for Optimization of Water Distribution Networks. *Water Resources Management*. 25(7). 1791-1808
- Hashimoto, T. (1980). Robustness, reliability. Resiliency and vulnerability criteria for planning water resources system. Dissertation. Cornell University
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R. & Loucks, D.P. (1982). Reliability Resiliency and Vulnerability Criteria for Water Resources System Performance Evaluation. *Water Resour Res* 18(1). 14-20
- Hassanli, A. M. & Dandy, G.C. (1996). Application of Genetic Algorithms to the Optimum Design and Layout of Drip Irrigation Systems. Research Report n° R. 134.
- Hassanli, A.M. & Dandy, G.C. (2005). Optimal layout and hydraulic design of branched networks using genetic algorithms. *Appl. Eng. Agric.* 21(1). 55-62.
- Hillier, F.S. & Lieberman, G.J.G. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. McGraw-Hill. México.
- Holzapfel, E.A.X., Pardo, V. P., Pardo, A. Rodríguez, X. & López, M.A. (2007). Análisis técnico-económico para selección de aspersores. *Rev. Brasil. Eng. Agríc. Amb.* 11. 557-563.
- Holzapfel, E.A., Pannunzio, A., Lorite, I., Silva de Oliveira, A. S., Farkas, I. (2009) Design and management of irrigation systems, *Chilean JAR*. 69 (2009).17-25.
- Holland, John H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press. Ann Arbor. Michigan.
- Holland, J. H. (1992). Genetic Algorithms. *Scientific American*, 267(1), 66-72, DOI:10.1038/scientificamerican0792-66
- Iglesias, P., Martínez Solano, F., Fuertes, M. y Pérez, R. (Noviembre, 2004). Algoritmo genético modificado para diseño de redes de abastecimiento de agua. Simposio llevado a cabo en el IV Seminario Hispano Brasileño sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua Brasil. Recuperado de

- s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/33095797/algoritmo\_gen  
etico\_co.pdf?response-content-disposition
- INEC, ESPAC. (2018). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua. Recuperdo de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>
- Jain, S.K. & Bhunya, P.K. (2008). Reliability Resilience and Vulnerability of a Multipurpose Storage Reservoir/ Confiance. Résilience et Vulnérabilité d'un Barrage Multi-objectifs. Hydrological Sciences Journal. 53(2). 434-447. doi: 10.1623/hysj.53.2.434
- Jiménez, M. y Martínez, F. (2008). Integración de los procesos agronómicos e hidráulicos del riego a presión en un entono SIG para la gestión eficiente de Comunidades de regantes. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia. Mayo 2008.
- Jiménez, M. A., Martínez, F., Bou, V. y Bartolí, H. J. (2010). Methodology for grouping intakes of pressurised irrigation networks into sectors to minimise energy consumption. Biosystems Engineering, 105(4), 429-438, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.12.014
- Jowitt, P. & Xu, C. (1993). Predicting pipe failure effects in water distribution networks. J Water Resour Plan Manage ASCE. 119(1).18-31
- Kale, R. V., Singh, R. P. y Mahar, P. S. (2008). Optimal Design of Pressurized Irrigation Subunit. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 134(2), 137–146, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:2(137)
- Kalungi, P. & Tanyimboh, T.T. (2003). Redundancy model for water distribution systems. Rel Eng Syst Safety. 82(3). 275-286.
- Karmeli, D., Gadish, Y. & Meyers, S. (1968). Design of Optimal Water Distribution Nterworks. Journal of the Pipeline Division ASCE. 94. PL1. 1-10.
- Khadra, R. & Lamaddalena, N. (2010). Development of a decision support system for irrigation systems analysis. Water Resour Manag. 24(12). 3279–3297. doi:10.1007/s11269-010-9606-z
- Kulkarni, M.S. & Patil, K.A. (2011). Optimization of pipe Distribution Network for Irrigation by Genetic Algorithm. International Journal of Earth Science and Engineering. 4(6). 231-234.

- Kuo, S. F., Liu, C.W. & Chen, S.K. (2003). Comparative study of optimization techniques for irrigation project planning. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 39(1). 59-73.
- Labye, Y. (1966). Etude Des Procédés de calcul ayant pour but de rendre minimal le coût d'un Réseau de distribution d'eau sous pression. *La Houille Blanche*, (5), 577-583, DOI: 10.1051/lhb/1966035
- Lamaddalena, N. & Sagardoy, J.A. (2000). Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. FAO. Rome. FAO Irrigation and Drainage. Paper n. 59.
- Lamaddalena, N., Pereira, L.S. (2007a). Assessing the impact of flow regulators with a pressure-driven performance analysis model. *Agr Water Manag.* 90(1). 28-35.
- Lamaddalena, N., Khadra, R. y Tlili, Y. (2012). Reliability-Based Pipe Size Computation of On-Demand Irrigation Systems. *Water Resources Management*, 26(2), 307-328. DOI: 10.1007/s11269-011-9919-6
- Lansey, K.E. & Mays, L.W. (1989). Optimization Model for Water Distribution System Design. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*. 115. 10. 1401-1418. (C4)
- Lapo, C. M. (2012). Diseño Óptimo de Sistemas de Riego a Presión y su Eficiencia Hidro-Energética. Aplicación en el Caso de Loja (Ecuador). Tesis de Máster. Universidad Politécnica de Valencia. Septiembre.
- Lapo Pauta, C. Mireya, Pérez García, R.; Aliod Sebastián, R. y Martínez-Solano, F. J. (2020). Diseño óptimo de redes de riego a turnos y caracterización de su flexibilidad. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(1) (aceptado para su publicación).
- Lara, B. (2007). Diseño de redes colectivas de riego: Estudio de la asignación óptima de caudales mediante algoritmos genéticos (Tesis de Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia (España).
- Lasdon, L. S., Fox, R. L. y Ratner, M. W. (1974). Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method. *Revue Française d'Automatique, Informatique, Recherche Opérationnelle*, 3, 73-103. Recuperado de [http://www.numdam.org/item?id=RO\\_1974\\_\\_8\\_3\\_73\\_0](http://www.numdam.org/item?id=RO_1974__8_3_73_0)
- Liong, S., Chan, W., and ShreeRam, J. (1995). Peak-Flow Forecasting with Genetic Algorithm and SWMM. *Journal of Hydraulic Engineering*. 121 (8). 613-617

- Magaña Sosa, G., De León Mojarro, B., Fuentes Ruíz, C. y Rendón Pimentel, L. (1998). Flexibilidad del riego para distribución interparcelaria con tubería de baja presión. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XIII. 3. 35-43.
- Martínez, F., Sanz, F., García-Serra, J. y Cerrillo, J.L. (1987). Dimensionado Óptimo de Redes Ramificadas de Distribución de Agua por Programación Lineal. *Tecnología del Agua*. 40. 73-90.
- Martínez-Rodríguez, J., Montalvo, I., Izquierdo, J. y Pérez-García, R. (2011). Reliability and Tolerance Comparison in Water Supply Networks. *Water Resour Manage* 25. 1437-1448.
- Matías, S. A. (2003). Diseño de Redes de Distribución de agua contemplando la fiabilidad. mediante algoritmos genéticos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Noviembre.
- Mays, L.W. (1996). Review on reliability analysis of water distribution systems. In: Tickle et al (eds) *Stochastic hydraulics*. Balkema. Rotterdam. 53-62
- Montserrat, J. (2009). Allocation of flow to plots in pressurized irrigation distribution networks: Analysis of the Clement and Galand method and a new proposal. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(1), 1-6.
- Montserrat, J., Alduán, A., Cots, L. y Barragán, J. (Septiembre, 2012). ¿Turnos o Demanda? En *El Proyecto de Redes de Distribución de Riego a Presión*. XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. San José, Costa Rica. Recuperado de <https://repositori.udl.cat/bitstream/handle/10459.1/45935/Comparaci%F3n?sequence=1>
- Mora, D. (2012). Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10251/16803>
- Mora, D., Iglesias, P. L., Martínez, F. J. y Fuertes Miquel, V. S. (2013). Design of Water Distribution Networks using a Pseudo-Genetic Algorithm and Sensitivity of Genetic Operators. *Water Resources Management*, 27(12), 4149-4162, DOI: 10.1007/s11269-013-0400-6



- Moradi-Jalal, M., Rodin, S., y Marino, M. (2004). Use of Genetic Algorithm in Optimization of Irrigation Pumping Stations. *J. Irrigation and Drainage. Engng. ASCE*. 130(6). 357-365.
- Moradi-Jalal, M. y Karney, B. W. (2008). Optimal design and operation of irrigation pumping stations using mathematical programming and Genetic Algorithm (GA). *Journal of Hydraulic Research*, 46(2), 237-246, DOI:10.1080/00221686.2008.9521858
- Moreno, M.A., Corcoles, J. I. & Tarjuelo, J. M. (2010). Energy efficiency of pressurised irrigatinetworks managed on-demand and under a rotation schedule. *Biosystems Engineering*. 107. Issue: 4. 349-363.
- Munizaga, E. (1976). *Redes de Agua Potable. Diseño y Dimensionamiento*. Monografía No 335. Instituto Eduardo Torroja. Madrid.
- Ormsbee, L.E., Walski, T.M., Chase, D.V. & Sharp, W.W. (1989). Methodology for Improving Pump Operation Efficiency. *J. Water Resource Planning and Management. ASCE* 115(2). 148-164
- Orth, H.M. (1986). *Model-based Design of Water Distribution and Sewage Systems*. Ed. John Wiley & Sons. Chichester (Reino Unido). (C4. C7)
- Palisade Corporation. (2010). *Guía para el uso de Evolver. Solver de algoritmo genético para Microsoft Excel (Versión 5.7)*. Recuperado de [http://www.palisade.com/downloads/manuals/ES/Evolver5\\_es.pdf](http://www.palisade.com/downloads/manuals/ES/Evolver5_es.pdf)
- Pérez, R. (1993). *Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación*. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Pérez, R., Martínez, F. y Vela, A. (1993). Improved Design of Branched Networks bely Using Pressure-Reducing Valves. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(2), 164–180, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(164)
- Pérez, R., Lara, B., Montalvo, I., Izquierdo, J. y López, G. (2008). Programación óptima de turnos. Aplicación al diseño de redes de riego. AIHR XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Cartagena de Indias Colombia. septiembre 2008.
- Planells, P., Tarjuelo, J.M. & Ortega, J. F. (2001). Optimización de Estaciones de bombeo en riego a la Demanda. *Ingeniería del Agua*. 8(1). 39-51.

- Planells, P., Ortega, J. F. & Tarjuelo, J.M. (2007). Optimization of irrigation water distribution networks. layout included. *Agricultural water Management*. 88. 110-118.
- Pleban, S. y Amir, I. (1981). An Interactive Computerized Aid for the Design of Branching Irrigation Networks. *Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Eng.)*. 24. 2. 358-361.
- Prasad, T.D. y Park, N.S. (2004). Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks. *J Water Resour Plan Manag*. 130(1). 73-82.
- Quindry, G.E., Brill, E.D. & Liebman, J.C. (1981). Optimization of Looped Water Distribution Network Design. Report 16. Dep. Of Civil Eng. MIT.
- Ramos, A., Sánchez, P., Ferrer, J.M., Barquín, J. y Linares, P. (2010). Modelos matemáticos de optimización. Universidad Pontificia de Comillas. Madrid.
- Reca, J., Cardeña, J., Martínez López, Roldán Cañas, J. y Callejón Baena, J. L. (2002). Análisis de la fiabilidad de una red de riego en función de la simultaneidad de la demanda, *Ing. del agua*, vol. 9, no. 2, p. 157, Junio. 2002.
- Reca, J., Martínez, J., Baños, R. and Gil, C. (2006). Optimal Design of Gravity-Fed Looped Water Distribution Networks Considering The Resilience Index, *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 134, no. 3, p. 157, May. 2008.
- Reis, L. F. R., Porto, R. M. y Chaudhry, F. H. (1997). Optimal Location of Control Valves in Pipe Networks by Genetic Algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(6), 317-326, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1997)123:6(317)
- Robinson, R.B. & Austin, T. A. (1976). Cost Optimization of rural water systems. *Journal of the Hydraulics Division ASCE*. 102. HY8. 1119-34.
- Rodríguez-Díaz, J. A., López-Luque, R. & Carrillo-Cobo, M. T. (2009). Exploring energy saving scenarios for on-demand pressurised irrigation networks. *Biosystems Engineering*. 104. Issue: 4. 552-561.
- Rowell, W.F. & Barnes, W.J. (1972). Obtaining Layout of Water Distribution Systems. *Journal of the Hydraulic Engineering Division*. 108. 137-149.
- Ruiz, A. y Molina, J. (2010). *Automatización y Telecontrol de Sistemas de Riego*. Murcia: Marcombo S.A.

- Savic, D. A. & Waters, G. A. (1994). Genetic algorithms and evolution programs for decision support. In Proc. 4th Int. Symp.; Advances in Logistics Sci. And Software. J. Knezevic. Et. Exeter. U.K. 72-80.
- Savic, A. y Walters, A. (1997). Genetic Algorithms for Least-Cost Design of Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(2), 67-77, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1997)123:2(67)
- Segarpa, (s/f). Sistema de riego localizado (gotero y microaspersión). Subsecretaría de Desarrollo Rural. Universidad Técnica Especializada. México UTE COUSSA. 5. 10-30.
- Simpson, A. R., Dandy, G. C. y Murphy, L. J. (1994). Genetic Algorithms Compared to Other Techniques for Pipe Optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(4), 423-443, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(423)
- Stephenson, D. (1981). *Pipeline Design for Water Engineers*. (2da ed.). Elsevier. Amsterdam (Holanda). (2.3.39).
- Su, Y.C., Mays, L.W., Duan, N. & Lansey, K.E. (1987). Reliability-Based Optimization Model for Water Distribution Systems. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. 114. 12.
- Tabesh, M., Shirzad, A., Arefkhani, V. & Mani, A. (2014). A comparative study between the modified and available demand driven based models for head driven analysis of water distribution networks. *Urban Water J.* 11(3). 221-230.
- Tanyimboh, T. T. & Templeman, A. B. (1993c). Optimum design of flexible water distribution networks. *Civil Engineering Systems*. 10(3). 243-258.
- Tanyimboh, T. T. & Templeman, A. B. (1998). Calculating the reliability of single-source networks by the source head method. *Advances in Eng. Software*. 29(7-9). 499-505.
- Tanyimboh, T. T. & Templeman, A. B. (2000). A quantified assessment of the relationship between the reliability and entropy of water distribution systems. *Eng. Optim.* 33. 179-199.
- Theocharis, E., Tzimopoulos, D., Yannopoulos, I. y Sakellariou, M. (2006). Design of optimal irrigation networks. *Irrigation and Drainage*, 55, 21-32, DOI: 10.1002/ird.214

- Usman, M., Liedl, R. & Awan, U.K. (2015). Spatio-temporal estimation of consumptive water use for assessment of irrigation system performance and management of water resources in irrigated Indus Basin. Pakistan. *Journal of Hidrology*. 525. 26-41.
- Tun-Dzul, J. de la C., Ramírez-Jaramillo, G., Sánchez-Cohen, I., Lomas-Barrié, C. T. y J. Cano-González, A. (2011). Diagnóstico y evaluación de sistemas de riego en el distrito 048 Ticul. Yucatán. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 1. 5-18.
- Walters, G.A. & Smith, D.K. (1995). Evolutionary design algorithm for optimal layout of tree networks. *Eng. Optimiz.* 24. 261-281.
- Wang, Q.J. (1991). The Genetic Algorithm and its Application to Calibrating Conceptual Rainfall-runoff Models. *Water Resource Research*, 27, n° 9, 2467-2471
- Wang, Y. (2006). Tesis: Deterioration and Condition Rating Analysis Of Water Mains. Quebec. Canada.
- Wang, X. & Xu, W. (2010). Hydraulic Design of Micro-irrigation Subunit Based on Genetic Algorithm. 8th International Conference on Nanochannels. Microchannels. and Minichannels. Montreal. Canadá.
- Wagner, J.M., Shamir, U., Marks, D.H. (1988a). Water distribution reliability: analytical methods. *J Water Resource. PLASCE*. 114(3). 253-275.
- Wagner, J.M., Shamir, U., Marks, D.H. (1988b). Water distribution reliability: simulation methods. *J Water Res PLASCE*. 114(3):276-292.
- Wood, D. J. & Funk, J.E. (1993). Hydraulic analysis of water distribution systems in Water supply systems. state of the art and future trends. E. Cabrera and F. Martinez. eds. *Computational Mechanics Publications*. Southampton. 41-85.
- Xu, C. & Goulter, I.C. (1996). Uncertainty analysis of water distribution networks. In: Tickle A et al (eds). *Stochastic hydraulics '96*. Balkema. Rotterdam. 609-616.
- Xu, C. & Goulter, I.C. (1997). Reliability assessment of water distribution networks using the first – order reliability – method. In: English M and Szollosi – Nagy A (eds) *Managing Water: Coping with scarcity and abundance*. ASCE. 429-434.

- Xu, C. & Goulter, Y.C. (1998). Probabilistic Model for Water Distribution Reliability. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 124(4). 218-228.
- Xu, C. & Goulter, Y.C. (1999). Reliability-Based optimal Design of Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 125(6). 352-362.
- Zapata, N., Playán, E., Martínez-Cob, A., Sánchez, I, Faci, J.M., Lecina, S. (2007) From on-farm solid-set sprinkler irrigation design to collective irrigation network design in windy areas, *Agr. Water Manage.* 87(2007) 187-199.
- Zessler, U. & Shamir, U. (1989). Optimal Operation of Water Distribution Systems. *J. Water Resource Planning and Management*. ASCE. 115(6). 735-752.
- Zhao, W., Beach, TH. & Rezgui, Y. (2016). Optimization of Potable Water Distribution and Wastewater Collection Networks a Systematic Review and Future Research Directions. *IEEE Transactions on systems. man. and cybernetics: Systems*. 46(5). 659-681.



# Capítulo 10 : Indicadores de Calidad

- Lapo Pauta, C. M., & Pérez García, R. (2013). Diseño óptimo de sistemas de riego a presión Aplicación en casos (Ecuador). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA)*, 4(1), 49-64.
- Lapo Pauta, M.; Aliod Sebastián, R.; Pérez García, R. & Izquierdo Sebastián, J. (2014). DISEÑO ÓPTIMO DE SISTEMAS DE RIEGO A PRESIÓN COMPARACIÓN CON SOFTWARE DE APLICACIÓN. *XIII SIMPÓSIO IBEROAMERICANO DE REDES DE ÁGUA, ESGOTO E DRENAGEM*. Fortaleza (Brasil)
- Lapo Pauta, M.; Pérez García, R.; Aliod Sebastián, R.; & Izquierdo Sebastián, J. (2015). Fiabilidad de sistemas de riego a presión. *XIV SEMINARIO IBEROAMERICANO DE ABASTECIMIENTO DE AGUA*. Guanajuato (México)
- Lapo, C. M., Pérez-García, R., Izquierdo, J., & Ayala-Cabrera, D. (2017). Hybrid optimization proposal for the design of collective on-rotation operating irrigation networks. *Procedia Engineering*, 186, 530-536.

- Lapo Pauta, C. Mireya, Martínez-Solano, F. J., Aliod Sebastián, R. & Fries, A. (2017). Aproximación PNL-AG para diseño de redes de riego a presión (PNL-AG Approach for the Design of Pressured Irrigation Networks). In *Ibero-American Seminar on Water and Drainage Networks (SEREA 2017)*, Bogotá (Colombia)
- Lapo Pauta, C. Mireya, Pérez García, R.; Aliod Sebastián, R. y Martínez-Solano, F. J. (2020). Diseño óptimo de redes de riego a turnos y caracterización de su flexibilidad. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(1) (aceptado para su publicación).



# **ANEXOS**

## **A) Ejemplo de implementación Callén Inferior**

### **Características topológicas de la red**

**Tabla A.1.** Variables de entrada topología. Caso RCRP “Callén Inferior”

<b>ID Nudo</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>ID Nudo</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>ID Nudo</b>	<b>Cota (m)</b>
H1	368.23	H32	345.84	811	363.31
H2	363.00	H33	345.19	812	362.00
H3	363.00	H34	345.19	813	359.00
H4	363.94	H35	345.20	814	358.00
H5	364.28	H36	342.46	815	358.00
H6	354.72	H37	341.94	816	348.00
H7	353.97	H38	337.34	817	346.00
H8	354.25	H39	336.77	818	350.00
H9	364.89	H40	353.07	819	350.00
H10	362.90	H41	353.04	820	365.00
H11	355.45	H42	354.44	821	348.00
H12	347.50	H43	354.43	822	350.00
H13	348.92	H44	357.23	823	357.59
H14	348.44	H45	354.61	824	350.92
H15	347.05	H46	353.87	825	352.00
H16	348.72	H47	347.63	826	346.04
H17	349.44	H48	347.60	827	345.00
H18	363.15	H49	349.82	828	345.00
H19	365.25	H50	349.17	829	345.00
H20	367.00	H51	349.01	830	345.00
H21	348.13	800	388.50	831	345.00
H22	349.54	801	390.00	832	342.00
H23	353.20	802	368.00	833	346.41
H24	353.60	803	368.00	834	352.00
H25	355.03	804	367.74	835	353.00
H26	359.28	805	365.24	836	357.00
H27	365.22	806	363.45	837	357.00
H28	356.12	807	361.00	838	347.00
H29	351.00	808	363.00	839	350.00
H30	349.00	809	356.20	840	349.77
H31	344.42	810	355.00	811	363.31

**Tabla A.2. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Callén Inferior”**

Nin-Nfin	ID Linea	Longitud (m)	Nin-Nfin	ID Linea	Longitud (m)	Nin-Nfin	ID Linea	Longitud (m)
0-800	T1	3.00	H14-817	T32	245.00	829-H33	T63	84.07
800-801	T2	213.88	817-H15	T33	50.00	H33-H34	T64	2.00
801-802	T3	1518.50	816-818	T34	37.53	829-830	T65	128.61
802-H1	T4	78.00	818-H16	T35	24.41	830-831	T66	40.74
802-803	T5	82.51	818-H17	T36	152.68	831-H35	T67	79.16
803-804	T6	31.54	H17-819	T37	232.57	H35-832	T68	512.28
804-805	T7	68.13	819-820	T38	290.56	832-H36	T69	39.05
805-806	T8	222.47	820-H18	T39	19.00	832-H37	T70	161.73
806-807	T9	100.00	820-H19	T40	48.59	H37-H38	T71	540.37
807-H2	T10	5.00	H19-H20	T41	50.00	H38-H39	T72	375.09
807-H3	T11	5.00	819-821	T42	382.65	H39-H40	T73	272.00
807-808	T12	200.00	821-H21	T43	29.00	H35-833	T74	182.00
808-H4	T13	2.00	821-H22	T44	45.35	833-834	T75	72.00
H4-H5	T14	5.00	H22-822	T45	373.92	834-H41	T76	32.00
808-809	T15	651.07	822-H23	T46	116.00	834-835	T77	120.09
809-810	T16	516.20	H23-H24	T47	39.00	835-836	T78	274.74
810-H6	T17	26.82	822-H25	T48	190.67	836-837	T79	93.21
810-H7	T18	310.18	H25-H26	T49	254.34	837-H42	T80	10.49
H7-H8	T19	32.98	H26-H27	T50	336.00	837-H43	T81	14.54
804-H9	T20	406.00	814-823	T51	18.68	836-H44	T82	204.62
H9-811	T21	222.93	823-H28	T52	255.00	H44-H45	T83	490.71
811-H10	T22	30.85	823-824	T53	415.00	835-H46	T84	10.00
811-812	T23	20.88	824-H29	T54	40.44	H46-H47	T85	400.00
812-813	T24	37.06	H29-825	T55	320.00	H47-838	T86	38.00
813-814	T25	5.00	825-H30	T56	2.00	838-H48	T87	5.00
814-815	T26	48.56	H30-H31	T57	362.00	838-839	T88	308.23
815-H11	T27	260.66	824-826	T58	254.36	839-H49	T89	292.00
H11-H12	T28	568.00	826-827	T59	154.00	H49-840	T90	15.00
H12-H13	T29	98.00	827-828	T60	207.65	840-H50	T91	84.00
H13-816	T30	287.78	828-H32	T61	56.66	840-H51	T92	60.71
816-H14	T31	38.55	828-829	T62	507.75			

**Tabla A.3. Valores de demanda en hidrantes. Caso RCRP “Callén Inferior”**

ID Nudo	ID Hidrante	Dot. [L/s]	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. [L/s]	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. [L/s]
1	H1	59.00	18	H18	8.19	35	H35	26.00
2	H2	84.00	19	H19	1.04	36	H36	12.00
3	H3	88.00	20	H20	7.03	37	H37	16.00
4	H4	49.00	21	H21	23.10	38	H38	18.00
5	H5	59.00	22	H22	11.02	39	H39	32.00
6	H6	34.00	23	H23	12.14	40	H40	18.00
7	H7	43.00	24	H24	15.92	41	H41	32.00
8	H8	50.00	25	H25	11.06	42	H42	10.00
9	H9	18.00	26	H26	7.44	43	H43	20.00

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

10	H10	12.00	27	H27	3.00	44	H44	18.00
11	H11	26.00	28	H28	23.50	45	H45	12.00
12	H12	18.00	29	H29	9.43	46	H46	19.00
13	H13	31.00	30	H30	11.58	47	H47	18.00
14	H14	12.00	31	H31	14.44	48	H48	35.00
15	H15	18.00	32	H32	9.16	49	H49	24.00
16	H16	17.00	33	H33	16.89	50	H50	30.00
17	H17	45.00	34	H34	8.65	51	H51	24.00

**Tabla A.4. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Callén Inferior”**

ID Nudo	ID Hidrante	ASIG. TURNO	DOTAC. [L/S]	Q TT1		Q TT2		SQTT
				771.00	684.00	684.00	684.00	1455.00
[1]	[2]	[3]	[4]	Q T1	Q T2			
1	H1	2	59.00				59.00	
2	H2	2	84.00				84.00	
3	H3	1	88.00	88.00				
4	H4	1	49.00	49.00				
5	H5	2	59.00				59.00	
6	H6	1	34.00	34.00				
7	H7	1	43.00	43.00				
8	H8	2	50.00				50.00	
9	H9	1	18.00	18.00				
10	H10	2	12.00				12.00	
11	H11	2	26.00				26.00	
12	H12	1	18.00	18.00				
13	H13	2	31.00				31.00	
14	H14	1	12.00					
15	H15	1	18.00					
16	H16	1	17.00					
17	H17	1	45.00					
18	H18	2	27.00				27.00	
19	H19	1	10.00	10.00				
20	H20	2	23.00				23.00	
21	H21	1	46.00	46.00				
22	H22	1	22.00	22.00				
23	H23	2	24.00				24.00	
24	H24	2	26.00				26.00	
25	H25	1	36.00	36.00				
26	H26	2	18.00				18.00	
27	H27	2	13.00				13.00	
28	H28	1	45.00	45.00				
29	H29	2	19.00				19.00	
30	H30	1	23.00	23.00				
31	H31	1	28.00	28.00				
32	H32	1	18.00	18.00				
33	H33	1	33.00	33.00				
34	H34	1	17.00	17.00				
35	H35	2	26.00				26.00	
36	H36	1	12.00	12.00				
37	H37	1	16.00	16.00				

**Coste 1717194.7 \$**

38	H38	2	18.00		18.00
39	H39	2	32.00		32.00
40	H40	1	18.00	18.00	
41	H41	2	32.00		32.00
42	H42	1	10.00	10.00	
43	H43	2	20.00		20.00
44	H44	1	18.00	18.00	
45	H45	2	12.00		12.00
46	H46	2	19.00		19.00
47	H47	1	18.00	18.00	
48	H48	1	35.00	35.00	
49	H49	1	24.00	24.00	
50	H50	2	30.00		30.00
51	H51	2	24.00		24.00

**Tabla A.5. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Callén Inferior”**

**Datos generales**

Viscosidad cinemática	0,000001 m <sup>2</sup> /s
Rugosidad absoluta	7,00E-03 mm
<u>Curva de costo de la tubería</u>	
Coefficiente A	745
Exponente a	1,975
Viscosidad dinámica	1,00E-03 kg/m.s

<b>Turno 1</b>					
<b>ID Nudo</b>	<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Cota</b>	<b>Longitud</b>	<b>Pmin</b>
<b>[1]</b>	<b>[2]</b>	<b>[3]</b>	<b>[m]</b>	<b>[m]</b>	<b>[mca]</b>
			<b>[4]</b>	<b>[5]</b>	<b>[6]</b>
Embalse			437.50		
	0-800	T1	388.50	3.00	49.00
800	800-801	T2	390.00	213.88	47.50
801	801-802	T3	368.00	1518.50	69.50
802	802-1	T4	368.23	78.00	69.27
802	802-803	T5	368.00	82.50	69.50
803	803-804	T6	367.74	31.54	69.76
804	804-805	T7	365.24	68.13	72.26
805	805-806	T8	363.45	222.47	74.05
806	806-807	T9	361.00	100.00	76.50
807	807-2	T10	363.00	5.00	74.50
807	807-3	T11	363.00	5.00	74.50
807	807-808	T12	363.00	200.00	74.50
808	808-4	T13	363.94	2.00	73.56
4	43589	T14	364.28	5.00	73.22
808	808-809	T15	356.20	651.07	81.30
809	809-810	T16	355.00	516.20	82.50
810	810-6	T17	354.72	26.82	82.78

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

---

810	810-7	T18	353.97	310.18	83.53
7	43684	T19	354.25	32.98	83.25
804	804-9	T20	364.89	406.00	72.61
9	9-811	T21	363.31	222.93	74.19
811	811-10	T22	362.90	30.85	74.60
811	811-812	T23	362.00	20.88	75.50
812	812-813	T24	359.00	37.06	78.50
813	813-814	T25	358.00	5.00	79.50
814	814-815	T26	358.00	48.56	79.50
815	815-11	T27	355.45	260.66	82.05
11	43810	T28	347.50	568.00	90.00
12	41609	T29	348.92	98.00	88.58
13	13-816	T30	348.00	287.78	89.50
816	816-14	T31	348.44	38.55	89.06
14	14-817	T32	346.00	245.00	91.50
817	817-15	T33	347.05	50.00	90.45
816	816-818	T34	350.00	37.53	87.50
818	818-16	T35	348.72	24.41	88.78
818	818-17	T36	349.44	152.68	88.06
17	17-819	T37	350.00	232.57	87.50
819	819-820	T38	365.00	290.56	72.50
820	820-18	T39	363.15	19.00	74.35
820	820-19	T40	365.25	48.59	72.25
19	19-20	T41	367.00	50.00	70.50
819	819-821	T42	348.00	382.65	89.50
821	821-21	T43	348.13	29.00	89.37
821	821-22	T44	349.54	45.35	87.96
22	22-822	T45	350.00	373.92	87.50
822	822-23	T46	353.20	116.00	84.30
23	23-24	T47	353.60	39.00	83.90
822	822-25	T48	355.03	190.67	82.47
25	25-26	T49	359.28	254.34	78.22
26	26-27	T50	365.22	336.00	72.28
814	814-823	T51	357.59	18.68	79.91
823	823-28	T52	356.12	255.00	81.38
823	823-824	T53	350.92	415.00	86.58
824	824-29	T54	351.00	40.44	86.50
29	29-825	T55	352.00	320.00	85.50
825	825-30	T56	349.00	2.00	88.50
30	30-31	T57	344.42	362.00	93.08
824	824-826	T58	346.04	254.36	91.46
826	826-827	T59	345.00	154.00	92.50
827	827-828	T60	345.00	207.65	92.50
828	828-32	T61	345.84	56.66	91.66
828	828-829	T62	345.00	507.75	92.50
829	829-33	T63	345.19	84.07	92.31
33	33-34	T64	345.19	2.00	92.31

---

829	829-830	T65	345.00	128.61	92.50
830	830-831	T66	345.00	40.74	92.50
831	831-35	T67	345.20	79.16	92.30
35	35-832	T68	342.00	512.28	95.50
832	832-36	T69	342.46	39.05	95.04
832	832-37	T70	341.94	161.73	95.56
37	37-38	T71	337.34	540.37	100.16
38	38-39	T72	336.77	375.09	100.73
39	39-40	T73	353.07	272.00	84.43
35	35-833	T74	346.41	182.00	91.09
833	833-834	T75	352.00	72.00	85.50
834	834-41	T76	353.04	32.00	84.46
834	834-835	T77	353.00	120.09	84.50
835	835-836	T78	357.00	274.74	80.50
836	836-837	T79	357.00	93.21	80.50
837	837-42	T80	354.44	10.48	83.06
837	837-43	T81	354.43	14.54	83.07
836	836-44	T82	357.23	204.62	80.27
44	44-45	T83	354.61	490.71	82.89
835	835-46	T84	353.87	10.00	83.63
46	46-47	T85	347.63	400.00	89.87
47	47-838	T86	347.00	38.00	90.50
838	838-48	T87	347.60	5.00	89.90
838	838-839	T88	350.00	308.23	87.50
839	839-49	T89	349.82	292.00	87.68
49	49-840	T90	349.77	15.00	87.73
840	840-50	T91	349.17	84.00	88.33
840	840-51	T92	349.01	60.71	88.49

<b>Turno 2</b>					
<b>ID Nudo</b>	<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Cota [m]</b>	<b>Longitud [m]</b>	<b>Pmin [mca]</b>
<b>[1]</b>	<b>[2]</b>	<b>[3]</b>	<b>[4]</b>	<b>[5]</b>	<b>[6]</b>
Embalse			437.50		
	0-800	T1	388.50	3.00	49.00
800	800-801	T2	390.00	213.88	47.50
801	801-802	T3	368.00	1518.50	69.50
802	802-1	T4	368.23	78.00	69.27
802	802-803	T5	368.00	82.50	69.50
803	803-804	T6	367.74	31.54	69.76
804	804-805	T7	365.24	68.13	72.26
805	805-806	T8	363.45	222.47	74.05
806	806-807	T9	361.00	100.00	76.50
807	807-2	T10	363.00	5.00	74.50
807	807-3	T11	363.00	5.00	74.50
807	807-808	T12	363.00	200.00	74.50

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

---

808	808-4	T13	363.94	2.00	73.56
4	43589	T14	364.28	5.00	73.22
808	808-809	T15	356.20	651.07	81.30
809	809-810	T16	355.00	516.20	82.50
810	810-6	T17	354.72	26.82	82.78
810	810-7	T18	353.97	310.18	83.53
7	43684	T19	354.25	32.98	83.25
804	804-9	T20	364.89	406.00	72.61
9	9-811	T21	363.31	222.93	74.19
811	811-10	T22	362.90	30.85	74.60
811	811-812	T23	362.00	20.88	75.50
812	812-813	T24	359.00	37.06	78.50
813	813-814	T25	358.00	5.00	79.50
814	814-815	T26	358.00	48.56	79.50
815	815-11	T27	355.45	260.66	82.05
11	43810	T28	347.50	568.00	90.00
12	41609	T29	348.92	98.00	88.58
13	13-816	T30	348.00	287.78	89.50
816	816-14	T31	348.44	38.55	89.06
14	14-817	T32	346.00	245.00	91.50
817	817-15	T33	347.05	50.00	90.45
816	816-818	T34	350.00	37.53	87.50
818	818-16	T35	348.72	24.41	88.78
818	818-17	T36	349.44	152.68	88.06
17	17-819	T37	350.00	232.57	87.50
819	819-820	T38	365.00	290.56	72.50
820	820-18	T39	363.15	19.00	74.35
820	820-19	T40	365.25	48.59	72.25
19	19-20	T41	367.00	50.00	70.50
819	819-821	T42	348.00	382.65	89.50
821	821-21	T43	348.13	29.00	89.37
821	821-22	T44	349.54	45.35	87.96
22	22-822	T45	350.00	373.92	87.50
822	822-23	T46	353.20	116.00	84.30
23	23-24	T47	353.60	39.00	83.90
822	822-25	T48	355.03	190.67	82.47
25	25-26	T49	359.28	254.34	78.22
26	26-27	T50	365.22	336.00	72.28
814	814-823	T51	357.59	18.68	79.91
823	823-28	T52	356.12	255.00	81.38
823	823-824	T53	350.92	415.00	86.58
824	824-29	T54	351.00	40.44	86.50
29	29-825	T55	352.00	320.00	85.50
825	825-30	T56	349.00	2.00	88.50
30	30-31	T57	344.42	362.00	93.08
824	824-826	T58	346.04	254.36	91.46
826	826-827	T59	345.00	154.00	92.50

---



827	827-828	T60	345.00	207.65	92.50
828	828-32	T61	345.84	56.66	91.66
828	828-829	T62	345.00	507.75	92.50
829	829-33	T63	345.19	84.07	92.31
33	33-34	T64	345.19	2.00	92.31
829	829-830	T65	345.00	128.61	92.50
830	830-831	T66	345.00	40.74	92.50
831	831-35	T67	345.20	79.16	92.30
35	35-832	T68	342.00	512.28	95.50
832	832-36	T69	342.46	39.05	95.04
832	832-37	T70	341.94	161.73	95.56
37	37-38	T71	337.34	540.37	100.16
38	38-39	T72	336.77	375.09	100.73
39	39-40	T73	353.07	272.00	84.43
35	35-833	T74	346.41	182.00	91.09
833	833-834	T75	352.00	72.00	85.50
834	834-41	T76	353.04	32.00	84.46
834	834-835	T77	353.00	120.09	84.50
835	835-836	T78	357.00	274.74	80.50
836	836-837	T79	357.00	93.21	80.50
837	837-42	T80	354.44	10.48	83.06
837	837-43	T81	354.43	14.54	83.07
836	836-44	T82	357.23	204.62	80.27
44	44-45	T83	354.61	490.71	82.89
835	835-46	T84	353.87	10.00	83.63
46	46-47	T85	347.63	400.00	89.87
47	47-838	T86	347.00	38.00	90.50
838	838-48	T87	347.60	5.00	89.90
838	838-839	T88	350.00	308.23	87.50
839	839-49	T89	349.82	292.00	87.68
49	49-840	T90	349.77	15.00	87.73
840	840-50	T91	349.17	84.00	88.33
840	840-51	T92	349.01	60.71	88.49

Tabla A.6. Celdas para configurar la PNL

COSTO TOTAL \$ 1717194.71										
Turno 1										
Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
			437.50							
800	0-800	T1	388.50		3.00	774.43		1346.31	437.50	49.00
801	800-801	T2	390.00		213.88	716.89		82410.90	437.50	47.50
802	801-802	T3	368.00		1518.50	716.88		585096.47	437.50	69.50
1	802-1	T4	368.23		78.00	135.51		1120.39	437.50	69.27
803	802-803	T5	368.00		82.50	702.50		30542.76	437.50	69.50
804	803-804	T6	367.74		31.54	625.73		9289.79	437.50	69.76

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

805	804-805	T7	365.24	68.13	433.07	9703.70	437.50	72.26
806	805-806	T8	363.45	222.47	432.50	31604.12	437.50	74.05
807	806-807	T9	361.00	100.00	432.85	14228.80	437.50	76.50
2	807-2	T10	363.00	5.00	170.72	113.32	437.50	74.50
3	807-3	T11	363.00	5.00	144.69	81.74	437.50	74.50
808	807-808	T12	363.00	200.00	372.85	21195.28	437.50	74.50
4	808-4	T13	363.94	2.00	325.80	162.38	437.50	73.56
5	43589	T14	364.28	5.00	319.80	391.34	437.50	73.22
809	808-809	T15	356.20	651.07	247.16	30638.92	437.50	81.30
810	809-810	T16	355.00	516.20	247.19	24296.90	437.50	82.50
6	810-6	T17	354.72	26.82	86.01	157.00	437.50	82.78
7	810-7	T18	353.97	310.18	211.30	10711.22	437.50	83.53
8	43684	T19	354.25	32.98	95.95	239.63	437.50	83.25
9	804-9	T20	364.89	406.00	592.27	107298.24	437.50	72.61
811	9-811	T21	363.31	222.93	590.27	58523.42	437.50	74.19
10	811-10	T22	362.90	30.85	65.72	106.16	437.50	74.60
812	811-812	T23	362.00	20.88	594.14	5553.44	437.50	75.50
813	812-813	T24	359.00	37.06	588.25	9664.29	437.50	78.50
814	813-814	T25	358.00	5.00	620.89	1450.46	437.50	79.50
815	814-815	T26	358.00	48.56	432.65	6903.60	437.50	79.50
11	815-11	T27	355.45	260.66	432.40	37011.29	437.50	82.05
12	43810	T28	347.50	568.00	415.39	74508.93	437.50	90.00
13	41609	T29	348.92	98.00	415.27	12848.16	437.50	88.58
816	13-816	T30	348.00	287.78	392.38	33732.34	437.50	89.50
14	816-14	T31	348.44	38.55	106.23	342.39	437.50	89.06
817	14-817	T32	346.00	245.00	92.54	1657.13	437.50	91.50
15	817-15	T33	347.05	50.00	92.52	338.05	437.50	90.45
818	816-818	T34	350.00	37.53	394.57	4448.24	437.50	87.50
16	818-16	T35	348.72	24.41	182.28	629.70	437.50	88.78
17	818-17	T36	349.44	152.68	392.02	17863.61	437.50	88.06
819	17-819	T37	350.00	232.57	392.05	27215.20	437.50	87.50
820	819-820	T38	365.00	290.56	265.21	15715.37	437.50	72.50
18	820-18	T39	363.15	19.00	231.35	784.70	437.50	74.35
19	820-19	T40	365.25	48.59	142.52	771.07	437.50	72.25
20	19-20	T41	367.00	50.00	142.48	792.92	437.50	70.50
821	819-821	T42	348.00	382.65	317.49	29523.01	437.50	89.50
21	821-21	T43	348.13	29.00	86.13	170.23	437.50	89.37
22	821-22	T44	349.54	45.35	317.87	3506.98	437.50	87.96
822	22-822	T45	350.00	373.92	317.23	28803.87	437.50	87.50
23	822-23	T46	353.20	116.00	119.65	1303.08	437.50	84.30
24	23-24	T47	353.60	39.00	99.04	301.61	437.50	83.90
25	822-25	T48	355.03	190.67	246.96	8957.96	437.50	82.47
26	25-26	T49	359.28	254.34	246.57	11912.78	437.50	78.22
27	26-27	T50	365.22	336.00	151.36	6004.34	437.50	72.28
823	814-823	T51	357.59	18.68	431.40	2640.61	437.50	79.91
28	823-28	T52	356.12	255.00	128.13	3278.99	437.50	81.38
824	823-824	T53	350.92	415.00	416.11	54625.06	437.50	86.58
29	824-29	T54	351.00	40.44	177.19	986.41	437.50	86.50
825	29-825	T55	352.00	320.00	175.30	7641.66	437.50	85.50
30	825-30	T56	349.00	2.00	149.73	34.98	437.50	88.50
31	30-31	T57	344.42	362.00	115.25	3776.42	437.50	93.08
826	824-826	T58	346.04	254.36	378.97	27836.81	437.50	91.46
827	826-827	T59	345.00	154.00	378.93	16849.63	437.50	92.50
828	827-828	T60	345.00	207.65	378.95	22722.32	437.50	92.50
32	828-32	T61	345.84	56.66	79.96	287.20	437.50	91.66
829	828-829	T62	345.00	507.75	373.46	53981.41	437.50	92.50
33	829-33	T63	345.19	84.07	106.97	756.96	437.50	92.31
34	33-34	T64	345.19	2.00	85.19	11.49	437.50	92.31
830	829-830	T65	345.00	128.61	357.10	12516.28	437.50	92.50
831	830-831	T66	345.00	40.74	357.83	3980.44	437.50	92.50
35	831-35	T67	345.20	79.16	357.08	7702.80	437.50	92.30
832	35-832	T68	342.00	512.28	229.91	20897.37	437.50	95.50

36	832-36	T69	342.46	39.05	57.39	102.82	437.50	95.04
37	832-37	T70	341.94	161.73	212.32	5638.06	437.50	95.56
38	37-38	T71	337.34	540.37	179.00	13447.97	437.50	100.16
39	38-39	T72	336.77	375.09	178.61	9293.90	437.50	100.73
40	39-40	T73	353.07	272.00	179.06	6773.45	437.50	84.43
833	35-833	T74	346.41	182.00	291.77	11884.64	437.50	91.09
834	833-834	T75	352.00	72.00	286.48	4534.97	437.50	85.50
41	834-41	T76	353.04	32.00	88.44	197.92	437.50	84.46
835	834-835	T77	353.00	120.09	274.39	6946.52	437.50	84.50
836	835-836	T78	357.00	274.74	173.54	6431.51	437.50	80.50
837	836-837	T79	357.00	93.21	113.19	938.28	437.50	80.50
42	837-42	T80	354.44	10.48	54.23	24.68	437.50	83.06
43	837-43	T81	354.43	14.54	119.64	163.30	437.50	83.07
44	836-44	T82	357.23	204.62	140.05	3136.68	437.50	80.27
45	44-45	T83	354.61	490.71	120.89	5625.59	437.50	82.89
46	835-46	T84	353.87	10.00	193.78	291.06	437.50	83.63
47	46-47	T85	347.63	400.00	211.50	13837.83	437.50	89.87
838	47-838	T86	347.00	38.00	211.31	1312.24	437.50	90.50
48	838-48	T87	347.60	5.00	89.34	31.55	437.50	89.90
839	838-839	T88	350.00	308.23	211.18	10630.98	437.50	87.50
49	839-49	T89	349.82	292.00	211.20	10073.80	437.50	87.68
840	49-840	T90	349.77	15.00	203.29	479.92	437.50	87.73
50	840-50	T91	349.17	84.00	172.51	1943.39	437.50	88.33
51	840-51	T92	349.01	60.71	141.77	953.29	437.50	88.49

## Turno 2

Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
			437.50							
800	0-800	T1	388.50		3.00				437.50	49.00
801	800-801	T2	390.00		213.88				437.50	47.50
802	801-802	T3	368.00		1518.50				437.50	69.50
1	802-1	T4	368.23		78.00				437.50	69.27
803	802-803	T5	368.00		82.50				437.50	69.50
804	803-804	T6	367.74		31.54				437.50	69.76
805	804-805	T7	365.24		68.13				437.50	72.26
806	805-806	T8	363.45		222.47				437.50	74.05
807	806-807	T9	361.00		100.00				437.50	76.50
2	807-2	T10	363.00		5.00				437.50	74.50
3	807-3	T11	363.00		5.00				437.50	74.50
808	807-808	T12	363.00		200.00				437.50	74.50
4	808-4	T13	363.94		2.00				437.50	73.56
5	43589	T14	364.28		5.00				437.50	73.22
809	808-809	T15	356.20		651.07				437.50	81.30
810	809-810	T16	355.00		516.20				437.50	82.50
6	810-6	T17	354.72		26.82				437.50	82.78
7	810-7	T18	353.97		310.18				437.50	83.53
8	43684	T19	354.25		32.98				437.50	83.25
9	804-9	T20	364.89		406.00				437.50	72.61
811	9-811	T21	363.31		222.93				437.50	74.19
10	811-10	T22	362.90		30.85				437.50	74.60
812	811-812	T23	362.00		20.88				437.50	75.50
813	812-813	T24	359.00		37.06				437.50	78.50
814	813-814	T25	358.00		5.00				437.50	79.50
815	814-815	T26	358.00		48.56				437.50	79.50
11	815-11	T27	355.45		260.66				437.50	82.05
12	43810	T28	347.50		568.00				437.50	90.00
13	41609	T29	348.92		98.00				437.50	88.58
816	13-816	T30	348.00		287.78				437.50	89.50
14	816-14	T31	348.44		38.55				437.50	89.06
817	14-817	T32	346.00		245.00				437.50	91.50

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

15	817-15	T33	347.05	50.00	437.50	90.45
818	816-818	T34	350.00	37.53	437.50	87.50
16	818-16	T35	348.72	24.41	437.50	88.78
17	818-17	T36	349.44	152.68	437.50	88.06
819	17-819	T37	350.00	232.57	437.50	87.50
820	819-820	T38	365.00	290.56	437.50	72.50
18	820-18	T39	363.15	19.00	437.50	74.35
19	820-19	T40	365.25	48.59	437.50	72.25
20	19-20	T41	367.00	50.00	437.50	70.50
821	819-821	T42	348.00	382.65	437.50	89.50
21	821-21	T43	348.13	29.00	437.50	89.37
22	821-22	T44	349.54	45.35	437.50	87.96
822	22-822	T45	350.00	373.92	437.50	87.50
23	822-23	T46	353.20	116.00	437.50	84.30
24	23-24	T47	353.60	39.00	437.50	83.90
25	822-25	T48	355.03	190.67	437.50	82.47
26	25-26	T49	359.28	254.34	437.50	78.22
27	26-27	T50	365.22	336.00	437.50	72.28
823	814-823	T51	357.59	18.68	437.50	79.91
28	823-28	T52	356.12	255.00	437.50	81.38
824	823-824	T53	350.92	415.00	437.50	86.58
29	824-29	T54	351.00	40.44	437.50	86.50
825	29-825	T55	352.00	320.00	437.50	85.50
30	825-30	T56	349.00	2.00	437.50	88.50
31	30-31	T57	344.42	362.00	437.50	93.08
826	824-826	T58	346.04	254.36	437.50	91.46
827	826-827	T59	345.00	154.00	437.50	92.50
828	827-828	T60	345.00	207.65	437.50	92.50
32	828-32	T61	345.84	56.66	437.50	91.66
829	828-829	T62	345.00	507.75	437.50	92.50
33	829-33	T63	345.19	84.07	437.50	92.31
34	33-34	T64	345.19	2.00	437.50	92.31
830	829-830	T65	345.00	128.61	437.50	92.50
831	830-831	T66	345.00	40.74	437.50	92.50
35	831-35	T67	345.20	79.16	437.50	92.30
832	35-832	T68	342.00	512.28	437.50	95.50
36	832-36	T69	342.46	39.05	437.50	95.04
37	832-37	T70	341.94	161.73	437.50	95.56
38	37-38	T71	337.34	540.37	437.50	100.16
39	38-39	T72	336.77	375.09	437.50	100.73
40	39-40	T73	353.07	272.00	437.50	84.43
833	35-833	T74	346.41	182.00	437.50	91.09
834	833-834	T75	352.00	72.00	437.50	85.50
41	834-41	T76	353.04	32.00	437.50	84.46
835	834-835	T77	353.00	120.09	437.50	84.50
836	835-836	T78	357.00	274.74	437.50	80.50
837	836-837	T79	357.00	93.21	437.50	80.50
42	837-42	T80	354.44	10.48	437.50	83.06
43	837-43	T81	354.43	14.54	437.50	83.07
44	836-44	T82	357.23	204.62	437.50	80.27
45	44-45	T83	354.61	490.71	437.50	82.89
46	835-46	T84	353.87	10.00	437.50	83.63
47	46-47	T85	347.63	400.00	437.50	89.87
838	47-838	T86	347.00	38.00	437.50	90.50
48	838-48	T87	347.60	5.00	437.50	89.90
839	838-839	T88	350.00	308.23	437.50	87.50
49	839-49	T89	349.82	292.00	437.50	87.68
840	49-840	T90	349.77	15.00	437.50	87.73
50	840-50	T91	349.17	84.00	437.50	88.33
51	840-51	T92	349.01	60.71	437.50	88.49

**Tabla A.7. Diseño hidráulico de la Red Callén Inferior, luego de implementar AG-PNL**

ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]
T1	774.43	T32	92.54	T63	106.97
T2	716.89	T33	92.52	T64	85.19
T3	716.88	T34	394.57	T65	357.10
T4	135.51	T35	182.28	T66	357.83
T5	702.50	T36	392.02	T67	357.08
T6	625.73	T37	392.05	T68	229.91
T7	433.07	T38	265.21	T69	57.39
T8	432.50	T39	231.35	T70	212.32
T9	432.85	T40	142.52	T71	179.00
T10	170.72	T41	142.48	T72	178.61
T11	144.69	T42	317.49	T73	179.06
T12	372.85	T43	86.13	T74	291.77
T13	325.80	T44	317.87	T75	286.48
T14	319.80	T45	317.23	T76	88.44
T15	247.16	T46	119.65	T77	274.39
T16	247.19	T47	99.04	T78	173.54
T17	86.01	T48	246.96	T79	113.19
T18	211.30	T49	246.57	T80	54.23
T19	95.95	T50	151.36	T81	119.64
T20	592.27	T51	431.40	T82	140.05
T21	590.27	T52	128.13	T83	120.89
T22	65.72	T53	416.11	T84	193.78
T23	594.14	T54	177.19	T85	211.50
T24	588.25	T55	175.30	T86	211.31
T25	620.89	T56	149.73	T87	89.34
T26	432.65	T57	115.25	T88	211.18
T27	432.40	T58	378.97	T89	211.20
T28	415.39	T59	378.93	T90	203.29
T29	415.27	T60	378.95	T91	172.51
T30	392.38	T61	79.96	T92	141.77
T31	106.23	T62	373.46	T63	117.00
				T64	83.00

**Tabla A.8. Resultados de asignación de turno con modelo AG-PNL en cada hidrante de la Red de Riego Callén Inferior**

Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]
H1	2	59.00	H18	2	27.00	H35	2	26.00
H2	2	84.00	H19	1	10.00	H36	1	12.00
H3	1	88.00	H20	2	23.00	H37	1	16.00
H4	1	49.00	H21	1	46.00	H38	2	18.00
H5	2	59.00	H22	1	22.00	H39	2	32.00
H6	1	34.00	H23	2	24.00	H40	1	18.00
H7	1	43.00	H24	2	26.00	H41	2	32.00
H8	2	50.00	H25	1	36.00	H42	1	10.00
H9	1	18.00	H26	2	18.00	H43	2	20.00
H10	2	12.00	H27	2	13.00	H44	1	18.00
H11	2	26.00	H28	1	45.00	H45	2	12.00
H12	1	18.00	H29	2	19.00	H46	2	19.00
H13	2	31.00	H30	1	23.00	H47	1	18.00
H14	1	12.00	H31	1	28.00	H48	1	35.00
H15	1	18.00	H32	1	18.00	H49	1	24.00
H16	1	17.00	H33	1	33.00	H50	2	30.00
H17	1	45.00	H34	1	17.00	H51	2	24.00

**Tabla A.9. Resultados de cumplimiento de la Fiabilidad de presión por hidrante de la red de Riego Callén Inferior**

Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>	Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>
1	H5	315	0.67	27	H44	255	0.60
2	H24	396	0.95	28	H37	330	1.00
3	H46	305	0.52	29	H40	342	0.32
4	H42	96	0.80	30	H39	289	0.56
5	H45	199	0.48	31	H31	336	1.00
6	H18	237	0.20	32	H34	358	1.00
7	H8	198	0.95	33	H36	286	0.99
8	H7	186	0.90	34	H33	347	1.00
9	H43	314	0.54	35	H32	348	1.00
10	H51	321	0.48	36	H29	351	1.00
11	H21	355	1.00	37	H14	299	1.00
12	H13	295	1.00	38	H28	358	1.00
13	H15	195	1.00	39	H10	238	1.00
14	H47	74	0.93	40	H11	347	1.00
15	H22	333	1.00	41	H6	360	1.00
16	H17	324	1.00	42	H4	380	1.00

17	H19	105	0.86	43	H1	257	1.00
18	H26	281	0.20	44	H38	290	0.90
19	H25	219	0.39	45	H20	251	0.24
20	H23	348	0.94	46	H27	232	0.25
21	H50	184	0.32	47	H9	98	1.00
22	H49	326	0.60	48	H12	154	1.00
23	H48	313	0.63	49	H30	332	1.00
24	H16	349	1.00	50	H2	412	0.89
25	H41	267	0.96	51	H3	326	1.00
26	H35	339	1.00				

$\Sigma$	41.07
<i>IFCT</i>	0.81

**Tabla A.10.** Simulación de  $N_T$  y Flexibilidad. Red Callén Inferior

$N_T$	Flexibilidad
100	0.87
500	0.88
1000	0.88
1500	0.88

## B) Ejemplo de implementación Tuncarta

### Características topológicas de la red

**Tabla B.1. ID Nudos y cotas. Caso RCRP “Tuncarta”**

ID Nudo	Cota [m]	ID Nudo	Cota [m]	ID Nudo	Cota [m]
90	1540.00	114	1388.48	133	1368.26
96	1491.80	115	1355.60	134	1352.39
97	1483.34	116	1414.36	135	1376.54
98	1484.91	117	1411.70	136	1377.50
99	1481.62	118	1416.63	137	1375.79
100	1476.70	119	1386.31	138	1333.91
101	1446.25	120	1405.43	139	1362.74
102	1428.43	121	1403.42	140	1371.89
103	1406.50	122	1390.70	141	1357.94
104	1434.02	123	1401.02	142	1363.42
105	1473.82	124	1383.80	143	1368.34
106	1432.03	125	1406.17	144	1348.22
107	1419.16	126	1395.98	145	1325.03
108	1372.42	127	1369.91	146	1362.61
109	1353.80	128	1388.63	147	1309.12
110	1424.05	129	1381.42	148	1347.12
111	1412.69	130	1368.21	149	1346.26
112	1409.03	131	1378.92	150	1295.56
113	1403.74	132	1362.04	151	1361.97

**Tabla B.2. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Tuncarta”**

Nin-Nfin	ID Linea	Longitud [m]	Nin-Nfin	ID Linea	Longitud [m]	Nin-Nfin	ID Linea	Longitud [m]
0-96	TU1	25.00	114-115	TU20	78.38	132-134	TU39	78.32
96-97	TU2	95.82	110-116	TU21	129.12	134-135	TU40	114.72
97-98	TU3	131.13	116-117	TU22	94.88	132-136	TU41	43.52
98-99	TU4	30.00	117-118	TU23	91.93	136-137	TU42	47.80
99-100	TU5	56.94	118-119	TU24	128.93	137-138	TU43	190.34
100-101	TU6	124.78	116-120	TU25	103.73	137-139	TU44	160.97
101-102	TU7	71.34	120-121	TU26	91.62	139-140	TU45	130.17
102-103	TU8	74.69	121-122	TU27	52.03	137-141	TU46	199.51
101-104	TU9	129.13	120-123	TU29	76.12	141-142	TU47	149.68
100-105	TU10	112.95	123-124	TU30	103.12	141-143	TU48	113.15
105-106	TU11	127.42	120-125	TU28	90.05	141-144	TU49	229.12
106-107	TU12	38.00	125-126	TU31	107.12	144-145	TU50	195.25



107-108	TU13	162.40	126-127	TU32	147.72	144-146	TU51	149.99
108-109	TU14	97.45	127-128	TU33	52.48	144-147	TU52	192.72
104-110	TU15	81.85	127-129	TU34	65.59	147-148	TU53	189.37
110-111	TU16	142.12	129-130	TU35	71.56	147-149	TU54	184.62
111-112	TU17	80.11	130-131	TU36	116.24	149-150	TU55	212.89
112-113	TU18	28.61	129-132	TU37	199.39	149-151	TU56	157.74
113-114	TU19	90.00	132-133	TU38	68.86			

**Tabla B.3. Valores de demanda en hidrantes. Caso RCRP “Tuncarta”**

ID Nudo	ID Hidrante	Dot. [L/s]	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. [L/s]	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. [L/s]
96	1	0.18	117	29	0.84	134	57	0.56
97	2	1.01	118	30	0.61	137	58	0.75
98	3	0.33		31	0.61	135	59	0.75
99	4	5.13	119	32	5.73	138	60	2.59
100	5	0.57		33	5.73	137	61	2.59
101	6	0.21	120	34	0.35	139	62	0.65
102	7	0.76	121	35	0.88	138	63	0.65
103	8	1.67	122	36	1.10	140	64	0.60
	9	1.67		37	1.10	139	65	0.60
104	10	0.99	123	38	0.48	141	66	1.26
	11	0.99	124	39	0.57	140	67	1.26
105	12	2.14		40	0.57	142	68	1.47
	13	2.14	125	41	0.47	141	69	1.47
106	14	1.27		42	0.80	143	70	0.80
	15	1.27	126	43	0.80	144	71	0.70
107	16	0.81	127	44	1.01		72	0.70
	17	0.81	128	45	0.34	145	73	3.34
108	18	0.88	129	46	0.53	144	74	3.34
	19	0.88	130	47	3.04	146	75	0.39
109	20	3.89		48	3.04	147	76	3.74
	21	3.89	131	49	0.60		77	3.74
110	22	0.57		50	0.60	148	78	0.91
111	23	0.98	132	51	0.82	147	79	0.91
112	24	0.62		52	0.82	149	80	2.32
114	25	0.38	133	53	0.49		81	2.32
	26	3.07		54	1.00	150	82	2.32
115	27	3.07	134	55	1.00		83	1.03
116	28	1.19	135	56	0.56	151	84	1.03

**Tabla B.4. Variables de entrada topología. Caso RCRP "Tuncarta"**

ID Nudo	ID Hidrante	ASIG. TURNO	DOTAC. [L/S]	Q TT			SQTT
				37.57	40.10	40.97	118.60
[1]	[2]	[3]	[4]	Q T1	Q T2	Q T3	
96	1	3	0.18			0.18	
97	1	2	1.01		1.01		
98	1	3	0.33			0.33	
99	1	3	5.13			5.13	
100	1	3	0.57			0.57	
101	1	2	0.21		0.21		
102	1	2	0.76		0.76		
103	1	3	1.67			1.67	
	2	1	1.67				
				Coste	21114.6 USD	1.67	
104	1	2	0.99		0.99		
	2	3	0.99			0.99	
105	1	1	2.14		2.14		
	2	3	2.14			2.14	
106	1	1	1.27		1.27		
	2	3	1.27			1.27	
107	1	1	0.81		0.81		
	2	2	0.81		0.81		
108	1	3	0.88			0.88	
	2	2	0.88		0.88		
109	1	2	3.89		3.89		
	2	3	3.89			3.89	
110	1	1	0.57		0.57		
111	1	2	0.98		0.98		
112	1	1	0.62		0.62		
114	1	3	0.38			0.38	
115	1	2	3.07			3.07	
	2	1	3.07		3.07		
116	1	1	1.19		1.19		
117	1	2	0.84		0.84		
118	1	3	0.61			0.61	
	2	1	0.61		0.61		
119	1	2	5.73			5.73	
	2	1	5.73		5.73		
120	1	3	0.35			0.35	
121	1	1	0.88		0.88		
122	1	3	1.10			1.10	
	2	2	1.10		1.10		
123	1	1	0.48		0.48		
124	1	1	0.57		0.57		
	2	1	0.57		0.57		
125	1	2	0.47			0.47	
126	1	2	0.80			0.80	
	2	3	0.80			0.80	
127	1	2	1.01		1.01		
128	1	1	0.34		0.34		
129	1	2	0.53			0.53	
130	1	1	3.04		3.04		
	2	3	3.04			3.04	
131	1	2	0.60			0.60	
	2	3	0.60			0.60	
132	1	3	0.82			0.82	
	2	2	0.82		0.82		

133	1	3	0.49			0.49
134	1	2	1.00		1.00	
	2	3	1.00			1.00
135	1	1	0.56	0.56		
	2	1	0.56	0.56		
137	1	1	0.75	0.75		
	2	1	0.75	0.75		
138	1	2	2.59		2.59	
	2	2	2.59		2.59	
139	1	3	0.65			0.65
	2	1	0.65	0.65		
140	1	2	0.60		0.60	
	2	1	0.60	0.60		
141	1	3	1.26			1.26
	2	3	1.26			1.26
142	1	2	1.47		1.47	
	2	3	1.47			1.47
143	1	1	0.80	0.80		
144	1	3	0.70			0.70
	2	1	0.70	0.70		
145	1	3	3.34			3.34
	2	1	3.34	3.34		
146	1	2	0.39		0.39	
147	1	2	3.74		3.74	
	2	3	3.74			3.74
148	1	1	0.91	0.91		
	2	2	0.91		0.91	
149	1	3	2.32			2.32
150	1	1	2.32	2.32		
	2	2	2.32		2.32	
151	1	1	1.03	1.03		
	2	1	1.03	1.03		

**Tabla B.5. Variables de entrada topología. Caso RCRP "Tuncarta"**

**Datos generales**

Viscosidad cinemática	0.000001
Rugosidad abs	0.0015
Curva de coste de la t	
Coficiente A	743.427
Exponente a	1.97457
Viscosidad dinámica	0.001

Turno 1					
ID Nudo	Nin-Nfin	ID Linea	Cota [m]	Longitud [m]	Pmin [mca]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
90			1540.00		
96	0 -96	TU1	1491.80	25.00	
97	96 -97	TU2	1483.34	95.82	
98	97- 98	TU3	1484.91	131.13	
99	98 - 99	TU4	1481.62	30.00	
100	99-100	TU5	1476.70	56.94	
101	100-101	TU6	1446.25	124.78	

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

---

102	101-102	TU7	1428.43	71.34	
103	102-103	TU8	1406.50	74.69	40.00
104	101-104	TU9	1434.02	129.13	
105	100-105	TU10	1473.82	112.95	40.00
106	105-106	TU11	1432.03	127.42	40.00
107	106-107	TU12	1419.16	38.00	40.00
108	107-108	TU13	1372.42	162.40	
109	108-109	TU14	1353.80	97.45	
110	104-110	TU15	1424.05	81.85	40.00
111	110-111	TU16	1412.69	142.12	
112	111-112	TU17	1409.03	80.11	40.00
113	112-113	TU18	1403.74	28.61	
114	113-114	TU19	1388.48	90.00	
115	114-115	TU20	1355.60	78.38	40.00
116	110-116	TU21	1414.36	129.12	40.00
117	116-117	TU22	1411.70	94.88	
118	117-118	TU23	1416.63	91.93	40.00
119	118-119	TU24	1386.31	128.93	40.00
120	116-120	TU25	1405.43	103.73	
121	120-121	TU26	1403.42	91.62	40.00
122	121-122	TU27	1390.70	52.03	
123	120-123	TU29	1401.02	76.12	40.00
124	123-124	TU30	1383.80	103.12	40.00
125	120-125	TU28	1406.17	90.05	
126	125-126	TU31	1395.98	107.12	
127	126-127	TU32	1369.91	147.72	
128	127-128	TU33	1388.63	52.48	40.00
129	127-129	TU34	1381.42	65.59	
130	129-130	TU35	1368.21	71.56	40.00
131	130-131	TU36	1378.92	116.24	
132	129-132	TU37	1362.04	199.39	
133	132-133	TU38	1368.26	68.86	
134	132-134	TU39	1352.39	78.32	
135	134-135	TU40	1376.54	114.72	40.00
136	132-136	TU41	1377.50	43.52	40.00
137	136-137	TU42	1375.79	47.80	40.00
138	137-138	TU43	1333.91	190.34	
139	137-139	TU44	1362.74	160.97	40.00
140	139-140	TU45	1371.89	130.17	40.00
141	137-141	TU46	1357.94	199.51	
142	141-142	TU47	1363.42	149.68	
143	141-143	TU48	1368.34	113.15	40.00
144	141-144	TU49	1348.22	229.12	40.00
145	144-145	TU50	1325.03	195.25	40.00
146	144-146	TU51	1362.61	149.99	

147	144-147	TU52	1309.12	192.72	
148	147-148	TU53	1347.12	189.37	40.00
149	147-149	TU54	1346.26	184.62	
150	149-150	TU55	1295.56	212.89	40.00
151	149-151	TU56	1361.97	157.74	40.00

Turno 2					
ID Nudo	Nin-Nfin	ID Linea	Cota [m]	Longitud [m]	Pmin [mca]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
90			1540.00		
96	0 -96	TU1	1491.80	25.00	
97	96 -97	TU2	1483.34	95.82	40.00
98	97- 98	TU3	1484.91	131.13	
99	98 - 99	TU4	1481.62	30.00	
100	99-100	TU5	1476.70	56.94	
101	100-101	TU6	1446.25	124.78	40.00
102	101-102	TU7	1428.43	71.34	40.00
103	102-103	TU8	1406.50	74.69	
104	101-104	TU9	1434.02	129.13	40.00
105	100-105	TU10	1473.82	112.95	
106	105-106	TU11	1432.03	127.42	
107	106-107	TU12	1419.16	38.00	40.00
108	107-108	TU13	1372.42	162.40	40.00
109	108-109	TU14	1353.80	97.45	40.00
110	104-110	TU15	1424.05	81.85	
111	110-111	TU16	1412.69	142.12	40.00
112	111-112	TU17	1409.03	80.11	
113	112-113	TU18	1403.74	28.61	
114	113-114	TU19	1388.48	90.00	
115	114-115	TU20	1355.60	78.38	40.00
116	110-116	TU21	1414.36	129.12	
117	116-117	TU22	1411.70	94.88	40.00
118	117-118	TU23	1416.63	91.93	
119	118-119	TU24	1386.31	128.93	40.00
120	116-120	TU25	1405.43	103.73	
121	120-121	TU26	1403.42	91.62	
122	121-122	TU27	1390.70	52.03	40.00
123	120-123	TU29	1401.02	76.12	
124	123-124	TU30	1383.80	103.12	
125	120-125	TU28	1406.17	90.05	40.00
126	125-126	TU31	1395.98	107.12	40.00
127	126-127	TU32	1369.91	147.72	40.00
128	127-128	TU33	1388.63	52.48	

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

129	127-129	TU34	1381.42	65.59	40.00
130	129-130	TU35	1368.21	71.56	
131	130-131	TU36	1378.92	116.24	40.00
132	129-132	TU37	1362.04	199.39	40.00
133	132-133	TU38	1368.26	68.86	
134	132-134	TU39	1352.39	78.32	40.00
135	134-135	TU40	1376.54	114.72	
136	132-136	TU41	1377.50	43.52	
137	136-137	TU42	1375.79	47.80	
138	137-138	TU43	1333.91	190.34	40.00
139	137-139	TU44	1362.74	160.97	
140	139-140	TU45	1371.89	130.17	40.00
141	137-141	TU46	1357.94	199.51	
142	141-142	TU47	1363.42	149.68	40.00
143	141-143	TU48	1368.34	113.15	
144	141-144	TU49	1348.22	229.12	
145	144-145	TU50	1325.03	195.25	
146	144-146	TU51	1362.61	149.99	40.00
147	144-147	TU52	1309.12	192.72	40.00
148	147-148	TU53	1347.12	189.37	40.00
149	147-149	TU54	1346.26	184.62	
150	149-150	TU55	1295.56	212.89	40.00
151	149-151	TU56	1361.97	157.74	

<b>Turno 3</b>					
<b>ID Nudo</b>	<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Cota</b>	<b>Longitud</b>	<b>Pmin</b>
<b>[1]</b>	<b>[2]</b>	<b>[3]</b>	<b>[m]</b>	<b>[m]</b>	<b>[mca]</b>
			<b>[4]</b>	<b>[5]</b>	<b>[6]</b>
			1540.00		
96	0 -96	TU1	1491.80	25.00	40.00
97	96 -97	TU2	1483.34	95.82	
98	97- 98	TU3	1484.91	131.13	40.00
99	98 - 99	TU4	1481.62	30.00	40.00
100	99-100	TU5	1476.70	56.94	40.00
101	100-101	TU6	1446.25	124.78	
102	101-102	TU7	1428.43	71.34	
103	102-103	TU8	1406.50	74.69	40.00
104	101-104	TU9	1434.02	129.13	40.00
105	100-105	TU10	1473.82	112.95	40.00
106	105-106	TU11	1432.03	127.42	40.00
107	106-107	TU12	1419.16	38.00	
108	107-108	TU13	1372.42	162.40	40.00
109	108-109	TU14	1353.80	97.45	40.00
110	104-110	TU15	1424.05	81.85	

---

111	110-111	TU16	1412.69	142.12	
112	111-112	TU17	1409.03	80.11	
113	112-113	TU18	1403.74	28.61	40.00
114	113-114	TU19	1388.48	90.00	40.00
115	114-115	TU20	1355.60	78.38	
116	110-116	TU21	1414.36	129.12	
117	116-117	TU22	1411.70	94.88	
118	117-118	TU23	1416.63	91.93	40.00
119	118-119	TU24	1386.31	128.93	
120	116-120	TU25	1405.43	103.73	40.00
121	120-121	TU26	1403.42	91.62	
122	121-122	TU27	1390.70	52.03	40.00
123	120-123	TU29	1401.02	76.12	
124	123-124	TU30	1383.80	103.12	
125	120-125	TU28	1406.17	90.05	
126	125-126	TU31	1395.98	107.12	40.00
127	126-127	TU32	1369.91	147.72	
128	127-128	TU33	1388.63	52.48	
129	127-129	TU34	1381.42	65.59	
130	129-130	TU35	1368.21	71.56	40.00
131	130-131	TU36	1378.92	116.24	40.00
132	129-132	TU37	1362.04	199.39	40.00
133	132-133	TU38	1368.26	68.86	40.00
134	132-134	TU39	1352.39	78.32	40.00
135	134-135	TU40	1376.54	114.72	
136	132-136	TU41	1377.50	43.52	
137	136-137	TU42	1375.79	47.80	
138	137-138	TU43	1333.91	190.34	
139	137-139	TU44	1362.74	160.97	40.00
140	139-140	TU45	1371.89	130.17	
141	137-141	TU46	1357.94	199.51	40.00
142	141-142	TU47	1363.42	149.68	40.00
143	141-143	TU48	1368.34	113.15	
144	141-144	TU49	1348.22	229.12	40.00
145	144-145	TU50	1325.03	195.25	40.00
146	144-146	TU51	1362.61	149.99	
147	144-147	TU52	1309.12	192.72	40.00
148	147-148	TU53	1347.12	189.37	
149	147-149	TU54	1346.26	184.62	40.00
150	149-150	TU55	1295.56	212.89	
151	149-151	TU56	1361.97	157.74	

---

Tabla B.6. Celdas para configurar la PNL

COSTO TOTAL \$ 21114.63										
Turno 1										
Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
			1540.00							
96	0-96	TU1	1491.80	37.57	25.00	125.93		310.68	1538.72	46.92
97	96-97	TU2	1483.34	37.57	95.82	125.85		1189.33	1533.79	50.45
98	97-98	TU3	1484.91	37.57	131.13	125.75		1625.08	1527.03	42.12
99	98-99	TU4	1481.62	37.57	30.00	123.75		360.21	1525.35	43.73
100	99-100	TU5	1476.70	37.57	56.94	121.77		662.15	1521.92	45.22
101	100-101	TU6	1446.25	33.35	124.78	110.37		1195.14	1512.18	65.93
102	101-102	TU7	1428.43	1.67	71.34	39.00		87.61	1508.42	79.99
103	102-103	TU8	1406.50	1.67	74.69	25.00	40.00	38.12	1475.12	68.62
104	101-104	TU9	1434.02	31.68	129.13	108.96		1205.82	1502.41	68.39
105	100-105	TU10	1473.82	4.22	112.95	70.16	40.00	442.21	1520.06	46.24
106	105-106	TU11	1432.03	2.08	127.42	43.47	40.00	193.88	1514.18	82.15
107	106-107	TU12	1419.16	0.81	38.00	40.81	40.00	51.04	1513.73	94.57
108	107-108	TU13	1372.42		162.40	40.81		218.13	1513.73	141.31
109	108-109	TU14	1353.80		97.45	39.66		123.70	1513.73	159.93
110	104-110	TU15	1424.05	31.68	81.85	108.66	40.00	760.16	1496.14	72.09
111	110-111	TU16	1412.69	3.69	142.12	39.92		182.76	1468.47	55.78
112	111-112	TU17	1409.03	3.69	80.11	38.14	40.00	94.13	1449.03	40.00
113	112-113	TU18	1403.74	3.07	28.61	36.02		30.03	1442.48	38.74
114	113-114	TU19	1388.48	3.07	90.00	36.02		94.45	1421.87	33.39
115	114-115	TU20	1355.60	3.07	78.38	36.02	40.00	82.26	1403.92	48.32
116	110-116	TU21	1414.36	27.42	129.12	104.18	40.00	1103.48	1486.82	72.46
117	116-117	TU22	1411.70	6.34	94.88	52.40		208.76	1473.59	61.89
118	117-118	TU23	1416.63	6.34	91.93	51.33	40.00	194.19	1459.44	42.81
119	118-119	TU24	1386.31	5.73	128.93	46.48	40.00	223.88	1432.73	46.42
120	116-120	TU25	1405.43	19.88	103.73	95.30		743.56	1480.41	74.98
121	120-121	TU26	1403.42	0.88	91.62	25.00	40.00	46.76	1467.56	64.14
122	121-122	TU27	1390.70		52.03	25.00		26.55	1467.56	76.86
123	120-123	TU29	1401.02	1.63	76.12	53.00	40.00	171.29	1479.53	78.51
124	123-124	TU30	1383.80	1.14	103.12	25.00	40.00	52.63	1456.42	72.62
125	120-125	TU28	1406.17	17.38	90.05	92.56		609.38	1475.39	69.22
126	125-126	TU31	1395.98	17.38	107.12	92.48		723.56	1469.40	73.42
127	126-127	TU32	1369.91	17.38	147.72	92.14		990.59	1460.98	91.07
128	127-128	TU33	1388.63	0.34	52.48	25.00	40.00	26.78	1459.60	70.97
129	127-129	TU34	1381.42	17.04	65.59	91.64		435.11	1457.28	75.86
130	129-130	TU35	1368.21	3.04	71.56	34.34	40.00	68.35	1437.07	68.86
131	130-131	TU36	1378.92		116.24	25.00		59.32	1437.07	58.15
132	129-132	TU37	1362.04	14.00	199.39	87.03		1194.72	1447.17	85.13
133	132-133	TU38	1368.26		68.86	25.00		35.14	1447.17	78.91
134	132-134	TU39	1352.39	1.12	78.32	26.73		45.60	1434.76	82.37
135	134-135	TU40	1376.54	1.12	114.72	26.72	40.00	66.75	1416.54	40.00
136	132-136	TU41	1377.50	12.88	43.52	84.34	40.00	245.08	1444.97	67.47
137	136-137	TU42	1375.79	12.88	47.80	84.34	40.00	269.19	1442.54	66.75
138	137-138	TU43	1333.91		190.34	41.42		263.24	1442.54	108.63
139	137-139	TU44	1362.74	1.25	160.97	28.86	40.00	109.11	1421.18	58.44
140	139-140	TU45	1371.89	0.60	130.17	25.00	40.00	66.43	1411.89	40.00
141	137-141	TU46	1357.94	10.13	199.51	78.34		971.07	1433.21	75.27
142	141-142	TU47	1363.42		149.68	32.84		130.90	1433.21	69.79
143	141-143	TU48	1368.34	0.80	113.15	25.00	40.00	57.74	1419.89	51.55
144	141-144	TU49	1348.22	9.33	229.12	74.05	40.00	997.82	1421.07	72.85



145	144-145	TU50	1325.03	3.34	195.25	38.29	40.00	231.25	1382.38	57.35
146	144-146	TU51	1362.61		149.99	25.00		76.55	1421.07	58.46
147	144-147	TU52	1309.12	5.30	192.72	63.99		629.20	1413.66	104.54
148	147-148	TU53	1347.12	0.91	189.37	27.91	40.00	120.10	1397.02	49.90
149	147-149	TU54	1346.26	4.39	184.62	59.17		516.27	1406.27	60.01
150	149-150	TU55	1295.56	2.32	212.89	30.48	40.00	160.65	1340.43	44.87
151	149-151	TU56	1361.97	2.07	157.74	48.40	40.00	296.73	1401.97	40.00

## Turno 2

Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
			1540.00							
96	0-96	TU1	1491.80	40.10	25.00			310.68	1538.56	46.76
97	96-97	TU2	1483.34	40.10	95.82		40.00	1189.33	1533.01	49.67
98	97-98	TU3	1484.91	39.09	131.13			1625.08	1525.73	40.82
99	98-99	TU4	1481.62	39.09	30.00			360.21	1523.93	42.31
100	99-100	TU5	1476.70	39.09	56.94			662.15	1520.24	43.54
101	100-101	TU6	1446.25	33.51	124.78		40.00	1195.14	1510.41	64.16
102	101-102	TU7	1428.43	0.76	71.34		40.00	87.61	1509.49	81.06
103	102-103	TU8	1406.50		74.69			38.12	1509.49	102.99
104	101-104	TU9	1434.02	32.55	129.13		40.00	1205.82	1500.15	66.13
105	100-105	TU10	1473.82	5.57	112.95			442.21	1517.18	43.36
106	105-106	TU11	1432.03	5.57	127.42			193.88	1482.53	50.50
107	106-107	TU12	1419.16	5.57	38.00		40.00	51.04	1468.51	49.35
108	107-108	TU13	1372.42	4.77	162.40		40.00	218.13	1423.42	51.00
109	108-109	TU14	1353.80	3.89	97.45		40.00	123.70	1401.93	48.13
110	104-110	TU15	1424.05	31.55	81.85			760.16	1493.93	69.88
111	110-111	TU16	1412.69	4.05	142.12		40.00	182.76	1461.19	48.50
112	111-112	TU17	1409.03	3.07	80.11			94.13	1447.26	38.23
113	112-113	TU18	1403.74	3.07	28.61			30.03	1440.71	36.97
114	113-114	TU19	1388.48	3.07	90.00			94.45	1420.10	31.62
115	114-115	TU20	1355.60	3.07	78.38		40.00	82.26	1402.15	46.55
116	110-116	TU21	1414.36	27.50	129.12			1103.48	1484.55	70.19
117	116-117	TU22	1411.70	6.57	94.88		40.00	208.76	1470.44	58.74
118	117-118	TU23	1416.63	5.73	91.93			194.19	1458.64	42.01
119	118-119	TU24	1386.31	5.73	128.93		40.00	223.88	1431.93	45.62
120	116-120	TU25	1405.43	20.93	103.73			743.56	1477.52	72.09
121	120-121	TU26	1403.42	1.10	91.62			46.76	1458.42	55.00
122	121-122	TU27	1390.70	1.10	52.03		40.00	26.55	1447.58	56.88
123	120-123	TU29	1401.02		76.12			171.29	1477.52	76.50
124	123-124	TU30	1383.80		103.12			52.63	1477.52	93.72
125	120-125	TU28	1406.17	19.83	90.05		40.00	609.38	1471.14	64.97
126	125-126	TU31	1395.98	19.36	107.12		40.00	723.56	1463.84	67.86
127	126-127	TU32	1369.91	18.56	147.72		40.00	990.59	1454.36	84.45
128	127-128	TU33	1388.63		52.48			26.78	1454.36	65.73
129	127-129	TU34	1381.42	17.55	65.59		40.00	435.11	1450.45	69.03
130	129-130	TU35	1368.21	0.60	71.56			68.35	1449.34	81.13
131	130-131	TU36	1378.92	0.60	116.24		40.00	59.32	1441.15	62.23
132	129-132	TU37	1362.04	16.43	199.39		40.00	1194.72	1436.95	74.91
133	132-133	TU38	1368.26		68.86			35.14	1436.95	68.69
134	132-134	TU39	1352.39	1.00	78.32		40.00	45.60	1426.95	74.56
135	134-135	TU40	1376.54		114.72			66.75	1426.95	50.41
136	132-136	TU41	1377.50	14.61	43.52			245.08	1434.18	56.68
137	136-137	TU42	1375.79	14.61	47.80			269.19	1431.13	55.34
138	137-138	TU43	1333.91	5.18	190.34		40.00	263.24	1373.91	40.00
139	137-139	TU44	1362.74	0.60	160.97			109.11	1425.35	62.61
140	139-140	TU45	1371.89	0.60	130.17		40.00	66.43	1416.06	44.17

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

141	137-141	TU46	1357.94	8.83	199.51			971.07	1423.83	65.89
142	141-142	TU47	1363.42	1.47	149.68		40.00	130.90	1409.53	46.11
143	141-143	TU48	1368.34		113.15			57.74	1423.83	55.49
144	141-144	TU49	1348.22	7.36	229.12			997.82	1415.93	67.71
145	144-145	TU50	1325.03		195.25			231.25	1415.93	90.90
146	144-146	TU51	1362.61	0.39	149.99		40.00	76.55	1410.87	48.26
147	144-147	TU52	1309.12	6.97	192.72		40.00	629.20	1403.76	94.64
148	147-148	TU53	1347.12	0.91	189.37		40.00	120.10	1387.12	40.00
149	147-149	TU54	1346.26	2.32	184.62			516.27	1401.40	55.14
150	149-150	TU55	1295.56	2.32	212.89		40.00	160.65	1335.56	40.00
151	149-151	TU56	1361.97		157.74			296.73	1401.40	39.43

**Turno 3**

Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
			1540.00	[l/s]						
96	0-96	TU1	1491.80	40.97	25.00		40.00	310.68	1538.50	46.70
97	96-97	TU2	1483.34	40.79	95.82			1189.33	1532.77	49.43
98	97-98	TU3	1484.91	40.79	131.13		40.00	1625.08	1524.91	40.00
99	98-99	TU4	1481.62	40.46	30.00		40.00	360.21	1522.99	41.37
100	99-100	TU5	1476.70	35.32	56.94		40.00	662.15	1519.93	43.23
101	100-101	TU6	1446.25	26.58	124.78			1195.14	1513.49	67.24
102	101-102	TU7	1428.43	1.67	71.34			87.61	1509.73	81.30
103	102-103	TU8	1406.50	1.67	74.69		40.00	38.12	1476.43	69.93
104	101-104	TU9	1434.02	24.91	129.13		40.00	1205.82	1507.19	73.17
105	100-105	TU10	1473.82	8.17	112.95		40.00	442.21	1513.82	40.00
106	105-106	TU11	1432.03	6.04	127.42		40.00	193.88	1473.76	41.73
107	106-107	TU12	1419.16	4.77	38.00			51.04	1463.21	44.05
108	107-108	TU13	1372.42	4.77	162.40		40.00	218.13	1418.12	45.70
109	108-109	TU14	1353.80	3.89	97.45		40.00	123.70	1396.63	42.83
110	104-110	TU15	1424.05	23.91	81.85			760.16	1503.43	79.38
111	110-111	TU16	1412.69	0.38	142.12			182.76	1502.94	90.25
112	111-112	TU17	1409.03	0.38	80.11			94.13	1502.60	93.57
113	112-113	TU18	1403.74	0.38	28.61		40.00	30.03	1502.43	98.69
114	113-114	TU19	1388.48	0.38	90.00		40.00	94.45	1501.93	113.45
115	114-115	TU20	1355.60		78.38			82.26	1501.93	146.33
116	110-116	TU21	1414.36	23.53	129.12			1103.48	1496.37	82.01
117	116-117	TU22	1411.70	0.61	94.88			208.76	1496.17	84.47
118	117-118	TU23	1416.63	0.61	91.93		40.00	194.19	1495.95	79.32
119	118-119	TU24	1386.31		128.93			223.88	1495.95	109.64
120	116-120	TU25	1405.43	22.93	103.73		40.00	743.56	1488.06	82.63
121	120-121	TU26	1403.42	1.10	91.62			46.76	1468.97	65.55
122	121-122	TU27	1390.70	1.10	52.03		40.00	26.55	1458.12	67.42
123	120-123	TU29	1401.02		76.12			171.29	1488.06	87.04
124	123-124	TU30	1383.80		103.12			52.63	1488.06	104.26
125	120-125	TU28	1406.17	21.48	90.05			609.38	1480.69	74.52
126	125-126	TU31	1395.98	21.48	107.12		40.00	723.56	1471.87	75.89
127	126-127	TU32	1369.91	20.68	147.72			990.59	1460.33	90.42
128	127-128	TU33	1388.63		52.48			26.78	1460.33	71.70
129	127-129	TU34	1381.42	20.68	65.59			435.11	1455.06	73.64
130	129-130	TU35	1368.21	3.63	71.56		40.00	68.35	1427.12	58.91
131	130-131	TU36	1378.92	0.60	116.24		40.00	59.32	1418.92	40.00
132	129-132	TU37	1362.04	17.04	199.39		40.00	1194.72	1440.62	78.58
133	132-133	TU38	1368.26	0.49	68.86		40.00	35.14	1437.17	68.91
134	132-134	TU39	1352.39	1.00	78.32		40.00	45.60	1430.62	78.23
135	134-135	TU40	1376.54		114.72			66.75	1430.62	54.08
136	132-136	TU41	1377.50	14.74	43.52			245.08	1437.81	60.31
137	136-137	TU42	1375.79	14.74	47.80			269.19	1434.71	58.92

138	137-138	TU43	1333.91		190.34		263.24	1434.71	100.80
139	137-139	TU44	1362.74	0.65	160.97	40.00	109.11	1427.99	65.25
140	139-140	TU45	1371.89		130.17		66.43	1427.99	56.10
141	137-141	TU46	1357.94	14.09	199.51	40.00	971.07	1417.72	59.78
142	141-142	TU47	1363.42	1.47	149.68	40.00	130.90	1403.42	40.00
143	141-143	TU48	1368.34		113.15		57.74	1417.72	49.38
144	141-144	TU49	1348.22	10.10	229.12	40.00	997.82	1403.72	55.50
145	144-145	TU50	1325.03	3.34	195.25	40.00	231.25	1365.03	40.00
146	144-146	TU51	1362.61		149.99		76.55	1403.72	41.11
147	144-147	TU52	1309.12	6.07	192.72	40.00	629.20	1394.25	85.13
148	147-148	TU53	1347.12		189.37		120.10	1394.25	47.13
149	147-149	TU54	1346.26	2.32	184.62	40.00	516.27	1391.88	45.62
150	149-150	TU55	1295.56		212.89		160.65	1391.88	96.32
151	149-151	TU56	1361.97		157.74		296.73	1391.88	29.91

**Tabla B7. Diseño hidráulico de la red Tuncarta, luego de implementar AG-PNL**

ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]
TU1	125.93	TU20	36.02	TU39	26.73
TU2	125.85	TU21	104.18	TU40	26.72
TU3	125.75	TU22	52.40	TU41	84.34
TU4	123.75	TU23	51.33	TU42	84.34
TU5	121.77	TU24	46.48	TU43	41.42
TU6	110.37	TU25	95.30	TU44	28.86
TU7	39.00	TU26	25.00	TU45	25.00
TU8	25.00	TU27	25.00	TU46	78.34
TU9	108.96	TU29	53.00	TU47	32.84
TU10	70.16	TU30	25.00	TU48	25.00
TU11	43.47	TU28	92.56	TU49	74.05
TU12	40.81	TU31	92.48	TU50	38.29
TU13	40.81	TU32	92.14	TU51	25.00
TU14	39.66	TU33	25.00	TU52	63.99
TU15	108.66	TU34	91.64	TU53	27.91
TU16	39.92	TU35	34.34	TU54	59.17
TU17	38.14	TU36	25.00	TU55	30.48
TU18	36.02	TU37	87.03	TU56	48.40
TU19	36.02	TU38	25.00		

**Tabla B.8. Resultados de asignación de turno con modelo AG-PNL en cada hidrante de la Red de Riego Tuncarta**

<b>Nudo</b>	<b>Turno</b>	<b>Q [L/s]</b>	<b>Nudo</b>	<b>Turno</b>	<b>Q [L/s]</b>	<b>Nudo</b>	<b>Turno</b>	<b>Q [L/s]</b>
96	3	0.18	117	2	0.84	75	1	0.56
97	2	1.01	118	3	0.61	137	1	0.75
98	3	0.33		1	0.61	78	1	0.75
99	3	5.13	119	2	5.73	138	2	2.59
100	3	0.57		1	5.73	81	2	2.59
101	2	0.21	120	3	0.35	139	3	0.65
102	2	0.76	121	1	0.88	84	1	0.65
103	3	1.67	122	3	1.10	140	2	0.60
25	1	1.67		2	1.10	87	1	0.60
104	2	0.99	123	1	0.48	141	3	1.26
28	3	0.99	124	1	0.57		3	1.26
105	1	2.14		1	0.57	142	2	1.47
31	3	2.14	125	2	0.47		3	1.47
106	1	1.27	126	2	0.80	143	1	0.80
34	3	1.27		3	0.80	144	3	0.70
107	1	0.81	127	2	1.01		1	0.70
38	2	0.81	128	1	0.34	145	3	3.34
108	3	0.88	129	2	0.53		1	3.34
41	2	0.88	130	1	3.04	146	2	0.39
109	2	3.89	57	3	3.04	147	2	3.74
40	3	3.89	131	2	0.60		3	3.74
110	1	0.57	60	3	0.60	148	1	0.91
111	2	0.98	132	3	0.82		2	0.91
112	1	0.62	65	2	0.82	149	3	2.32
114	3	0.38	133	3	0.49	150	1	2.32
115	2	3.07	134	2	1.00		2	2.32
	1	3.07	69	3	1.00	151	1	1.03
116	1	1.19	135	1	0.56		1	1.03

**Tabla B.9. Resultados de cumplimiento de la Fiabilidad de presión por hidrante de la red de Riego Tuncarta**

Nro. Hid.	ID NUDO	$N_E$	$FP_n$	Nro. Hid.	ID NUDO	$N_E$	$FP_n$	Nro. Hid.	ID NUDO	$N_E$	$FP_n$
1	CC1	60	1.00	29	CC29	58	1.00	57	CC57	44	1.00
2	CC2	57	1.00	30	CC30	63	1.00	58	CC58	61	1.00
3	CC3	48	1.00	31	CC31	64	1.00	59	CC59	48	1.00
4	CC4	52	1.00	32	CC32	48	1.00	60	CC60	61	1.00
5	CC5	63	1.00	33	CC33	48	1.00	61	CC61	51	1.00
6	CC12	42	1.00	34	CC34	63	1.00	62	CC62	49	1.00
7	CC13	45	1.00	35	CC38	45	1.00	63	CC63	43	1.00
8	CC14	47	1.00	36	CC39	75	1.00	64	CC64	45	1.00
9	CC15	60	1.00	37	CC40	56	1.00	65	CC65	42	1.00
10	CC16	64	1.00	38	CC41	79	1.00	66	CC66	61	1.00
11	CC17	67	1.00	39	CC35	41	1.00	67	CC67	58	1.00
12	CC18	59	1.00	40	CC36	39	1.00	68	CC68	44	1.00
13	CC19	61	1.00	41	CC37	34	1.00	69	CC69	45	1.00
14	CC20	56	1.00	42	CC42	58	1.00	70	CC70	61	1.00
15	CC21	39	1.00	43	CC43	68	1.00	71	CC71	49	1.00
16	CC6	61	1.00	44	CC44	72	1.00	72	CC72	61	1.00
17	CC7	76	1.00	45	CC45	52	1.00	73	CC73	13	1.00
18	CC8	50	1.00	46	CC46	50	1.00	74	CC74	18	1.00
19	CC9	37	1.00	47	CC47	47	1.00	75	CC75	70	1.00
20	CC10	59	1.00	48	CC48	52	1.00	76	CC76	37	1.00
21	CC11	43	1.00	49	CC49	43	1.00	77	CC77	42	1.00
22	CC22	58	1.00	50	CC50	59	1.00	78	CC80	38	1.00
23	CC23	71	1.00	51	CC51	67	1.00	79	CC81	31	1.00
24	CC24	63	1.00	52	CC52	59	1.00	80	CC82	23	1.00
25	CC25	48	1.00	53	CC53	62	1.00	81	CC83	65	1.00
26	CC26	29	1.00	54	CC54	37	1.00	82	CC84	58	0.98
27	CC27	26	1.00	55	CC55	53	1.00	83	CC78	59	0.95
28	CC28	79	1.00	56	CC56	62	1.00	84	CC79	50	0.94

$\Sigma$	83.87
$IFCT$	1.00

**Tabla B.10. Simulación de  $N_T$  y Flexibilidad. Red Tuncarta**

$N_T$	Flexibilidad
100	0.94
500	0.94
1000	0.94
1500	0.94

## C) Ejemplo de implementación Cariyacu

### Características topológicas de la red

**Tabla C.1. ID Nudos y cotas. Caso RCRP “Cariyacu”**

ID Nudo	Cota [m]	ID Nudo	Cota [m]	ID Nudo	Cota [m]
200	2597.00	217	2534.00	234	2525.00
201	2573.00	218	2532.00	235	2516.00
202	2562.00	219	2521.00	236	2510.00
203	2569.00	220	2564.00	237	2556.00
204	2562.00	221	2556.00	238	2548.00
205	2568.00	222	2548.00	239	2538.00
206	2561.00	223	2542.00	240	2534.00
207	2548.00	224	2558.00	241	2531.00
208	2567.00	225	2555.00	242	2526.00
209	2558.00	226	2545.00	243	2516.00
210	2548.00	227	2536.00	244	2506.00
211	2537.00	228	2520.00	245	2514.00
212	2566.00	229	2557.00	246	2555.00
213	2558.00	230	2554.00	247	2554.00
214	2549.00	231	2547.00	248	2544.00
215	2544.00	232	2540.00	249	2535.00
216	2535.00	233	2533.00		

**Tabla C.2. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Cariyacu”**

Nin-Nfin	ID Linea	Longitud [m]	Nin-Nfin	ID Linea	Longitud [m]	Nin-Nfin	ID Linea	Longitud [m]
200-201	TU1	126.00	217-218	TU18	40.05	234-235	TU35	65.62
201-202	TU2	41.48	218-219	TU19	75.80	235-236	TU36	80.22
201-203	TU3	58.14	212-220	TU20	72.03	229-237	TU37	120.00
203-204	TU4	40.61	220-221	TU21	40.79	237-238	TU38	76.42
203-205	TU5	82.01	221-222	TU22	80.4	238-239	TU39	80.62
205-206	TU6	40.61	222-223	TU23	80.22	239-240	TU40	80.10
206-207	TU7	81.06	220-224	TU24	110.00	240-241	TU41	50.09
205-208	TU8	82.01	224-225	TU25	40.11	241-242	TU42	66.19
208-209	TU9	41.00	225-226	TU26	80.62	242-243	TU43	80.62
209-210	TU10	80.62	226-227	TU27	80.50	243-244	TU44	63.79
210-211	TU11	110.55	227-228	TU28	130.98	241-245	TU45	36.35
208-212	TU12	114.00	224-229	TU29	70.01	237-246	TU46	110.00
212-213	TU13	40.79	229-230	TU30	40.11	246-247	TU47	40.01
213-214	TU14	80.44	230-231	TU31	80.31	247-248	TU48	80.62
214-215	TU15	80.22	231-232	TU32	80.31	248-249	TU49	80.50
215-216	TU16	84.48	232-233	TU33	80.31			
216-217	TU17	40.01	233-234	TU34	65.49			

Tabla C.3. Valores de demanda en hidrantes. Caso RCRP “Cariyacu”

ID Nudo	ID Hidrante	Dot. [L/s]	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. [L/s]	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. [L/s]
202	CC1	0.44						
	CC2	0.48	219	CC23	0.68	233	CC45	0.25
204	CC3	0.48		CC24	0.68		CC46	0.25
	CC4	0.37	221	CC25	0.28	235	CC47	0.51
206	CC5	0.37		CC26	0.28		CC48	0.69
	CC6	0.20	222	CC27	0.30	236	CC49	0.69
207	CC7	0.20		CC28	0.30		CC50	0.75
	CC8	0.46	223	CC29	0.46	238	CC51	0.75
209	CC9	0.46		CC30	0.46		CC52	0.50
	CC10	0.39	225	CC31	0.55	239	CC53	0.50
210	CC11	0.39		CC32	0.55		CC54	0.44
	CC12	0.25	226	CC33	0.49	240	CC55	0.44
211	CC13	0.25		CC34	0.49		CC56	0.67
	CC14	0.39	227	CC35	0.64	242	CC57	0.80
213	CC15	0.39		CC36	0.64		CC58	0.36
	CC16	0.41	228	CC37	0.51	244	CC59	0.36
214	CC17	0.41		CC38	0.51		CC60	0.57
	CC18	0.40	230	CC39	0.30	245	CC61	0.57
215	CC19	0.40		CC40	0.30		CC62	0.49
	CC20	0.59	231	CC41	0.29	247	CC63	0.49
216	CC21	0.73		CC42	0.29		CC64	0.39
	CC22	0.79	232	CC43	0.31	248	CC65	0.39
				CC44	0.31		CC66	0.42
						249	CC67	0.42

Tabla C.4. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Cariyacu”

ID Nudo	ID Hidrante	ASIG. TURNO	DOTAC. [L/S]	Q TT1	Q TT2	SQTT
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
202	CC1	1	0.44	14.71	15.85	30.56
	CC2	2	0.48			
204	CC3	1	0.48			
	CC4	1	0.37			
206	CC5	2	0.37			
	CC6	1	0.20			
207	CC7	2	0.20			
	CC8	2	0.46			
209	CC9	1	0.46			
				<b>Costo 9305.5 \$</b>		

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

210	CC10	2	0.39	0.00	0.39
	CC11	2	0.39	0.00	0.39
211	CC12	1	0.25	0.25	0.00
	CC13	2	0.25	0.00	0.25
213	CC14	2	0.39	0.00	0.39
	CC15	2	0.39	0.00	0.39
214	CC16	1	0.41	0.41	0.00
	CC17	1	0.41	0.41	0.00
215	CC18	1	0.40	0.40	0.00
	CC19	1	0.40	0.40	0.00
216	CC20	1	0.59	0.59	0.00
217	CC21	1	0.73	0.73	0.00
218	CC22	2	0.79	0.00	0.79
219	CC23	2	0.68	0.00	0.68
	CC24	2	0.68	0.00	0.68
221	CC25	1	0.28	0.28	0.00
	CC26	1	0.28	0.28	0.00
222	CC27	2	0.30	0.00	0.30
	CC28	1	0.30	0.30	0.00
223	CC29	1	0.46	0.46	0.00
	CC30	2	0.46	0.00	0.46
225	CC31	2	0.55	0.00	0.55
	CC32	1	0.55	0.55	0.00
226	CC33	1	0.49	0.49	0.00
	CC34	2	0.49	0.00	0.49
227	CC35	2	0.64	0.00	0.64
	CC36	2	0.64	0.00	0.64
228	CC37	2	0.51	0.00	0.51
	CC38	1	0.51	0.51	0.00
230	CC39	1	0.30	0.30	0.00
	CC40	2	0.30	0.00	0.30
231	CC41	2	0.29	0.00	0.29
	CC42	1	0.29	0.29	0.00
232	CC43	1	0.31	0.31	0.00
	CC44	2	0.31	0.00	0.31
233	CC45	1	0.25	0.25	0.00
	CC46	2	0.25	0.00	0.25
235	CC47	2	0.51	0.00	0.51
236	CC48	1	0.69	0.69	0.00
	CC49	2	0.69	0.00	0.69
238	CC50	1	0.75	0.75	0.00
	CC51	2	0.75	0.00	0.75
239	CC52	1	0.50	0.50	0.00
	CC53	1	0.50	0.50	0.00
240	CC54	2	0.44	0.00	0.44
	CC55	2	0.44	0.00	0.44
242	CC56	2	0.67	0.00	0.67
243	CC57	1	0.80	0.80	0.00
244	CC58	2	0.36	0.00	0.36
	CC59	1	0.36	0.36	0.00
245	CC60	1	0.57	0.57	0.00
	CC61	2	0.57	0.00	0.57
247	CC62	1	0.49	0.49	0.00
	CC63	1	0.49	0.49	0.00
248	CC64	2	0.39	0.00	0.39
	CC65	1	0.39	0.39	0.00
249	CC66	2	0.42	0.00	0.42
	CC67	2	0.42	0.00	0.42



**Tabla C.5. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Cariyacu”****Datos generales**Viscosidad cinemática 0,000001 m<sup>2</sup>/s

Rugosidad absoluta 7,00E-03 mm

Curva de costo de la tubería

Coeficiente A 745

Exponente a 1,975

Viscosidad dinámica 1,00E-03 kg/m.s

**Turno 1**

ID Nudo	Nin-Nfin	ID Línea	Cota [m]	Longitud [m]	Pmin [mca]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
200			2597.00		
201	200-201	TU1	2573.00	126.00	23.00
202	201-202	TU2	2562.00	41.48	23.00
203	201-203	TU3	2569.00	58.14	23.00
204	203-204	TU4	2562.00	40.61	23.00
205	203-205	TU5	2568.00	82.01	23.00
206	205-206	TU6	2561.00	40.61	23.00
207	206-207	TU7	2548.00	81.06	23.00
208	205-208	TU8	2567.00	82.01	23.00
209	208-209	TU9	2558.00	41.00	23.00
210	209-210	TU10	2548.00	80.62	
211	210-211	TU11	2537.00	110.55	23.00
212	208-212	TU12	2566.00	114.00	
213	212-213	TU13	2558.00	40.79	
214	213-214	TU14	2549.00	80.44	23.00
215	214-215	TU15	2544.00	80.22	23.00
216	215-216	TU16	2535.00	84.48	23.00
217	216-217	TU17	2534.00	40.01	23.00
218	217-218	TU18	2532.00	40.05	
219	218-219	TU19	2521.00	75.80	
220	212-220	TU20	2564.00	72.03	23.00
221	220-221	TU21	2556.00	40.79	23.00
222	221-222	TU22	2548.00	80.40	23.00
223	222-223	TU23	2542.00	80.22	23.00
224	220-224	TU24	2558.00	110.00	23.00
225	224-225	TU25	2555.00	40.11	23.00
226	225-226	TU26	2545.00	80.62	23.00
227	226-227	TU27	2536.00	80.50	
228	227-228	TU28	2520.00	130.98	23.00
229	224-229	TU29	2557.00	70.01	23.00
230	229-230	TU30	2554.00	40.11	23.00

231	230-231	TU31	2547.00	80.31	23.00
232	231-232	TU32	2540.00	80.31	23.00
233	232-233	TU33	2533.00	80.31	23.00
234	233-234	TU34	2525.00	65.49	
235	234-235	TU35	2516.00	65.62	
236	235-236	TU36	2510.00	80.22	23.00
237	229-237	TU37	2556.00	120.00	23.00
238	237-238	TU38	2548.00	76.42	23.00
239	238-239	TU39	2538.00	80.62	23.00
240	239-240	TU40	2534.00	80.10	
241	240-241	TU41	2531.00	50.09	
242	241-242	TU42	2526.00	66.19	
243	242-243	TU43	2516.00	80.62	23.00
244	243-244	TU44	2506.00	63.79	23.00
245	241-245	TU45	2514.00	36.35	23.00
246	237-246	TU46	2555.00	110.00	23.00
247	246-247	TU47	2554.00	40.01	23.00
248	247-248	TU48	2544.00	80.62	23.00
249	248-249	TU49	2535.00	80.50	

<b>Turno 2</b>					
<b>ID Nudo</b>	<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Cota [m]</b>	<b>Longitud [m]</b>	<b>Pmin [mca]</b>
<b>[1]</b>	<b>[2]</b>	<b>[3]</b>	<b>[4]</b>	<b>[5]</b>	<b>[6]</b>
200			2597.00		
201	200-201	TU1	2573.00	126.00	
202	201-202	TU2	2562.00	41.48	
203	201-203	TU3	2569.00	58.14	23.00
204	203-204	TU4	2562.00	40.61	23.00
205	203-205	TU5	2568.00	82.01	23.00
206	205-206	TU6	2561.00	40.61	23.00
207	206-207	TU7	2548.00	81.06	23.00
208	205-208	TU8	2567.00	82.01	23.00
209	208-209	TU9	2558.00	41.00	23.00
210	209-210	TU10	2548.00	80.62	23.00
211	210-211	TU11	2537.00	110.55	23.00
212	208-212	TU12	2566.00	114.00	23.00
213	212-213	TU13	2558.00	40.79	23.00
214	213-214	TU14	2549.00	80.44	
215	214-215	TU15	2544.00	80.22	
216	215-216	TU16	2535.00	84.48	
217	216-217	TU17	2534.00	40.01	
218	217-218	TU18	2532.00	40.05	23.00
219	218-219	TU19	2521.00	75.80	23.00
220	212-220	TU20	2564.00	72.03	
221	220-221	TU21	2556.00	40.79	

222	221-222	TU22	2548.00	80.40	23.00
223	222-223	TU23	2542.00	80.22	23.00
224	220-224	TU24	2558.00	110.00	23.00
225	224-225	TU25	2555.00	40.11	23.00
226	225-226	TU26	2545.00	80.62	23.00
227	226-227	TU27	2536.00	80.50	23.00
228	227-228	TU28	2520.00	130.98	23.00
229	224-229	TU29	2557.00	70.01	23.00
230	229-230	TU30	2554.00	40.11	23.00
231	230-231	TU31	2547.00	80.31	23.00
232	231-232	TU32	2540.00	80.31	23.00
233	232-233	TU33	2533.00	80.31	23.00
234	233-234	TU34	2525.00	65.49	23.00
235	234-235	TU35	2516.00	65.62	23.00
236	235-236	TU36	2510.00	80.22	23.00
237	229-237	TU37	2556.00	120.00	23.00
238	237-238	TU38	2548.00	76.42	23.00
239	238-239	TU39	2538.00	80.62	
240	239-240	TU40	2534.00	80.10	23.00
241	240-241	TU41	2531.00	50.09	23.00
242	241-242	TU42	2526.00	66.19	23.00
243	242-243	TU43	2516.00	80.62	
244	243-244	TU44	2506.00	63.79	23.00
245	241-245	TU45	2514.00	36.35	23.00
246	237-246	TU46	2555.00	110.00	
247	246-247	TU47	2554.00	40.01	
248	247-248	TU48	2544.00	80.62	23.00
249	248-249	TU49	2535.00	80.50	23.00

Tabla C.6. Celdas para configurar la PNL

COSTO TOTAL \$ 9305.47										
Turno 1										
Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
200			2597.00							
201	200-201	TU1	2573.00	14.71	126.00	130.79		1709.72	2596.00	23.00
202	201-202	TU2	2562.00	0.44	41.48	21.59	23.00	15.72	2592.40	30.40
203	201-203	TU3	2569.00	14.27	58.14	109.68		556.05	2594.98	25.98
204	203-204	TU4	2562.00	0.48	40.61	22.49	23.00	16.68	2591.59	29.59
205	203-205	TU5	2568.00	13.78	82.01	108.71		770.62	2593.56	25.56
206	205-206	TU6	2561.00	0.57	40.61	23.85	23.00	18.76	2590.13	29.13
207	206-207	TU7	2548.00	0.20	81.06	20.00	23.00	26.38	2587.56	39.56
208	205-208	TU8	2567.00	13.21	82.01	107.53		754.14	2592.18	25.18
209	208-209	TU9	2558.00	0.71	41.00	28.98	23.00	27.88	2590.17	32.17

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

210	209-210	TU10	2548.00	0.25	80.62	26.26		45.08	2589.18	41.18
211	210-211	TU11	2537.00	0.25	110.55	20.00	23.00	35.98	2584.19	47.19
212	208-212	TU12	2566.00	12.50	114.00	105.01		1000.08	2590.23	24.23
213	212-213	TU13	2558.00	2.94	40.79	45.40		67.64	2587.29	29.29
214	213-214	TU14	2549.00	2.94	80.44	44.76	23.00	129.71	2581.09	32.09
215	214-215	TU15	2544.00	2.12	80.22	42.00	23.00	114.00	2576.44	32.44
216	215-216	TU16	2535.00	1.32	84.48	36.27	23.00	89.70	2572.19	37.19
217	216-217	TU17	2534.00	0.73	40.01	34.88	23.00	39.31	2571.35	37.35
218	217-218	TU18	2532.00		40.05	33.75		36.86	2571.35	39.35
219	218-219	TU19	2521.00		75.80	29.42		53.09	2571.35	50.35
220	212-220	TU20	2564.00	9.56	72.03	87.01	23.00	434.98	2588.35	24.35
221	220-221	TU21	2556.00	1.33	40.79	33.60	23.00	37.20	2585.34	29.34
222	221-222	TU22	2548.00	0.76	80.40	29.63	23.00	57.13	2581.34	33.34
223	222-223	TU23	2542.00	0.46	80.22	26.53	23.00	45.77	2578.60	36.60
224	220-224	TU24	2558.00	8.23	110.00	83.58	23.00	613.16	2585.69	27.69
225	224-225	TU25	2555.00	1.55	40.11	39.47	23.00	50.38	2583.90	28.90
226	225-226	TU26	2545.00	1.00	80.62	36.86	23.00	88.39	2581.62	36.62
227	226-227	TU27	2536.00	0.51	80.50	34.38		76.84	2580.65	44.65
228	227-228	TU28	2520.00	0.51	130.98	22.95	23.00	56.03	2569.64	49.64
229	224-229	TU29	2557.00	6.68	70.01	78.66	23.00	345.95	2584.14	27.14
230	229-230	TU30	2554.00	1.83	40.11	39.47	23.00	50.37	2581.73	27.73
231	230-231	TU31	2547.00	1.53	80.31	37.85	23.00	92.81	2577.46	30.46
232	231-232	TU32	2540.00	1.24	80.31	36.09	23.00	84.42	2573.75	33.75
233	232-233	TU33	2533.00	0.93	80.31	33.20	23.00	71.51	2570.44	37.44
234	233-234	TU34	2525.00	0.69	65.49	29.00		44.60	2567.44	42.44
235	234-235	TU35	2516.00	0.69	65.62	29.00		44.69	2564.43	48.43
236	235-236	TU36	2510.00	0.69	80.22	28.99	23.00	54.60	2560.75	50.75
237	229-237	TU37	2556.00	4.85	120.00	72.06	23.00	498.34	2581.86	25.86
238	237-238	TU38	2548.00	3.48	76.42	48.28	23.00	143.19	2576.32	28.32
239	238-239	TU39	2538.00	2.73	80.62	44.69	23.00	129.60	2570.85	32.85
240	239-240	TU40	2534.00	1.73	80.10	40.14		104.03	2566.86	32.86
241	240-241	TU41	2531.00	1.73	50.09	40.16		65.12	2564.37	33.37
242	241-242	TU42	2526.00	1.16	66.19	36.29		70.37	2561.74	35.74
243	242-243	TU43	2516.00	1.16	80.62	36.28	23.00	85.63	2558.53	42.53
244	243-244	TU44	2506.00	0.36	63.79	22.45	23.00	26.11	2555.32	49.32
245	241-245	TU45	2514.00	0.57	36.35	21.80	23.00	14.04	2559.71	45.71
246	237-246	TU46	2555.00	1.37	110.00	52.54	23.00	243.83	2580.87	25.87
247	246-247	TU47	2554.00	1.37	40.01	47.34	23.00	72.13	2580.28	26.28
248	247-248	TU48	2544.00	0.39	80.62	28.58	23.00	53.34	2578.82	34.82
249	248-249	TU49	2535.00		80.50	25.81		43.49	2578.82	43.82

**Turno 2**

Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
200			2597.00							
201	200-201	TU1	2573.00	15.86	126.00			1709.72	2595.85	22.85
202	201-202	TU2	2562.00		41.48			15.72	2595.85	33.85
203	201-203	TU3	2569.00	15.86	58.14			556.05	2594.61	25.61
204	203-204	TU4	2562.00	0.48	40.61		23.00	16.68	2591.23	29.23
205	203-205	TU5	2568.00	15.37	82.01			770.62	2592.88	24.88
206	205-206	TU6	2561.00	0.57	40.61		23.00	18.76	2589.45	28.45
207	206-207	TU7	2548.00	0.20	81.06		23.00	26.38	2586.88	38.88
208	205-208	TU8	2567.00	14.80	82.01			754.14	2591.18	24.18
209	208-209	TU9	2558.00	1.50	41.00		23.00	27.88	2583.50	25.50
210	209-210	TU10	2548.00	1.04	80.62		23.00	45.08	2571.00	23.00
211	210-211	TU11	2537.00	0.25	110.55		23.00	35.98	2566.01	29.01
212	208-212	TU12	2566.00	13.30	114.00		23.00	1000.08	2589.00	23.00

213	212-213	TU13	2558.00	2.92	40.79	23.00	67.64	2586.10	28.10
214	213-214	TU14	2549.00	2.14	80.44		129.71	2582.60	33.60
215	214-215	TU15	2544.00	2.14	80.22		114.00	2577.86	33.86
216	215-216	TU16	2535.00	2.14	84.48		89.70	2567.68	32.68
217	216-217	TU17	2534.00	2.14	40.01		39.31	2561.85	27.85
218	217-218	TU18	2532.00	2.14	40.05	23.00	36.86	2555.00	23.00
219	218-219	TU19	2521.00	1.36	75.80	23.00	53.09	2544.00	23.00
220	212-220	TU20	2564.00	10.38	72.03		434.98	2586.82	22.82
221	220-221	TU21	2556.00	0.76	40.79		37.20	2585.71	29.71
222	221-222	TU22	2548.00	0.76	80.40	23.00	57.13	2581.71	33.71
223	222-223	TU23	2542.00	0.46	80.22	23.00	45.77	2578.97	36.97
224	220-224	TU24	2558.00	9.61	110.00	23.00	613.16	2583.29	25.29
225	224-225	TU25	2555.00	2.82	40.11	23.00	50.38	2578.00	23.00
226	225-226	TU26	2545.00	2.27	80.62	23.00	88.39	2568.02	23.02
227	226-227	TU27	2536.00	1.78	80.50	23.00	76.84	2559.00	23.00
228	227-228	TU28	2520.00	0.51	130.98	23.00	56.03	2548.00	28.00
229	224-229	TU29	2557.00	6.79	70.01	23.00	345.95	2581.69	24.69
230	229-230	TU30	2554.00	2.34	40.11	23.00	50.37	2577.92	23.92
231	230-231	TU31	2547.00	2.04	80.31	23.00	92.81	2570.71	23.71
232	231-232	TU32	2540.00	1.76	80.31	23.00	84.42	2563.80	23.80
233	232-233	TU33	2533.00	1.45	80.31	23.00	71.51	2556.51	23.51
234	233-234	TU34	2525.00	1.20	65.49	23.00	44.60	2548.34	23.34
235	234-235	TU35	2516.00	1.20	65.62	23.00	44.69	2540.16	24.16
236	235-236	TU36	2510.00	0.69	80.22	23.00	54.60	2536.48	26.48
237	229-237	TU37	2556.00	4.45	120.00	23.00	498.34	2579.74	23.74
238	237-238	TU38	2548.00	3.22	76.42	23.00	143.19	2574.92	26.92
239	238-239	TU39	2538.00	2.47	80.62		129.60	2570.35	32.35
240	239-240	TU40	2534.00	2.47	80.10	23.00	104.03	2562.70	28.70
241	240-241	TU41	2531.00	1.60	50.09	23.00	65.12	2560.54	29.54
242	241-242	TU42	2526.00	1.03	66.19	23.00	70.37	2558.41	32.41
243	242-243	TU43	2516.00	0.36	80.62		85.63	2558.00	42.00
244	243-244	TU44	2506.00	0.36	63.79	23.00	26.11	2554.79	48.79
245	241-245	TU45	2514.00	0.57	36.35	23.00	14.04	2555.88	41.88
246	237-246	TU46	2555.00	1.23	110.00		243.83	2578.92	23.92
247	246-247	TU47	2554.00	1.23	40.01		72.13	2578.43	24.43
248	247-248	TU48	2544.00	1.23	80.62	23.00	53.34	2567.19	23.19
249	248-249	TU49	2535.00	0.84	80.50	23.00	43.49	2558.00	23.00

**Tabla C.7. Diseño hidráulico de la Red Cariyacu, luego de implementar AG-PNL**

ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]
		TU25	39.47
TU1	130.79	TU26	36.86
TU2	21.59	TU27	34.38
TU3	109.68	TU28	22.95
TU4	22.49	TU29	78.66
TU5	108.71	TU30	39.47
TU6	23.85	TU31	37.85
TU7	20.00	TU32	36.09
TU8	107.53	TU33	33.20
TU9	28.98	TU34	29.00

TU10	26.26	TU35	29.00
TU11	20.00	TU36	28.99
TU12	105.01	TU37	72.06
TU13	45.40	TU38	48.28
TU14	44.76	TU39	44.69
TU15	42.00	TU40	40.14
TU16	36.27	TU41	40.16
TU17	34.88	TU42	36.29
TU18	33.75	TU43	36.28
TU19	29.42	TU44	22.45
TU20	87.01	TU45	21.80
TU21	33.60	TU46	52.54
TU22	29.63	TU47	47.34
TU23	26.53	TU48	28.58
TU24	83.58	TU49	25.81

**Tabla C.8. Resultados de asignación de turno con modelo AG-PNL en cada hidrante de la Red de Riego Cariyacu**

Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]
2	1	0.44	21	1	0.29	36	2	0.69
4	2	0.48	21	1	0.29	36	1	0.69
6	2	0.37	22	2	0.30	38	1	0.75
7	2	0.37	22	2	0.30	38	1	0.75
7	2	0.20	23	2	0.46	39	2	0.50
9	2	0.46	23	1	0.46	39	2	0.50
10	2	0.39	25	1	0.55	40	2	0.44
11	1	0.25	25	1	0.55	40	2	0.44
11	2	0.25	26	2	0.49	42	1	0.67
13	1	0.39	26	2	0.49	43	2	0.80
14	2	0.41	27	2	0.64	43	2	0.80
14	2	0.41	27	1	0.64	44	2	0.36
15	2	0.40	28	1	0.64	44	1	0.36
16	1	0.40	28	2	0.51	45	2	0.57
17	2	0.73	28	1	0.51	45	1	0.57
18	1	0.79	30	1	0.30	47	1	0.49
19	2	0.68	30	1	0.30	47	1	0.49
19	1	0.68	31	2	0.29	48	2	0.39
			31	2	0.29	48	2	0.39
			32	1	0.31	49	2	0.42
			32	2	0.31	49	2	0.42
			33	2	0.25			
			33	1	0.25			
			35	2	0.51			

**Tabla C.9. Resultados de cumplimiento de la Fiabilidad de presión por hidrante de la Red de Riego Cariyacu**

Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>	Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>	Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>
1	CC1	436	1.00	24	CC32	472	0.89	47	CC21	469	0.68
2	CC8	429	1.00	25	CC39	470	0.88	48	CC60	309	0.67
3	CC9	460	1.00	26	CC33	481	0.87	49	CC56	463	0.66
4	CC10	511	1.00	27	CC34	497	0.86	50	CC13	499	0.66
5	CC11	464	1.00	28	CC50	465	0.86	51	CC57	483	0.65
6	CC66	478	1.00	29	CC28	456	0.83	52	CC22	456	0.63
7	CC67	468	1.00	30	CC51	309	0.82	53	CC12	459	0.63
8	CC26	501	0.99	31	CC27	477	0.82	54	CC7	435	0.62
9	CC25	484	0.99	32	CC45	462	0.81	55	CC6	405	0.59
10	CC64	455	0.97	33	CC46	487	0.80	56	CC30	495	0.55
11	CC53	464	0.97	34	CC59	405	0.79	57	CC48	498	0.54
12	CC52	430	0.96	35	CC54	504	0.77	58	CC37	501	0.52
13	CC65	449	0.96	36	CC58	428	0.76	59	CC2	501	0.51
14	CC16	502	0.95	37	CC55	493	0.76	60	CC29	444	0.50
15	CC17	474	0.94	38	CC20	476	0.74	61	CC3	466	0.48
16	CC15	473	0.93	39	CC47	479	0.73	62	CC38	455	0.47
17	CC14	486	0.92	40	CC44	419	0.71	63	CC4	429	0.45
18	CC35	477	0.91	41	CC43	459	0.71	64	CC49	425	0.45
19	CC18	478	0.91	42	CC23	469	0.71	65	CC5	444	0.45
20	CC36	477	0.91	43	CC42	436	0.71	66	CC62	458	0.45
21	CC19	479	0.90	44	CC41	461	0.70	67	CC63	472	0.44
22	CC40	460	0.89	45	CC24	472	0.69				
23	CC31	481	0.89	46	CC61	330	0.68				
										Σ	51.44
										IFCT	0.77

**Tabla C.10. Simulación de N<sub>T</sub> y Flexibilidad. Red Cariyacu**

N <sub>T</sub>	Flexibilidad
100	0.79
200	0.77
300	0.77
400	0.79
500	0.78
600	0.78
700	0.77
800	0.77
900	0.78
1000	0.78
1100	0.78
1200	0.77
1300	0.77
1400	0.77
1500	0.77
1600	0.77
1700	0.77
1800	0.77
1900	0.78
2000	0.77

## D) Ejemplo de implementación Valcuerna

### Características topológicas de la red

Tabla D.1. ID Nudos y cotas. Caso RCRP  
"Valcuerna"

ID Nudo	Cota (m)	ID Nudo	Cota (m)	ID Nudo	Cota (m)
	399.00	24	263.30	44	276.94
801	369.08	25	262.43	45	262.45
802	365.63	26	262.93	46	263.11
803	367.00	27	257.30	47	261.93
804	353.90	28	322.48	48	261.81
1	340.59	29	323.76	49	260.95
805	325.98	810	323.30	50	252.25
2	327.17	30	312.20	51	275.34
806	326.01	811	310.80	52	254.56
3	330.47	812	300.15	53	274.56
4	332.88	31	298.80	54	269.58
5	320.61	32	299.21	823	265.95
6	322.21	813	297.40	824	259.20
7	310.94	33	296.06	825	274.26
8	300.04	34	295.27	55	286.47
807	300.93	35	294.84	826	277.28
9	301.41	814	289.30	57	294.93
10	298.60	815	287.50	56	276.20
11	291.04	816	289.80	827	255.45
12	278.19	817	297.30	58	250.52
808	276.85	36	300.36	59	250.52
13	290.45	37	299.26	828	254.44
14	296.92	818	318.64	60	256.83
15	302.71	38	302.16	829	246.10
16	321.44	819	275.90	61	242.04
17	330.47	39	278.08	62	246.47
809	310.98	40	281.77	63	233.40
18	313.68	41	278.63	830	240.30
19	276.85	820	272.40	64	237.49
20	279.71	821	265.60	65	241.56
21	271.62	42	263.10	66	233.40
22	266.24	822	272.40	67	249.91
23	264.38	43	272.40		



**Tabla D.2. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Valcuerna”**

<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Longitud (m)</b>
801	T1	618.72	23-24	T33	150.00	822-44	T66	73.00
801-802	T2	376.29	24-25	T34	194.00	44-45	T67	330.00
802-803	T3	932.00	25-26	T35	707.00	45-46	T68	562.00
803-804	T4	3305.00	26-27	T36	613.00	46-47	T69	210.00
804-1	T5	20.00	805-28	T37	660.00	47-48	T70	128.00
804-805	T6	857.00	28-29	T38	361.00	48-49	T71	129.00
805-2	T7	706.00	29-810	T39	900.00	49-50	T72	122.00
2-806	T8	123.00	810-30	T40	558.00	48-51	T73	382.00
806-3	T9	161.00	30-811	T41	639.00	51-52	T74	256.00
43558	T10	260.00	811-812	T42	639.00	51-53	T75	225.00
806-5	T11	349.00	812-31	T43	12.00	53-54	T76	254.00
43621	T12	582.00	812-32	T44	12.00	54-823	T77	700.00
43652	T13	1470.00	812-813	T45	142.00	823-824	T78	10.00
43684	T14	518.00	813-33	T46	5.00	824-825	T79	241.00
8-807	T15	206.00	33-34	T47	543.00	825-55	T80	65.00
807-9	T16	250.00	34-35	T48	406.00	825-826	T81	522.00
43747	T17	147.50	35-814	T49	803.00	826-57	T82	114.00
43779	T18	585.00	814-815	T50	1.00	826-56	T83	88.00
43810	T19	1466.00	815-816	T51	50.00	824-827	T84	158.00
12-808	T20	501.00	816-817	T52	150.00	827-58	T85	239.00
808-13	T21	850.00	817-36	T53	98.00	58-59	T86	160.00
13-14	T22	400.00	36-37	T54	6.00	827-828	T87	38.00
14-15	T23	610.00	36-818	T55	674.00	828-60	T88	135.00
15-16	T24	1100.00	818-38	T56	453.00	828-829	T89	154.00
15-17	T25	658.00	815-819	T57	660.00	829-61	T90	154.00
17-809	T26	104.00	819-39	T58	1.00	61-62	T91	500.00
809-18	T27	400.00	39-40	T59	1123.00	62-63	T92	224.00
18-19	T28	1045.00	40-41	T60	234.00	829-830	T93	119.00
808-20	T29	342.00	41-820	T61	482.00	830-64	T94	256.00
20-21	T30	670.00	820-821	T62	1.00	64-65	T95	271.00
21-22	T31	333.00	821-42	T63	1.00	65-66	T96	453.00
22-23	T32	275.00	42-822	T64	138.00	66-67	T97	917.00

**Tabla D.3. Valores de demanda en hidrantes. Caso RCRP “Valcuerna”**

ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)
1	1	38.50	24	24	8.00	47	47	10.00
2	2	18.00	25	25	8.00	48	48	8.00
3	3	14.00	26	26	20.00	49	49	8.00
4	4	28.00	27	27	10.00	50	50	8.00
5	5	56.00	28	28	23.00	51	51	10.00
6	6	18.00	29	29	70.00	52	52	8.00
7	7	25.50	30	30	27.00	53	53	8.00
8	8	46.00	31	31	26.00	54	54	8.00
9	9	15.00	32	32	16.00	55	55	8.00
10	10	18.00	33	33	80.00	56	56	8.00
11	11	12.00	34	34	82.00	57	57	16.00
12	12	8.00	35	35	46.00	58	58	14.00
13	13	10.00	36	36	22.00	59	59	14.00
14	14	8.00	37	37	55.00	60	60	8.00
15	15	12.00	38	38	21.00	61	61	8.00
16	16	12.00	39	39	14.00	62	62	8.00
17	17	8.00	40	40	14.00	63	63	8.00
18	18	8.00	41	41	45.00	64	64	8.00
19	19	14.00	42	42	10.00	65	65	8.00
20	20	26.00	43	43	310.00	66	66	8.00
21	21	10.00	44	44	8.00	67	67	14.00
22	22	10.00	45	45	13.00			
23	23	10.00	46	46	14.00			

**Tabla D.4. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Valcuerna”**

ID Nudo [1]	ID Hidrante [2]	ASIG. TURNO [3]	DOTAC. [L/S] [4]	Q TT1	Q TT2	SQTT
				808.00	757.00	1565.00
1	1	2	38.50		38.50	
2	1	1	18.00	18.00		
3	1	2	14.00		14.00	
4	1	2	28.00		28.00	
5	1	1	56.00	56.00		
6	1	1	18.00	18.00		
7	1	2	25.50		25.50	
8	1	1	46.00	46.00		
9	1	1	15.00	15.00		
10	1	1	18.00	18.00		
11	1	1	12.00	12.00		
12	1	1	8.00	8.00		
13	1	1	10.00	10.00		
14	1	1	8.00	8.00		
15	1	1	12.00	12.00		
16	1	2	12.00		12.00	
<b>Coste 5718114.70 E</b>						

---

17	1	2	8.00		8.00
18	1	2	8.00		8.00
19	1	1	14.00	14.00	
20	1	1	26.00	26.00	
21	1	2	10.00		10.00
22	1	2	10.00		10.00
23	1	2	10.00		10.00
24	1	2	8.00		8.00
25	1	1	8.00	8.00	
26	1	2	20.00		20.00
27	1	2	10.00		10.00
28	1	1	23.00	23.00	
29	1	2	70.00		70.00
30	1	2	27.00		27.00
31	1	2	26.00		26.00
32	1	2	16.00		16.00
33	1	2	80.00		80.00
34	1	2	82.00		82.00
35	1	1	46.00	46.00	
36	1	1	22.00	22.00	
37	1	2	55.00		55.00
38	1	2	21.00		21.00
39	1	1	14.00	14.00	
40	1	1	14.00	14.00	
41	1	2	45.00		45.00
42	1	2	10.00		10.00
43	1	1	310.00	310.00	
44	1	2	8.00		8.00
45	1	2	13.00		13.00
46	1	2	14.00		14.00
47	1	1	10.00	10.00	
48	1	2	8.00		8.00
49	1	2	8.00		8.00
50	1	1	8.00	8.00	
51	1	2	10.00		10.00
52	1	1	8.00	8.00	
53	1	1	8.00	8.00	
54	1	1	8.00	8.00	
55	1	2	8.00		8.00
56	1	2	8.00		8.00
57	1	2	16.00		16.00
58	1	1	14.00	14.00	
59	1	1	14.00	14.00	
60	1	1	8.00	8.00	
61	1	2	8.00		8.00
62	1	2	8.00		8.00
63	1	1	8.00	8.00	
64	1	1	8.00	8.00	
65	1	1	8.00	8.00	
66	1	1	8.00	8.00	
67	1	2	14.00		14.00

---

**Tabla D.5. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Valcuerna”**

**Datos generales**

Viscosidad cinemática	1.00E-06
Rugosidad abs	1.50E-03
<u>Curva de coste de la tut</u>	
Coefficiente A	743.427
Exponente a	1.97457
Viscosidad dinámica	1.00E-03

						Turno 1
ID Nudo	Nin-Nfin	ID Linea	Cota	Longitud	Pmin	
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	
Embalse			399.00			
	801	T1	369.08	618.72		
801	801-802	T2	365.63	376.29		
802	802-803	T3	367.00	932.00		
803	803-804	T4	353.90	3305.00		
804	804-1	T5	340.59	20.00		
804	804-805	T6	325.98	857.00		
805	805-2	T7	327.17	706.00	40.00	
2	2-806	T8	326.01	123.00		
806	806-3	T9	330.47	161.00		
3	43558	T10	332.88	260.00		
806	806-5	T11	320.61	349.00	40.00	
5	43621	T12	322.21	582.00	40.00	
6	43652	T13	310.94	1470.00		
7	43684	T14	300.04	518.00	40.00	
8	8-807	T15	300.93	206.00		
807	807-9	T16	301.41	250.00	40.00	
9	43747	T17	298.60	147.50	40.00	
10	43779	T18	291.04	585.00	40.00	
11	43810	T19	278.19	1466.00	40.00	
12	12-808	T20	276.85	501.00		
808	808-13	T21	290.45	850.00	40.00	
13	13-14	T22	296.92	400.00	40.00	
14	14-15	T23	302.71	610.00	40.00	
15	15-16	T24	321.44	1100.00		
15	15-17	T25	330.47	658.00		
17	17-809	T26	310.98	104.00		
809	809-18	T27	313.68	400.00		
18	18-19	T28	276.85	1045.00	40.00	
808	808-20	T29	279.71	342.00	40.00	
20	20-21	T30	271.62	670.00		
21	21-22	T31	266.24	333.00		

---

22	22-23	T32	264.38	275.00	
23	23-24	T33	263.30	150.00	
24	24-25	T34	262.43	194.00	40.00
25	25-26	T35	262.93	707.00	
26	26-27	T36	257.30	613.00	
805	805-28	T37	322.48	660.00	40.00
28	28-29	T38	323.76	361.00	
29	29-810	T39	323.30	900.00	
810	810-30	T40	312.20	558.00	
30	30-811	T41	310.80	639.00	
811	811-812	T42	300.15	639.00	
812	812-31	T43	298.80	12.00	
812	812-32	T44	299.21	12.00	
812	812-813	T45	297.40	142.00	
813	813-33	T46	296.06	5.00	
33	33-34	T47	295.27	543.00	
34	34-35	T48	294.84	406.00	40.00
35	35-814	T49	289.30	803.00	
814	814-815	T50	287.50	1.00	
815	815-816	T51	289.80	50.00	
816	816-817	T52	297.30	150.00	
817	817-36	T53	300.36	98.00	40.00
36	36-37	T54	299.26	6.00	
36	36-818	T55	318.64	674.00	
818	818-38	T56	302.16	453.00	
815	815-819	T57	275.90	660.00	
819	819-39	T58	278.08	1.00	40.00
39	39-40	T59	281.77	1123.00	40.00
40	40-41	T60	278.63	234.00	
41	41-820	T61	272.40	482.00	
820	820-821	T62	265.60	1.00	
821	821-42	T63	263.10	1.00	
42	42-822	T64	272.40	138.00	
822	822-43	T65	272.40	1.00	40.00
822	822-44	T66	276.94	73.00	
44	44-45	T67	262.45	330.00	
45	45-46	T68	263.11	562.00	
46	46-47	T69	261.93	210.00	40.00
47	47-48	T70	261.81	128.00	
48	48-49	T71	260.95	129.00	
49	49-50	T72	252.25	122.00	40.00
48	48-51	T73	275.34	382.00	
51	51-52	T74	254.56	256.00	40.00
51	51-53	T75	274.56	225.00	40.00
53	53-54	T76	269.58	254.00	40.00

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

54	54-823	T77	265.95	700.00	
823	823-824	T78	259.20	10.00	
824	824-825	T79	274.26	241.00	
825	825-55	T80	286.47	65.00	
825	825-826	T81	277.28	522.00	
826	826-57	T82	294.93	114.00	
826	826-56	T83	276.20	88.00	
824	824-827	T84	255.45	158.00	
827	827-58	T85	250.52	239.00	40.00
58	58-59	T86	250.52	160.00	40.00
827	827-828	T87	254.44	38.00	
828	828-60	T88	256.83	135.00	40.00
828	828-829	T89	246.10	154.00	
829	829-61	T90	242.04	154.00	
61	61-62	T91	246.47	500.00	
62	62-63	T92	233.40	224.00	40.00
829	829-830	T93	240.30	119.00	
830	830-64	T94	237.49	256.00	40.00
64	64-65	T95	241.56	271.00	40.00
65	65-66	T96	233.40	453.00	40.00
66	66-67	T97	249.91	917.00	

						Turno 2
ID Nudo	Nin-Nfin	ID Linea	Cota [m]	Longitud [m]	Pmin [mca]	
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	
Embalse			399.00			
	801	T1	369.08	618.72		
801	801-802	T2	365.63	376.29		
802	802-803	T3	367.00	932.00		
803	803-804	T4	353.90	3305.00		
804	804-1	T5	340.59	20.00	40.00	
804	804-805	T6	325.98	857.00		
805	805-2	T7	327.17	706.00		
2	2-806	T8	326.01	123.00		
806	806-3	T9	330.47	161.00	40.00	
3	43558	T10	332.88	260.00	40.00	
806	806-5	T11	320.61	349.00		
5	43621	T12	322.21	582.00		
6	43652	T13	310.94	1470.00	40.00	
7	43684	T14	300.04	518.00		
8	8-807	T15	300.93	206.00		
807	807-9	T16	301.41	250.00		
9	43747	T17	298.60	147.50		

---

10	43779	T18	291.04	585.00	
11	43810	T19	278.19	1466.00	
12	12-808	T20	276.85	501.00	
808	808-13	T21	290.45	850.00	
13	13-14	T22	296.92	400.00	
14	14-15	T23	302.71	610.00	
15	15-16	T24	321.44	1100.00	40.00
16	15-17	T25	330.47	658.00	40.00
17	17-809	T26	310.98	104.00	
809	809-18	T27	313.68	400.00	40.00
18	18-19	T28	276.85	1045.00	
808	808-20	T29	279.71	342.00	
20	20-21	T30	271.62	670.00	40.00
21	21-22	T31	266.24	333.00	40.00
22	22-23	T32	264.38	275.00	40.00
23	23-24	T33	263.30	150.00	40.00
24	24-25	T34	262.43	194.00	
25	25-26	T35	262.93	707.00	40.00
26	26-27	T36	257.30	613.00	40.00
805	805-28	T37	322.48	660.00	
28	28-29	T38	323.76	361.00	40.00
29	29-810	T39	323.30	900.00	
810	810-30	T40	312.20	558.00	40.00
30	30-811	T41	310.80	639.00	
811	811-812	T42	300.15	639.00	
812	812-31	T43	298.80	12.00	40.00
812	812-32	T44	299.21	12.00	40.00
812	812-813	T45	297.40	142.00	
813	813-33	T46	296.06	5.00	40.00
33	33-34	T47	295.27	543.00	40.00
34	34-35	T48	294.84	406.00	
35	35-814	T49	289.30	803.00	
814	814-815	T50	287.50	1.00	
815	815-816	T51	289.80	50.00	
816	816-817	T52	297.30	150.00	
817	817-36	T53	300.36	98.00	
36	36-37	T54	299.26	6.00	40.00
36	36-818	T55	318.64	674.00	
818	818-38	T56	302.16	453.00	40.00
815	815-819	T57	275.90	660.00	
819	819-39	T58	278.08	1.00	
39	39-40	T59	281.77	1123.00	
40	40-41	T60	278.63	234.00	40.00
41	41-820	T61	272.40	482.00	
820	820-821	T62	265.60	1.00	
821	821-42	T63	263.10	1.00	40.00

---

42	42-822	T64	272.40	138.00	
822	822-43	T65	272.40	1.00	
822	822-44	T66	276.94	73.00	40.00
44	44-45	T67	262.45	330.00	40.00
45	45-46	T68	263.11	562.00	40.00
46	46-47	T69	261.93	210.00	
47	47-48	T70	261.81	128.00	40.00
48	48-49	T71	260.95	129.00	40.00
49	49-50	T72	252.25	122.00	
48	48-51	T73	275.34	382.00	40.00
51	51-52	T74	254.56	256.00	
51	51-53	T75	274.56	225.00	
53	53-54	T76	269.58	254.00	
54	54-823	T77	265.95	700.00	
823	823-824	T78	259.20	10.00	
824	824-825	T79	274.26	241.00	
825	825-55	T80	286.47	65.00	40.00
825	825-826	T81	277.28	522.00	
826	826-57	T82	294.93	114.00	40.00
826	826-56	T83	276.20	88.00	40.00
824	824-827	T84	255.45	158.00	
827	827-58	T85	250.52	239.00	
58	58-59	T86	250.52	160.00	
827	827-828	T87	254.44	38.00	
828	828-60	T88	256.83	135.00	
828	828-829	T89	246.10	154.00	
829	829-61	T90	242.04	154.00	40.00
61	61-62	T91	246.47	500.00	40.00
62	62-63	T92	233.40	224.00	
829	829-830	T93	240.30	119.00	
830	830-64	T94	237.49	256.00	
64	64-65	T95	241.56	271.00	
65	65-66	T96	233.40	453.00	
66	66-67	T97	249.91	917.00	40.00



Tabla D.6. Celdas para configurar la PNL

COSTO TOTAL \$ 5718114.74										
Turno 1										
Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
			399.00							
801	801	T1	369.08	808.00	618.72	740.05		253853.39	396.94	27.86
802	801-802	T2	365.63	808.00	376.29	740.18		154439.97	395.69	30.06
803	802-803	T3	367.00	808.00	932.00	740.08		382417.89	392.59	25.59
804	803-804	T4	353.90	808.00	3305.00	740.10		1356163.82	381.59	27.69
1	804-1	T5	340.59		20.00	109.87		189.84	381.59	41.00
805	804-805	T6	325.98	808.00	857.00	731.90		344009.92	378.57	52.59
2	805-2	T7	327.17	269.00	706.00	464.03	40.00	115240.88	375.58	48.41
806	2-806	T8	326.01	251.00	123.00	464.46		20114.12	375.13	49.12
3	806-3	T9	330.47		161.00	170.44		3636.91	375.13	44.66
4	43558	T10	332.88		260.00	152.59		4721.05	375.13	42.25
5	806-5	T11	320.61	251.00	349.00	427.28	40.00	48403.21	373.17	52.56
6	43621	T12	322.21	195.00	582.00	426.94	40.00	80592.70	371.15	48.94
7	43652	T13	310.94	177.00	1470.00	426.84		203468.54	366.92	55.98
8	43684	T14	300.04	177.00	518.00	400.52	40.00	63231.29	364.86	64.82
807	8-807	T15	300.93	131.00	206.00	400.09		25092.78	364.40	63.47
9	807-9	T16	301.41	131.00	250.00	400.25	40.00	30475.43	363.84	62.43
10	43747	T17	298.60	116.00	147.50	399.43	40.00	17908.09	363.58	64.98
11	43779	T18	291.04	98.00	585.00	400.08	40.00	71254.24	362.82	71.78
12	43810	T19	278.19	86.00	1466.00	399.99	40.00	178482.27	361.35	83.16
808	12-808	T20	276.85	78.00	501.00	399.95		60984.21	360.93	84.08
13	808-13	T21	290.45	44.00	850.00	285.99	40.00	53356.52	359.64	69.19
14	13-14	T22	296.92	34.00	400.00	285.83	40.00	25081.85	359.27	62.35
15	14-15	T23	302.71	26.00	610.00	286.00	40.00	38294.07	358.92	56.21
16	15-16	T24	321.44		1100.00	124.30		13322.54	358.92	37.48
17	15-17	T25	330.47	14.00	658.00	245.27		30497.06	358.67	28.20
809	17-809	T26	310.98	14.00	104.00	104.92		901.31	355.86	44.88
18	809-18	T27	313.68	14.00	400.00	104.87		3463.63	345.02	31.34
19	18-19	T28	276.85	14.00	1045.00	104.99	40.00	9068.43	316.85	40.00
20	808-20	T29	279.71	34.00	342.00	186.56	40.00	9235.63	358.20	78.49
21	20-21	T30	271.62	8.00	670.00	186.87		18151.12	357.85	86.23
22	21-22	T31	266.24	8.00	333.00	178.51		8242.53	357.63	91.39
23	22-23	T32	264.38	8.00	275.00	169.52		6146.15	357.40	93.02
24	23-24	T33	263.30	8.00	150.00	159.03		2955.07	357.23	93.93
25	24-25	T34	262.43	8.00	194.00	149.24	40.00	3371.62	356.92	94.49
26	25-26	T35	262.93		707.00	149.07		12259.74	356.92	93.99
27	26-27	T36	257.30		613.00	110.62		5897.26	356.92	99.62
28	805-28	T37	322.48	539.00	660.00	556.13	40.00	154030.91	374.29	51.81
29	28-29	T38	323.76	516.00	361.00	551.02		82729.76	372.03	48.27
810	29-810	T39	323.30	516.00	900.00	546.37		202828.80	366.16	42.86
30	810-30	T40	312.20	516.00	558.00	546.40		125766.94	362.53	50.33
811	30-811	T41	310.80	516.00	639.00	544.71		143144.87	358.29	47.49
812	811-812	T42	300.15	516.00	639.00	544.71		143144.87	354.06	53.91
31	812-31	T43	298.80		12.00	122.59		141.42	354.06	55.26
32	812-32	T44	299.21		12.00	132.32		164.44	354.06	54.85
813	812-813	T45	297.40	516.00	142.00	542.41		31545.86	353.10	55.70
33	813-33	T46	296.06	516.00	5.00	575.32		1247.76	353.08	57.02
34	33-34	T47	295.27	516.00	543.00	537.70		118568.03	349.23	53.96
35	34-35	T48	294.84	516.00	406.00	534.22	40.00	87523.19	346.27	51.43
814	35-814	T49	289.30	470.00	803.00	533.50		172645.53	341.34	52.04
815	814-815	T50	287.50	470.00	1.00	533.50		215.00	341.33	53.83

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

816	815-816	T51	289.80	22.00	50.00	229.09		2025.32	341.27	51.47
817	816-817	T52	297.30	22.00	150.00	229.14		6078.50	341.08	43.78
36	817-36	T53	300.36	22.00	98.00	230.95	40.00	4033.68	340.96	40.60
37	36-37	T54	299.26		6.00	160.20		119.94	340.96	41.70
818	36-818	T55	318.64		674.00	158.48		13188.24	340.96	22.32
38	818-38	T56	302.16		453.00	158.43		8858.49	340.96	38.80
819	815-819	T57	275.90	448.00	660.00	500.63		125157.53	336.23	60.33
39	819-39	T58	278.08	448.00	1.00	499.14	40.00	188.52	336.22	58.14
40	39-40	T59	281.77	434.00	1123.00	496.49	40.00	209496.86	327.70	45.93
41	40-41	T60	278.63	420.00	234.00	492.19		42908.75	325.96	47.33
820	41-820	T61	272.40	420.00	482.00	491.08		87991.80	322.34	49.94
821	820-821	T62	265.60	420.00	1.00	491.08		182.56	322.33	56.73
42	821-42	T63	263.10	420.00	1.00	491.08		182.56	322.32	59.22
822	42-822	T64	272.40	420.00	138.00	490.34		25117.97	321.27	48.87
43	822-43	T65	272.40	310.00	1.00	142.46	40.00	15.86	318.81	46.41
44	822-44	T66	276.94	110.00	73.00	350.31		6839.75	321.05	44.11
45	44-45	T67	262.45	110.00	330.00	348.79		30655.38	319.99	57.54
46	45-46	T68	263.11	110.00	562.00	346.88		51646.09	318.14	55.03
47	46-47	T69	261.93	110.00	210.00	344.78	40.00	19068.25	317.42	55.49
48	47-48	T70	261.81	100.00	128.00	336.62		11085.61	317.02	55.21
49	48-49	T71	260.95	8.00	129.00	66.48		454.12	304.78	43.83
50	49-50	T72	252.25	8.00	122.00	66.09	40.00	424.52	292.85	40.60
51	48-51	T73	275.34	92.00	382.00	327.89		31410.44	315.83	40.49
52	51-52	T74	254.56	8.00	256.00	68.60	40.00	958.71	295.16	40.60
53	51-53	T75	274.56	84.00	225.00	319.20	40.00	17545.21	315.16	40.60
54	53-54	T76	269.58	76.00	254.00	242.67	40.00	11527.75	312.64	43.06
823	54-823	T77	265.95	68.00	700.00	241.13		31372.81	306.88	40.93
824	823-824	T78	259.20	68.00	10.00	257.48		510.16	306.82	47.62
825	824-825	T79	274.26		241.00	193.18		6971.47	306.82	32.56
55	825-55	T80	286.47		65.00	58.82		179.71	306.82	20.35
826	825-826	T81	277.28		522.00	178.60		12932.53	306.82	29.54
57	826-57	T82	294.93		114.00	160.24		2279.96	306.82	11.89
56	826-56	T83	276.20		88.00	56.58		225.30	306.82	30.62
827	824-827	T84	255.45	68.00	158.00	193.42		4581.98	302.81	47.36
58	827-58	T85	250.52	28.00	239.00	130.81	40.00	3201.55	294.80	44.28
59	58-59	T86	250.52	14.00	160.00	108.29	40.00	1476.07	291.12	40.60
828	827-828	T87	254.44	40.00	38.00	160.78		765.02	301.92	47.48
60	828-60	T88	256.83	8.00	135.00	81.54	40.00	711.23	297.43	40.60
829	828-829	T89	246.10	32.00	154.00	149.46		2684.20	298.54	52.44
61	829-61	T90	242.04	8.00	154.00	84.39		868.18	294.24	52.20
62	61-62	T91	246.47	8.00	500.00	84.35		2816.25	280.23	33.76
63	62-63	T92	233.40	8.00	224.00	84.46	40.00	1264.95	274.00	40.60
830	829-830	T93	240.30	24.00	119.00	126.41		1489.92	295.02	54.72
64	830-64	T94	237.49	24.00	256.00	126.38	40.00	3203.85	287.43	49.94
65	64-65	T95	241.56	16.00	271.00	117.70	40.00	2947.10	282.16	40.60
66	65-66	T96	233.40	8.00	453.00	104.83	40.00	3919.49	277.95	44.55
67	66-67	T97	249.91		917.00	104.79		7928.21	277.95	28.04

**Turno 2**

Nudo	Nin-Nfin	ID	Cota	Caudal lin.	Longitud	Diam.	Pmin	Costo tub	Alt. Piez	Presión
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]
			399.00							
801	801	T1	369.08	757.00	618.72				397.19	28.11
802	801-802	T2	365.63	757.00	376.29				396.08	30.45
803	802-803	T3	367.00	757.00	932.00				393.35	26.35
804	803-804	T4	353.90	757.00	3305.00				383.65	29.75
1	804-1	T5	340.59	38.50	20.00		40.00		380.59	40.00
805	804-805	T6	325.98	718.50	857.00				381.25	55.27

2	805-2	T7	327.17	163.50	706.00		380.11	52.94
806	2-806	T8	326.01	163.50	123.00		379.91	53.90
3	806-3	T9	330.47	42.00	161.00	40.00	376.85	46.38
4	43558	T10	332.88	28.00	260.00	40.00	372.88	40.00
5	806-5	T11	320.61	121.50	349.00		379.42	58.81
6	43621	T12	322.21	121.50	582.00		378.61	56.40
7	43652	T13	310.94	121.50	1470.00	40.00	376.55	65.61
8	43684	T14	300.04	96.00	518.00		375.91	75.87
807	8-807	T15	300.93	96.00	206.00		375.65	74.72
9	807-9	T16	301.41	96.00	250.00		375.35	73.94
10	43747	T17	298.60	96.00	147.50		375.16	76.56
11	43779	T18	291.04	96.00	585.00		374.44	83.40
12	43810	T19	278.19	96.00	1466.00		372.62	94.43
808	12-808	T20	276.85	96.00	501.00		372.00	95.15
13	808-13	T21	290.45	28.00	850.00		371.45	81.00
14	13-14	T22	296.92	28.00	400.00		371.19	74.27
15	14-15	T23	302.71	28.00	610.00		370.79	68.08
16	15-16	T24	321.44	12.00	1100.00	40.00	361.44	40.00
17	16-17	T25	330.47	16.00	658.00	40.00	370.47	40.00
809	17-809	T26	310.98	8.00	104.00		369.51	58.53
18	809-18	T27	313.68	8.00	400.00	40.00	365.80	52.12
19	18-19	T28	276.85		1045.00		365.80	88.95
20	808-20	T29	279.71	68.00	342.00		361.56	81.85
21	20-21	T30	271.62	68.00	670.00	40.00	341.27	69.65
22	21-22	T31	266.24	58.00	333.00	40.00	331.92	65.68
23	22-23	T32	264.38	48.00	275.00	40.00	324.95	60.57
24	23-24	T33	263.30	38.00	150.00	40.00	321.61	58.31
25	24-25	T34	262.43	30.00	194.00		317.82	55.39
26	25-26	T35	262.93	30.00	707.00	40.00	303.94	41.01
27	26-27	T36	257.30	10.00	613.00	40.00	297.30	40.00
28	805-28	T37	322.48	555.00	660.00		376.72	54.24
29	28-29	T38	323.76	555.00	361.00	40.00	374.12	50.36
810	29-810	T39	323.30	485.00	900.00		368.92	45.62
30	810-30	T40	312.20	485.00	558.00	40.00	365.70	53.50
811	30-811	T41	310.80	458.00	639.00		362.34	51.54
812	811-812	T42	300.15	458.00	639.00		358.98	58.83
31	812-31	T43	298.80	26.00	12.00	40.00	358.50	59.70
32	812-32	T44	299.21	16.00	12.00	40.00	358.86	59.65
813	812-813	T45	297.40	416.00	142.00		358.35	60.95
33	813-33	T46	296.06	416.00	5.00	40.00	358.34	62.28
34	33-34	T47	295.27	336.00	543.00	40.00	356.66	61.39
35	34-35	T48	294.84	254.00	406.00		355.91	61.07
814	35-814	T49	289.30	254.00	803.00		354.41	65.11
815	814-815	T50	287.50	254.00	1.00		354.41	66.91
816	815-816	T51	289.80	76.00	50.00		353.75	63.95
817	816-817	T52	297.30	76.00	150.00		351.76	54.46
36	817-36	T53	300.36	76.00	98.00		350.51	50.15
37	36-37	T54	299.26	55.00	6.00	40.00	350.25	50.99
818	36-818	T55	318.64	21.00	674.00		345.63	26.99
38	818-38	T56	302.16	21.00	453.00	40.00	342.34	40.18
819	815-819	T57	275.90	178.00	660.00		353.55	77.65
39	819-39	T58	278.08	178.00	1.00		353.55	75.47
40	39-40	T59	281.77	178.00	1123.00		352.02	70.25
41	40-41	T60	278.63	178.00	234.00	40.00	351.69	73.06
820	41-820	T61	272.40	133.00	482.00		351.29	78.89
821	820-821	T62	265.60	133.00	1.00		351.29	85.69
42	821-42	T63	263.10	133.00	1.00	40.00	351.29	88.19
822	42-822	T64	272.40	123.00	138.00		351.19	78.79
43	822-43	T65	272.40		1.00		351.19	78.79
44	822-44	T66	276.94	123.00	73.00	40.00	350.91	73.97

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

45	44-45	T67	262.45	115.00	330.00	40.00	349.76	87.31
46	45-46	T68	263.11	102.00	562.00	40.00	348.16	85.05
47	46-47	T69	261.93	88.00	210.00		347.69	85.76
48	47-48	T70	261.81	88.00	128.00	40.00	347.37	85.56
49	48-49	T71	260.95	8.00	129.00	40.00	335.13	74.18
50	49-50	T72	252.25		122.00		335.13	82.88
51	48-51	T73	275.34	72.00	382.00	40.00	346.63	71.29
52	51-52	T74	254.56		256.00		346.63	92.07
53	51-53	T75	274.56	62.00	225.00		346.25	71.69
54	53-54	T76	269.58	62.00	254.00		344.56	74.98
823	54-823	T77	265.95	62.00	700.00		339.73	73.78
824	823-824	T78	259.20	62.00	10.00		339.68	80.48
825	824-825	T79	274.26	32.00	241.00		338.24	63.98
55	825-55	T80	286.47	8.00	65.00	40.00	326.65	40.18
826	825-826	T81	277.28	24.00	522.00		335.58	58.30
57	826-57	T82	294.93	16.00	114.00	40.00	335.11	40.18
56	826-56	T83	276.20	8.00	88.00	40.00	316.38	40.18
827	824-827	T84	255.45	30.00	158.00		338.85	83.40
58	827-58	T85	250.52		239.00		338.85	88.33
59	58-59	T86	250.52		160.00		338.85	88.33
828	827-828	T87	254.44	30.00	38.00		338.35	83.91
60	828-60	T88	256.83		135.00		338.35	81.52
829	828-829	T89	246.10	30.00	154.00		335.36	89.26
61	829-61	T90	242.04	16.00	154.00	40.00	318.85	76.81
62	61-62	T91	246.47	8.00	500.00	40.00	304.85	58.38
63	62-63	T92	233.40		224.00		304.85	71.45
830	829-830	T93	240.30	14.00	119.00		334.12	93.82
64	830-64	T94	237.49	14.00	256.00		331.43	93.94
65	64-65	T95	241.56	14.00	271.00		327.35	85.79
66	65-66	T96	233.40	14.00	453.00		315.05	81.65
67	66-67	T97	249.91	14.00	917.00	40.00	290.09	40.18

**Tabla D.7. Diseño hidráulico de la Red Valcuerna, luego de implementar AG-PNL**

ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]
T1	740.05	T34	149.24	T67	348.79
T2	740.18	T35	149.07	T68	346.88
T3	740.08	T36	110.62	T69	344.78
T4	740.10	T37	556.13	T70	336.62
T5	109.87	T38	551.02	T71	66.48
T6	731.90	T39	546.37	T72	66.09
T7	464.03	T40	546.40	T73	327.89
T8	464.46	T41	544.71	T74	68.60
T9	170.44	T42	544.71	T75	319.20
T10	152.59	T43	122.59	T76	242.67
T11	427.28	T44	132.32	T77	241.13
T12	426.94	T45	542.41	T78	257.48
T13	426.84	T46	575.32	T79	193.18
T14	400.52	T47	537.70	T80	58.82
T15	400.09	T48	534.22	T81	178.60

T16	400.25	T49	533.50	T82	160.24
T17	399.43	T50	533.50	T83	56.58
T18	400.08	T51	229.09	T84	193.42
T19	399.99	T52	229.14	T85	130.81
T20	399.95	T53	230.95	T86	108.29
T21	285.99	T54	160.20	T87	160.78
T22	285.83	T55	158.48	T88	81.54
T23	286.00	T56	158.43	T89	149.46
T24	124.30	T57	500.63	T90	84.39
T25	245.27	T58	499.14	T91	84.35
T26	104.92	T59	496.49	T92	84.46
T27	104.87	T60	492.19	T93	126.41
T28	104.99	T61	491.08	T94	126.38
T29	186.56	T62	491.08	T95	117.70
T30	186.87	T63	491.08	T96	104.83
T31	178.51	T64	490.34	T97	104.79
T32	169.52	T65	142.46		
T33	159.03	T66	350.31		

**Tabla D.8. Resultados de asignación de turno con modelo AG-PNL en cada hidrante de la Red de Riego Valcuerna**

Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]
1	2	38.50	24	2	8.00	47	1	10.00
2	1	18.00	25	1	8.00	48	2	8.00
3	2	14.00	26	2	20.00	49	2	8.00
4	2	28.00	27	2	10.00	50	1	8.00
5	1	56.00	28	1	23.00	51	2	10.00
6	1	18.00	29	2	70.00	52	1	8.00
7	2	25.50	30	2	27.00	53	1	8.00
8	1	46.00	31	2	26.00	54	1	8.00
9	1	15.00	32	2	16.00	55	2	8.00
10	1	18.00	33	2	80.00	56	2	8.00
11	1	12.00	34	2	82.00	57	2	16.00
12	1	8.00	35	1	46.00	58	1	14.00
13	1	10.00	36	1	22.00	59	1	14.00
14	1	8.00	37	2	55.00	60	1	8.00
15	1	12.00	38	2	21.00	61	2	8.00
16	2	12.00	39	1	14.00	62	2	8.00
17	2	8.00	40	1	14.00	63	1	8.00
18	2	8.00	41	2	45.00	64	1	8.00
19	1	14.00	42	2	10.00	65	1	8.00
20	1	26.00	43	1	310.00	66	1	8.00
21	2	10.00	44	2	8.00	67	2	14.00
22	2	10.00	45	2	13.00			
23	2	10.00	46	2	14.00			

**Tabla D.9. Resultados de cumplimiento de la Fiabilidad de presión por hidrante de la Red de Riego Valcuerna**

Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>	Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>	Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>
1	H05	627	1.00	24	H37	482	0.99	47	H56	264	0.98
2	H07	629	1.00	25	H06	471	0.99	48	H03	523	0.98
3	H12	546	1.00	26	H39	469	0.99	49	H59	603	0.98
4	H08	629	1.00	27	H46	563	0.99	50	H51	658	0.97
5	H09	633	1.00	28	H45	390	0.99	51	H36	385	0.97
6	H10	329	1.00	29	H34	566	0.99	52	H40	329	0.97
7	H11	627	1.00	30	H52	446	0.99	53	H63	305	0.97
8	H13	587	1.00	31	H64	415	0.99	54	H49	201	0.97
9	H14	324	1.00	32	H48	398	0.99	55	H38	484	0.96
10	H15	537	1.00	33	H65	488	0.99	56	H55	510	0.96
11	H20	461	1.00	34	H61	461	0.99	57	H62	597	0.93
12	H21	527	1.00	35	H47	551	0.99	58	H66	509	0.93
13	H22	396	1.00	36	H28	555	0.99	59	H57	573	0.92
14	H23	570	1.00	37	H02	512	0.99	60	H01	588	0.92
15	H24	428	1.00	38	H58	569	0.99	61	H04	581	0.92
16	H25	354	1.00	39	H42	567	0.99	62	H19	530	0.82
17	H27	604	1.00	40	H53	567	0.99	63	H16	626	0.74
18	H26	502	1.00	41	H30	596	0.98	64	H17	530	0.52
19	H33	607	1.00	42	H50	289	0.98	65	H18	470	0.51
20	H31	510	1.00	43	H29	499	0.98	66	H67	442	0.34
21	H41	245	1.00	44	H60	546	0.98	67	H43	28	0.21
22	H32	632	1.00	45	H44	533	0.98				
23	H35	559	0.99	46	H54	633	0.98				

$\Sigma$	63.17
<i>IFCT</i>	0.94

**Tabla D.10. Simulación de  $N_T$  y Flexibilidad. Red Valcuerna**

NT	Flexibilidad
1340	1.00

## E) Ejemplo de implementación Cenicero

### Características topológicas de la red

Tabla E.1. ID Nudos y cotas. Caso RCRP “Cenicero”

ID Nudo	Cota (m)	ID Nudo	Cota (m)
	710.50	18	632.55
999	590.00	806	600.00
826	560.00	19	611.27
827	562.00	804	600.00
1	567.75	805	600.00
2	563.62	20	600.61
823	588.00	998	569.87
3	592.02	21	569.87
824	680.00	807	620.00
4	595.03	22	622.75
825	585.00	812	620.00
5	596.47	23	626.66
809	600.00	813	620.00
6	610.01	147	640.18
808	600.00	24	640.18
7	616.41	148	628.48
820	630.00	25	628.48
822	620.00	803	600.00
8	623.58	810	620.00
9	598.74	26	627.09
821	630.00	811	670.00
10	634.63	27	678.34
819	630.00	802	570.00
11	633.52	152	619.21
818	625.00	28	619.21
12	630.28	151	620.26
817	610.00	29	620.26
13	616.28	801	570.00
816	575.00	30	578.38
14	588.00	800	570.00
15	588.00	31	575.33
814	600.00	828	575.00
16	590.00	32	581.24
815	600.00	33	581.24
17	606.63		

**Tabla E.2. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Cenicero”**

<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Longitud (m)</b>
0-999	T1	100.00	815-18	T35	233.78
999-826	T2	308.90	808-806	T36	124.78
826-827	T3	599.89	806-19	T37	6.32
827-1	T4	4.87	806-804	T38	92.39
827-2	T5	146.99	804-805	T39	9.40
826-823	T6	376.58	805-20	T40	4.72
823-3	T7	43.25	805-998	T41	317.08
823-824	T8	201.29	998-21	T42	569.95
824-4	T9	2.36	804-807	T43	248.73
824-825	T10	91.96	807-22	T44	5.87
825-5	T11	3.22	807-812	T45	250.95
825-809	T12	569.63	812-23	T46	3.76
809-6	T13	2.88	812-813	T47	15.43
809-808	T14	195.45	813-147	T48	229.41
808-7	T15	5.36	147-24	T49	2.10
808-820	T16	720.03	813-148	T50	112.84
820-822	T17	148.57	148-25	T51	4.10
822-8	T18	3.96	804-803	T52	13.62
822-9	T19	341.32	803-810	T53	384.20
820-821	T20	2.07	810-26	T54	4.58
821-10	T21	4.06	810-811	T55	482.44
821-819	T22	44.24	811-27	T56	5.15
819-11	T23	5.55	803-802	T57	359.28
819-818	T24	105.21	802-152	T58	250.44
818-12	T25	2.77	152-28	T59	4.18
818-817	T26	144.70	152-151	T60	302.59
817-13	T27	3.03	151-29	T61	4.20
817-816	T28	233.95	802-801	T62	12.58
816-14	T29	6.27	801-30	T63	4.19
816-15	T30	9.51	801-800	T64	248.24
15-814	T31	166.97	800-31	T65	106.88
814-16	T32	113.55	800-828	T66	283.00
814-815	T33	5.31	828-32	T67	61.22
815-17	T34	4.73	828-33	T68	50.00



**Tabla E.3. Valores de demanda en hidrantes. Caso RCRP “Cenicero”**

ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)
1	1	12.00	12	1	18.00	23	1	15.00
2	1	12.00	13	1	12.00	24	1	15.00
3	1	12.00	14	1	15.00	25	1	18.00
4	1	12.00	15	1	12.00	26	1	12.00
5	1	15.00	16	1	18.00	27	1	12.00
6	1	15.00	17	1	12.00	28	1	12.00
7	1	12.00	18	1	12.00	29	1	12.00
8	1	15.00	19	1	12.00	30	1	15.00
9	1	12.00	20	1	15.00	31	1	12.00
10	1	12.00	21	1	15.00	32	1	19.00
11	1	15.00	22	1	12.00	33	1	15.00

**Tabla E.4. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Cenicero”**

ID Nudo	ID Hidrant	ASIG. TURNO	DOTAC. [L/S]	Q TT1	Q TT2	Q TT3	SQTT
[1]				175.00	102.00	177.00	454.00
1	1	1	12.00	12.00			
2	1	2	12.00		12.00		
3	1	3	12.00			12.00	
4	1	3	12.00			12.00	
5	1	2	15.00		15.00		
6	1	1	15.00	15.00			
7	1	2	12.00		12.00		
8	1	3	15.00			15.00	
9	1	1	12.00	12.00			
10	1	1	12.00	12.00			
11	1	1	15.00	15.00			
12	1	3	18.00			18.00	
13	1	1	12.00	12.00			
14	1	3	15.00			15.00	
15	1	2	12.00		12.00		
16	1	3	18.00			18.00	
17	1	3	12.00			12.00	
18	1	2	12.00		12.00		
19	1	1	12.00	12.00			
20	1	1	15.00	15.00			
21	1	3	15.00			15.00	
22	1	1	12.00	12.00			
23	1	3	15.00			15.00	
24	1	2	15.00		15.00		
25	1	3	18.00			18.00	
26	1	1	12.00	12.00			
27	1	2	12.00		12.00		
28	1	3	12.00			12.00	
29	1	2	12.00		12.00		
30	1	1	15.00	15.00			
31	1	1	12.00	12.00			
32	1	1	19.00	19.00			
33	1	3	15.00			15.00	

**Coste 18043034 USD**

**Tabla E.5. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Cenicero”**

**Datos generales**

Viscosidad cinemática	0.000001 m <sup>2</sup> /s
Rugosidad	0.00001 m
Curva de coste de la tubería	
Coefficiente A	743.4273
Exponente a	1.97457

<b>Turno 1</b>					
ID Nudo	Nin-Nfin	ID Linea	Cota [m]	Longitud [m]	Pmin [mca]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
			710.50		
999	0-999	T1	590.00	100.00	
826	999-826	T2	560.00	308.90	
827	826-827	T3	562.00	599.89	
1	827-1	T4	567.75	4.87	77.31
2	827-2	T5	563.62	146.99	
823	826-823	T6	588.00	376.58	
3	823-3	T7	592.02	43.25	
824	823-824	T8	680.00	201.29	
4	824-4	T9	595.03	2.36	
825	824-825	T10	585.00	91.96	
5	825-5	T11	596.47	3.22	
809	825-809	T12	600.00	569.63	
6	809-6	T13	610.01	2.88	40.51
808	809-808	T14	600.00	195.45	
7	808-7	T15	616.41	5.36	
820	808-820	T16	630.00	720.03	
822	820-822	T17	620.00	148.57	
8	822-8	T18	623.58	3.96	
9	822-9	T19	598.74	341.32	46.26
821	820-821	T20	630.00	2.07	
10	821-10	T21	634.63	4.06	53.74
819	821-819	T22	630.00	44.24	
11	819-11	T23	633.52	5.55	25.89
818	819-818	T24	625.00	105.21	
12	818-12	T25	630.28	2.77	
817	818-817	T26	610.00	144.70	
13	817-13	T27	616.28	3.03	25.00
816	817-816	T28	575.00	233.95	
14	816-14	T29	588.00	6.27	
15	816-15	T30	588.00	9.51	
814	15-814	T31	600.00	166.97	
16	814-16	T32	590.00	113.55	

815	814-815	T33	600.00	5.31	
17	815-17	T34	606.63	4.73	
18	815-18	T35	632.55	233.78	
806	808-806	T36	600.00	124.78	
19	806-19	T37	611.27	6.32	37.19
804	806-804	T38	600.00	92.39	
805	804-805	T39	600.00	9.40	
20	805-20	T40	600.61	4.72	47.50
998	805-998	T41	569.87	317.08	
21	998-21	T42	569.87	569.95	
807	804-807	T43	620.00	248.73	
22	807-22	T44	622.75	5.87	48.07
812	807-812	T45	620.00	250.95	
23	812-23	T46	626.66	3.76	
813	812-813	T47	620.00	15.43	
147	813-147	T48	640.18	229.41	
24	147-24	T49	640.18	2.10	
148	813-148	T50	628.48	112.84	
25	148-25	T51	628.48	4.10	
803	804-803	T52	600.00	13.62	
810	803-810	T53	620.00	384.20	
26	810-26	T54	627.09	4.58	57.91
811	810-811	T55	670.00	482.44	
27	811-27	T56	678.34	5.15	
802	803-802	T57	570.00	359.28	
152	802-152	T58	619.21	250.44	
28	152-28	T59	619.21	4.18	
151	152-151	T60	620.26	302.59	
29	151-29	T61	620.26	4.20	
801	802-801	T62	570.00	12.58	
30	801-30	T63	578.38	4.19	48.50
800	801-800	T64	570.00	248.24	
31	800-31	T65	575.33	106.88	69.00
828	800-828	T66	575.00	283.00	
32	828-32	T67	581.24	61.22	21.25
33	828-33	T68	581.24	50.00	

<b>Turno 2</b>					
<b>ID Nudo</b>	<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Pmin (mca)</b>
<b>[1]</b>	<b>[2]</b>	<b>[3]</b>	<b>[4]</b>	<b>[5]</b>	<b>[6]</b>
			710.50		
999	0-999	T1	590.00	100.00	
826	999-826	T2	560.00	308.90	
827	826-827	T3	562.00	599.89	
1	827-1	T4	567.75	4.87	

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

2	827-2	T5	563.62	146.99	85.38
823	826-823	T6	588.00	376.58	
3	823-3	T7	592.02	43.25	
824	823-824	T8	680.00	201.29	
4	824-4	T9	595.03	2.36	
825	824-825	T10	585.00	91.96	
5	825-5	T11	596.47	3.22	57.92
809	825-809	T12	600.00	569.63	
6	809-6	T13	610.01	2.88	
808	809-808	T14	600.00	195.45	
7	808-7	T15	616.41	5.36	64.82
820	808-820	T16	630.00	720.03	
822	820-822	T17	620.00	148.57	
8	822-8	T18	623.58	3.96	
9	822-9	T19	598.74	341.32	
821	820-821	T20	630.00	2.07	
10	821-10	T21	634.63	4.06	
819	821-819	T22	630.00	44.24	
11	819-11	T23	633.52	5.55	
818	819-818	T24	625.00	105.21	
12	818-12	T25	630.28	2.77	
817	818-817	T26	610.00	144.70	
13	817-13	T27	616.28	3.03	
816	817-816	T28	575.00	233.95	
14	816-14	T29	588.00	6.27	
15	816-15	T30	588.00	9.51	43.84
814	15-814	T31	600.00	166.97	
16	814-16	T32	590.00	113.55	
815	814-815	T33	600.00	5.31	
17	815-17	T34	606.63	4.73	
18	815-18	T35	632.55	233.78	46.65
806	808-806	T36	600.00	124.78	
19	806-19	T37	611.27	6.32	
804	806-804	T38	600.00	92.39	
805	804-805	T39	600.00	9.40	
20	805-20	T40	600.61	4.72	
998	805-998	T41	569.87	317.08	
21	998-21	T42	569.87	569.95	
807	804-807	T43	620.00	248.73	
22	807-22	T44	622.75	5.87	
812	807-812	T45	620.00	250.95	
23	812-23	T46	626.66	3.76	
813	812-813	T47	620.00	15.43	
147	813-147	T48	640.18	229.41	
24	147-24	T49	640.18	2.10	44.82
148	813-148	T50	628.48	112.84	
25	148-25	T51	628.48	4.10	

803	804-803	T52	600.00	13.62	
810	803-810	T53	620.00	384.20	
26	810-26	T54	627.09	4.58	
811	810-811	T55	670.00	482.44	
27	811-27	T56	678.34	5.15	24.66
802	803-802	T57	570.00	359.28	
152	802-152	T58	619.21	250.44	
28	152-28	T59	619.21	4.18	
151	152-151	T60	620.26	302.59	
29	151-29	T61	620.26	4.20	74.20
801	802-801	T62	570.00	12.58	
30	801-30	T63	578.38	4.19	
800	801-800	T64	570.00	248.24	
31	800-31	T65	575.33	106.88	
828	800-828	T66	575.00	283.00	
32	828-32	T67	581.24	61.22	
33	828-33	T68	581.24	50.00	

<b>Turno 3</b>					
<b>ID Nudo</b>	<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Pmin (mca)</b>
<b>[1]</b>	<b>[2]</b>	<b>[3]</b>	<b>[4]</b>	<b>[5]</b>	<b>[6]</b>
			710.50		
999	0-999	T1	590.00	100.00	
826	999-826	T2	560.00	308.90	
827	826-827	T3	562.00	599.89	
1	827-1	T4	567.75	4.87	
2	827-2	T5	563.62	146.99	
823	826-823	T6	588.00	376.58	
3	823-3	T7	592.02	43.25	50.61
824	823-824	T8	680.00	201.29	
4	824-4	T9	595.03	2.36	56.01
825	824-825	T10	585.00	91.96	
5	825-5	T11	596.47	3.22	
809	825-809	T12	600.00	569.63	
6	809-6	T13	610.01	2.88	
808	809-808	T14	600.00	195.45	
7	808-7	T15	616.41	5.36	
820	808-820	T16	630.00	720.03	
822	820-822	T17	620.00	148.57	
8	822-8	T18	623.58	3.96	45.38
9	822-9	T19	598.74	341.32	
821	820-821	T20	630.00	2.07	
10	821-10	T21	634.63	4.06	
819	821-819	T22	630.00	44.24	
11	819-11	T23	633.52	5.55	
818	819-818	T24	625.00	105.21	

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

12	818-12	T25	630.28	2.77	48.73
817	818-817	T26	610.00	144.70	
13	817-13	T27	616.28	3.03	
816	817-816	T28	575.00	233.95	
14	816-14	T29	588.00	6.27	32.65
15	816-15	T30	588.00	9.51	
814	15-814	T31	600.00	166.97	
16	814-16	T32	590.00	113.55	27.45
815	814-815	T33	600.00	5.31	
17	815-17	T34	606.63	4.73	39.41
18	815-18	T35	632.55	233.78	
806	808-806	T36	600.00	124.78	
19	806-19	T37	611.27	6.32	
804	806-804	T38	600.00	92.39	
805	804-805	T39	600.00	9.40	
20	805-20	T40	600.61	4.72	
998	805-998	T41	569.87	317.08	
21	998-21	T42	569.87	569.95	62.92
807	804-807	T43	620.00	248.73	
22	807-22	T44	622.75	5.87	
812	807-812	T45	620.00	250.95	
23	812-23	T46	626.66	3.76	46.78
813	812-813	T47	620.00	15.43	
147	813-147	T48	640.18	229.41	
24	147-24	T49	640.18	2.10	
148	813-148	T50	628.48	112.84	
25	148-25	T51	628.48	4.10	31.52
803	804-803	T52	600.00	13.62	
810	803-810	T53	620.00	384.20	
26	810-26	T54	627.09	4.58	
811	810-811	T55	670.00	482.44	
27	811-27	T56	678.34	5.15	
802	803-802	T57	570.00	359.28	
152	802-152	T58	619.21	250.44	
28	152-28	T59	619.21	4.18	45.79
151	152-151	T60	620.26	302.59	
29	151-29	T61	620.26	4.20	
801	802-801	T62	570.00	12.58	
30	801-30	T63	578.38	4.19	
800	801-800	T64	570.00	248.24	
31	800-31	T65	575.33	106.88	
828	800-828	T66	575.00	283.00	
32	828-32	T67	581.24	61.22	
33	828-33	T68	581.24	50.00	104.27

Tabla E.6. Celdas para configurar la PNL

COSTO TOTAL \$ 955994.90

Turno 1											
Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]	
			710.50								
999	0-999	T1	590.00	175.00	100.00	330.01		8328.13	709.66	119.66	
826	999-826	T2	560.00	175.00	308.90	329.69		25676.33	707.06	147.06	
827	826-827	T3	562.00	12.00	599.89	75.63		2723.74	659.12	97.12	
1	827-1	T4	567.75	12.00	4.87	37.07	77.31	5.41	645.56	77.81	
2	827-2	T5	563.62		146.99	75.57		666.40	659.12	95.50	
823	826-823	T6	588.00	163.00	376.58	324.27		30292.55	704.04	116.04	
3	823-3	T7	592.02		43.25	42.52		62.98	704.04	112.02	
824	823-824	T8	680.00	163.00	201.29	321.57		15927.31	702.36	22.36	
4	824-4	T9	595.03		2.36	25.00		1.20	702.36	107.33	
825	824-825	T10	585.00	163.00	91.96	319.66		7191.55	701.57	116.57	
5	825-5	T11	596.47		3.22	41.54		4.48	701.57	105.10	
809	825-809	T12	600.00	163.00	569.63	312.22		42520.89	696.08	96.08	
6	809-6	T13	610.01	15.00	2.88	204.21	40.51	92.97	696.08	86.07	
808	809-808	T14	600.00	148.00	195.45	311.22		14497.51	694.48	94.48	
7	808-7	T15	616.41		5.36	33.78		4.96	694.48	78.07	
820	808-820	T16	630.00	51.00	720.03	210.52		24681.51	688.93	58.93	
822	820-822	T17	620.00	12.00	148.57	81.63		784.45	680.77	60.77	
8	822-8	T18	623.58		3.96	75.41		17.88	680.77	57.19	
9	822-9	T19	598.74	12.00	341.32	71.78	46.26	1397.86	645.50	46.76	
821	820-821	T20	630.00	39.00	2.07	197.18		62.38	688.91	58.91	
10	821-10	T21	634.63	12.00	4.06	114.73	53.74	41.98	688.87	54.24	
819	821-819	T22	630.00	27.00	44.24	192.90		1276.13	688.75	58.75	
11	819-11	T23	633.52	15.00	5.55	48.97	25.89	10.68	682.92	49.40	
818	819-818	T24	625.00	12.00	105.21	190.91		2973.33	688.66	63.66	
12	818-12	T25	630.28		2.77	131.09		37.29	688.66	58.38	
817	818-817	T26	610.00	12.00	144.70	131.58		1960.91	687.88	77.88	
13	817-13	T27	616.28	12.00	3.03	26.54	25.00	1.74	641.78	25.50	
816	817-816	T28	575.00		233.95	131.56		3169.56	687.88	112.88	
14	816-14	T29	588.00		6.27	41.51		8.71	687.88	99.88	
15	816-15	T30	588.00		9.51	119.79		107.08	687.88	99.88	
814	15-814	T31	600.00		166.97	115.66		1754.03	687.88	87.88	
16	814-16	T32	590.00		113.55	69.71		439.02	687.88	97.88	
815	814-815	T33	600.00		5.31	94.29		37.27	687.88	87.88	
17	815-17	T34	606.63		4.73	89.02		29.64	687.88	81.25	
18	815-18	T35	632.55		233.78	79.38		1167.99	687.88	55.33	
806	808-806	T36	600.00	97.00	124.78	244.62		5753.24	692.96	92.96	
19	806-19	T37	611.27	12.00	6.32	63.36	37.19	20.23	691.76	80.49	
804	806-804	T38	600.00	85.00	92.39	247.23		4349.96	692.13	92.13	
805	804-805	T39	600.00	15.00	9.40	85.48		54.36	691.51	91.51	
20	805-20	T40	600.61	15.00	4.72	66.89	47.50	16.82	690.46	89.85	
998	805-998	T41	569.87		317.08	85.49		1833.99	690.46	120.59	
21	998-21	T42	569.87		569.95	85.37		3287.67	690.46	120.59	
807	804-807	T43	620.00	12.00	248.73	129.08		3245.55	690.66	70.66	
22	807-22	T44	622.75	12.00	5.87	35.85	48.07	6.10	671.32	48.57	
812	807-812	T45	620.00		250.95	129.09		3275.25	690.66	70.66	
23	812-23	T46	626.66		3.76	115.55		39.43	690.66	64.00	
813	812-813	T47	620.00		15.43	93.74		107.06	690.66	70.66	
147	813-147	T48	640.18		229.41	86.31		1352.29	690.66	50.48	
24	147-24	T49	640.18		2.10	92.33		14.14	690.66	50.48	
148	813-148	T50	628.48		112.84	82.97		615.21	690.66	62.18	
25	148-25	T51	628.48		4.10	82.82		22.27	690.66	62.18	
803	804-803	T52	600.00	58.00	13.62	197.92		413.33	691.95	91.95	

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

810	803-810	T53	620.00	12.00	384.20	164.11		8054.05	691.24	71.24
26	810-26	T54	627.09	12.00	4.58	43.44	57.91	6.96	685.50	58.41
811	810-811	T55	670.00		482.44	164.06		10107.42	691.24	21.24
27	811-27	T56	678.34		5.15	166.38		110.93	691.24	12.90
802	803-802	T57	570.00	46.00	359.28	162.29		7368.05	683.96	113.96
152	802-152	T58	619.21		250.44	103.82		2125.79	683.96	64.75
28	152-28	T59	619.21		4.18	79.03		20.73	683.96	64.75
151	152-151	T60	620.26		302.59	103.70		2562.37	683.96	63.70
29	151-29	T61	620.26		4.20	104.12		35.85	683.96	63.70
801	802-801	T62	570.00	46.00	12.58	138.39		188.36	683.33	113.33
30	801-30	T63	578.38	15.00	4.19	88.66	48.50	26.04	683.10	104.72
800	801-800	T64	570.00	31.00	248.24	137.67		3678.78	677.25	107.25
31	800-31	T65	575.33	12.00	106.88	57.72	69.00	284.65	644.83	69.50
828	800-828	T66	575.00	19.00	283.00	138.52		4244.88	674.51	99.51
32	828-32	T67	581.24	19.00	61.22	52.44	21.25	134.91	602.99	21.75
33	828-33	T68	581.24		50.00	137.51		739.23	602.99	21.75

**Turno 2**

Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
			710.50							
999	0-999	T1	590.00	102.00	100.00				710.19	120.19
826	999-826	T2	560.00	102.00	308.90				709.23	149.23
827	826-827	T3	562.00	12.00	599.89				661.29	99.29
1	827-1	T4	567.75		4.87				661.29	93.54
2	827-2	T5	563.62	12.00	146.99		85.38		649.50	85.88
823	826-823	T6	588.00	90.00	376.58				708.22	120.22
3	823-3	T7	592.02		43.25				708.22	116.20
824	823-824	T8	680.00	90.00	201.29				707.66	27.66
4	824-4	T9	595.03		2.36				707.66	112.63
825	824-825	T10	585.00	90.00	91.96				707.40	122.40
5	825-5	T11	596.47	15.00	3.22		57.92		699.66	103.19
809	825-809	T12	600.00	75.00	569.63				706.09	106.09
6	809-6	T13	610.01		2.88				706.09	96.08
808	809-808	T14	600.00	75.00	195.45				705.63	105.63
7	808-7	T15	616.41	12.00	5.36		64.82		681.73	65.32
820	808-820	T16	630.00	24.00	720.03				704.23	74.23
822	820-822	T17	620.00		148.57				704.23	84.23
8	822-8	T18	623.58		3.96				704.23	80.65
9	822-9	T19	598.74		341.32				704.23	105.49
821	820-821	T20	630.00	24.00	2.07				704.22	74.22
10	821-10	T21	634.63		4.06				704.22	69.59
819	821-819	T22	630.00	24.00	44.24				704.09	74.09
11	819-11	T23	633.52		5.55				704.09	70.57
818	819-818	T24	625.00	24.00	105.21				703.76	78.76
12	818-12	T25	630.28		2.77				703.76	73.48
817	818-817	T26	610.00	24.00	144.70				701.00	91.00
13	817-13	T27	616.28		3.03				701.00	84.72
816	817-816	T28	575.00	24.00	233.95				696.54	121.54
14	816-14	T29	588.00		6.27				696.54	108.54
15	816-15	T30	588.00	24.00	9.51		43.84		696.25	108.25
814	15-814	T31	600.00	12.00	166.97				694.57	94.57
16	814-16	T32	590.00		113.55				694.57	104.57
815	814-815	T33	600.00	12.00	5.31				694.43	94.43
17	815-17	T34	606.63		4.73				694.43	87.80
18	815-18	T35	632.55	12.00	233.78		46.65		679.70	47.15
806	808-806	T36	600.00	39.00	124.78				705.35	105.35
19	806-19	T37	611.27		6.32				705.35	94.08
804	806-804	T38	600.00	39.00	92.39				705.15	105.15
805	804-805	T39	600.00		9.40				705.15	105.15



20	805-20	T40	600.61			4.72				705.15	104.54
998	805-998	T41	569.87			317.08				705.15	135.28
21	998-21	T42	569.87			569.95				705.15	135.28
807	804-807	T43	620.00	15.00		248.73				702.95	82.95
22	807-22	T44	622.75			5.87				702.95	80.20
812	807-812	T45	620.00	15.00		250.95				700.73	80.73
23	812-23	T46	626.66			3.76				700.73	74.07
813	812-813	T47	620.00	15.00		15.43				700.08	80.08
147	813-147	T48	640.18	15.00		229.41				685.60	45.42
24	147-24	T49	640.18	15.00		2.10		44.82		685.50	45.32
148	813-148	T50	628.48			112.84				700.08	71.60
25	148-25	T51	628.48			4.10				700.08	71.60
803	804-803	T52	600.00	24.00		13.62				705.11	105.11
810	803-810	T53	620.00	12.00		384.20				704.40	84.40
26	810-26	T54	627.09			4.58				704.40	77.31
811	810-811	T55	670.00	12.00		482.44				703.51	33.51
27	811-27	T56	678.34	12.00		5.15		24.66		703.50	25.16
802	803-802	T57	570.00	12.00		359.28				704.45	134.45
152	802-152	T58	619.21	12.00		250.44				700.20	80.99
28	152-28	T59	619.21			4.18				700.20	80.99
151	152-151	T60	620.26	12.00		302.59				695.03	74.77
29	151-29	T61	620.26	12.00		4.20		74.20		694.96	74.70
801	802-801	T62	570.00			12.58				704.45	134.45
30	801-30	T63	578.38			4.19				704.45	126.07
800	801-800	T64	570.00			248.24				704.45	134.45
31	800-31	T65	575.33			106.88				704.45	129.12
828	800-828	T66	575.00			283.00				704.45	129.45
32	828-32	T67	581.24			61.22				704.45	123.21
33	828-33	T68	581.24			50.00				704.45	123.21

## Turno 3

Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
			710.50							
999	0-999	T1	590.00	177.00	100.00				709.64	119.64
826	999-826	T2	560.00	177.00	308.90				706.99	146.99
827	826-827	T3	562.00		599.89				706.99	144.99
1	827-1	T4	567.75		4.87				706.99	139.24
2	827-2	T5	563.62		146.99				706.99	143.37
823	826-823	T6	588.00	177.00	376.58				703.47	115.47
3	823-3	T7	592.02	12.00	43.25		50.61		643.13	51.11
824	823-824	T8	680.00	165.00	201.29				701.75	21.75
4	824-4	T9	595.03	12.00	2.36		56.01		653.07	58.04
825	824-825	T10	585.00	153.00	91.96				701.05	116.05
5	825-5	T11	596.47		3.22				701.05	104.58
809	825-809	T12	600.00	153.00	569.63				696.17	96.17
6	809-6	T13	610.01		2.88				696.17	86.16
808	809-808	T14	600.00	153.00	195.45				694.47	94.47
7	808-7	T15	616.41		5.36				694.47	78.06
820	808-820	T16	630.00	78.00	720.03				682.28	52.28
822	820-822	T17	620.00	15.00	148.57				669.95	49.95
8	822-8	T18	623.58	15.00	3.96		45.38		669.46	45.88
9	822-9	T19	598.74		341.32				669.95	71.21
821	820-821	T20	630.00	63.00	2.07				682.25	52.25
10	821-10	T21	634.63		4.06				682.25	47.62
819	821-819	T22	630.00	63.00	44.24				681.48	51.48
11	819-11	T23	633.52		5.55				681.48	47.96
818	819-818	T24	625.00	63.00	105.21				679.54	54.54
12	818-12	T25	630.28	18.00	2.77		48.73		679.51	49.23
817	818-817	T26	610.00	45.00	144.70				670.68	60.68

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

13	817-13	T27	616.28		3.03		670.68	54.40
816	817-816	T28	575.00	45.00	233.95		656.35	81.35
14	816-14	T29	588.00	15.00	6.27	32.65	641.22	53.22
15	816-15	T30	588.00	30.00	9.51		655.91	67.91
814	15-814	T31	600.00	30.00	166.97		646.85	46.85
16	814-16	T32	590.00	18.00	113.55	27.45	617.95	27.95
815	814-815	T33	600.00	12.00	5.31		646.71	46.71
17	815-17	T34	606.63	12.00	4.73	39.41	646.54	39.91
18	815-18	T35	632.55		233.78		646.71	14.16
806	808-806	T36	600.00	75.00	124.78		693.52	93.52
19	806-19	T37	611.27		6.32		693.52	82.25
804	806-804	T38	600.00	75.00	92.39		692.86	92.86
805	804-805	T39	600.00	15.00	9.40		692.24	92.24
20	805-20	T40	600.61		4.72		692.24	91.63
998	805-998	T41	569.87	15.00	317.08		671.26	101.39
21	998-21	T42	569.87	15.00	569.95	62.92	633.29	63.42
807	804-807	T43	620.00	33.00	248.73		683.47	63.47
22	807-22	T44	622.75		5.87		683.47	60.72
812	807-812	T45	620.00	33.00	250.95		674.00	54.00
23	812-23	T46	626.66	15.00	3.76	46.78	673.94	47.28
813	812-813	T47	620.00	18.00	15.43		673.09	53.09
147	813-147	T48	640.18		229.41		673.09	32.91
24	147-24	T49	640.18		2.10		673.09	32.91
148	813-148	T50	628.48	18.00	112.84		660.95	32.47
25	148-25	T51	628.48	18.00	4.10	31.52	660.50	32.02
803	804-803	T52	600.00	27.00	13.62		692.82	92.82
810	803-810	T53	620.00		384.20		692.82	72.82
26	810-26	T54	627.09		4.58		692.82	65.73
811	810-811	T55	670.00		482.44		692.82	22.82
27	811-27	T56	678.34		5.15		692.82	14.48
802	803-802	T57	570.00	27.00	359.28		689.80	119.80
152	802-152	T58	619.21	12.00	250.44		685.55	66.34
28	152-28	T59	619.21	12.00	4.18	45.79	685.28	66.07
151	152-151	T60	620.26		302.59		685.55	65.29
29	151-29	T61	620.26		4.20		685.55	65.29
801	802-801	T62	570.00	15.00	12.58		689.72	119.72
30	801-30	T63	578.38		4.19		689.72	111.34
800	801-800	T64	570.00	15.00	248.24		688.11	118.11
31	800-31	T65	575.33		106.88		688.11	112.78
828	800-828	T66	575.00	15.00	283.00		686.34	111.34
32	828-32	T67	581.24		61.22		686.34	105.10
33	828-33	T68	581.24	15.00	50.00	104.27	686.01	104.77

**Tabla E.7. Diseño hidráulico de la Red Cenicero, luego de implementar AG-PNL**

ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]
T1	330.00	T24	190.90	T47	93.70
T2	329.70	T25	131.10	T48	86.30
T3	75.60	T26	131.60	T49	92.30
T4	37.10	T27	26.50	T50	83.00
T5	75.60	T28	131.60	T51	82.80
T6	324.30	T29	41.50	T52	197.90
T7	42.50	T30	119.80	T53	164.10
T8	321.60	T31	115.70	T54	43.40
T9	25.00	T32	69.70	T55	164.10
T10	319.70	T33	94.30	T56	166.40
T11	41.50	T34	89.00	T57	162.30
T12	312.20	T35	79.40	T58	103.80
T13	204.20	T36	244.60	T59	79.00
T14	311.20	T37	63.40	T60	103.70
T15	33.80	T38	247.20	T61	104.10
T16	210.50	T39	85.50	T62	138.40
T17	81.60	T40	66.90	T63	88.70
T18	75.40	T41	85.50	T64	137.70
T19	71.80	T42	85.40	T65	57.70
T20	197.20	T43	129.10	T66	138.50
T21	114.70	T44	35.80	T67	52.40
T22	192.90	T45	129.10	T68	137.50
T23	49.00	T46	115.60		

**Tabla E.8. Resultados de asignación de turno con modelo AG-PNL en cada hidrante de la Red de Riego Cenicero**

Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]
1	1	12.00	18	2	12.00
2	2	12.00	19	1	12.00
3	3	12.00	20	1	15.00
4	3	12.00	21	3	15.00
5	2	15.00	22	1	12.00
6	1	15.00	23	3	15.00
7	2	12.00	24	2	15.00
8	3	15.00	25	3	18.00
9	1	12.00	26	1	12.00
10	1	12.00	27	2	12.00
11	1	15.00	28	3	12.00
12	3	18.00	29	2	12.00
13	1	12.00	30	1	15.00
14	3	15.00	31	1	12.00
15	2	12.00	32	1	19.00
16	3	18.00	33	3	15.00
17	3	12.00			

**Tabla E.9. Resultados de cumplimiento de la Fiabilidad de presión por hidrante de la Red de Riego Cenicero**

Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>	Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>
1	H3	165	1.00	18	H23	219	1.00
2	H9	222	0.89	19	H22	217	1.00
3	H8	245	0.68	20	H4	188	1.00
4	H11	207	1.00	21	H5	243	1.00
5	H1	108	0.69	22	H6	221	1.00
6	H2	212	0.84	23	H7	193	1.00
7	H12	237	1.00	24	H19	202	1.00
8	H18	162	0.40	25	H20	234	1.00
9	H17	142	0.99	26	H26	225	1.00
10	H14	220	1.00	27	H27	182	0.00
11	H13	201	1.00	28	H32	244	1.00
12	H15	209	1.00	29	H28	121	1.00
13	H16	233	1.00	30	H29	119	0.00
14	H10	219	0.99	31	H25	151	1.00
15	H33	239	0.64	32	H24	220	0.60
16	H31	210	1.00	33	H21	196	1.00
17	H30	194	1.00				

$\Sigma$	28.74
<i>IFCT</i>	0.87

**Tabla E.10. Simulación de  $N_T$  y Flexibilidad. Red Cenicero**

$N_T$	Flexibilidad
660	0.87

## F) Ejemplo de implementación Molinar I

### Características topológicas de la red

Tabla F.1. ID Nudos y cotas. Caso RCRP “Molinar I”

ID Nudo	Cota (m)	ID Nudo	Cota (m)	ID Nudo	Cota (m)	ID Nudo	Cota (m)
	436.00	825	378.00	48	343.79	73	350.84
801	370.00	26	378.08	854	344.00	74	350.95
802	370.00	826	375.00	855	345.00	75	348.13
803	380.00	27	374.71	856	344.00	76	347.76
804	381.00	827	371.00	49	342.52	880	348.00
1	380.06	28	370.46	50	342.56	77	346.76
805	381.00	828	371.00	857	362.00	881	352.00
2	364.47	829	365.00	51	361.68	78	351.86
806	380.00	29	361.38	858	366.00	882	366.00
3	381.15	30	361.72	52	365.12	79	365.61
807	379.00	830	371.00	53	364.77	80	366.17
808	379.50	31	371.00	859	363.00	81	346.56
4	379.01	831	368.00	54	362.44	82	347.26
5	376.29	32	365.21	860	363.00	883	347.00
6	365.85	33	376.68	55	363.27	884	346.00
809	375.50	832	375.00	861	371.00	83	345.77
810	375.50	833	375.00	56	371.63	885	346.50
7	375.76	34	374.68	862	374.00	84	345.81
8	375.82	834	372.00	863	374.00	85	345.84
9	378.60	835	370.00	57	373.21	886	346.00
10	376.02	836	365.00	58	373.41	86	345.05
901	380.00	35	365.52	864	368.00	87	345.25
11	380.32	837	370.00	59	366.25	887	351.00
12	378.78	838	370.00	865	365.00	888	354.40
811	380.00	36	370.04	60	383.02	88	354.16
812	374.00	37	369.72	866	363.00	89	354.25
13	374.14	839	370.00	61	362.67	889	350.00
813	377.00	38	368.77	867	366.00	890	351.00
14	376.55	840	369.00	62	365.27	90	350.74
15	379.78	841	362.00	868	365.00	891	351.00
814	380.00	39	361.32	63	363.47	91	357.02
815	370.00	40	351.93	869	363.00	892	348.00
816	360.00	842	350.00	64	360.76	92	347.11
16	360.53	41	349.55	870	358.00	893	344.00
817	360.00	843	360.00	65	357.86	93	342.55
17	359.94	844	362.00	871	357.00	894	351.00
818	370.00	42	354.80	872	357.00	895	345.00

18	369.50	43	362.64	66	356.91	94	343.92
819	368.00	845	362.00	67	357.30	896	336.00
19	367.76	846	361.00	873	353.00	95	335.82
820	370.00	44	361.82	68	352.44	96	335.66
821	361.00	847	351.00	874	352.00	897	337.00
822	361.00	848	350.00	69	350.66	97	335.79
20	360.66	45	346.57	875	350.00	898	334.00
21	362.03	849	352.00	876	348.00	899	333.00
823	365.00	850	346.00	70	348.40	98	332.78
22	364.09	851	356.00	877	348.00	900	333.00
23	364.21	46	357.28	878	349.00	99	334.78
24	361.98	852	345.00	71	348.71	73	350.84
824	380.00	47	345.16	72	348.82	74	350.95
25	378.86	853	344.00	879	351.00	75	348.13

**Tabla F.2. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Molinar I”**

Nin-Nfin	ID Linea	Longitud (m)	Nin-Nfin	ID Linea	Longitud (m)	Nin-Nfin	ID Linea	Longitud (m)
0-801	T1	50.00	833-34	T68	3.28	869-870	T135	93.96
801-802	T2	70.00	833-834	T69	284.56	870-65	T136	4.47
802-803	T3	258.05	834-835	T70	181.85	870-871	T137	12.54
803-804	T4	193.89	835-836	T71	207.24	871-872	T138	4.45
804-1	T5	8.31	836-35	T72	6.37	872-66	T139	4.68
804-805	T6	56.10	835-837	T73	273.35	872-67	T140	177.73
805-2	T7	288.24	837-838	T74	14.85	871-873	T141	186.23
805-806	T8	117.61	838-36	T75	7.45	873-68	T142	17.42
806-3	T9	15.25	838-37	T76	9.22	873-874	T143	174.43
806-807	T10	121.78	837-839	T77	172.83	874-69	T144	3.75
807-808	T11	79.68	839-38	T78	4.89	874-875	T145	198.31
808-4	T12	24.79	839-840	T79	202.85	875-876	T146	252.08
808-5	T13	363.92	840-841	T80	66.56	876-70	T147	36.03
43621	T14	338.61	841-39	T81	10.51	876-877	T148	202.17
807-809	T15	288.42	841-40	T82	144.63	877-878	T149	372.52
809-810	T16	13.32	840-842	T83	367.09	878-71	T150	25.23
810-7	T17	4.38	842-41	T84	33.36	878-72	T151	10.82
810-8	T18	5.24	842-843	T85	361.15	878-879	T152	352.52
809-9	T19	322.20	843-844	T86	310.89	879-73	T153	3.43
43747	T20	201.86	844-42	T87	113.23	879-74	T154	10.72
803-901	T21	86.10	844-43	T88	7.87	877-75	T155	12.79
901-11	T22	9.85	844-845	T89	202.96	877-76	T156	18.19
901-12	T23	13.71	845-846	T90	180.48	877-880	T157	280.57
901-811	T24	415.34	846-44	T91	6.70	880-77	T158	27.12
811-812	T25	310.65	846-847	T92	209.34	880-881	T159	315.37
812-13	T26	5.98	847-848	T93	291.32	881-78	T160	11.18
812-813	T27	58.28	848-45	T94	9.28	881-882	T161	235.00
813-14	T28	10.48	848-849	T95	260.64	882-79	T162	28.43

---

813-15	T29	123.41	849-850	T96	185.09	882-80	T163	103.24
811-814	T30	160.13	850-851	T97	239.55	880-81	T164	294.91
814-815	T31	199.91	851-46	T98	257.55	81-82	T165	30.21
815-816	T32	82.78	850-852	T99	18.73	81-883	T166	338.83
816-16	T33	7.43	852-47	T100	6.25	883-884	T167	349.49
816-817	T34	256.20	852-853	T101	71.01	884-83	T168	3.74
817-17	T35	8.80	853-48	T102	1.40	884-885	T169	129.37
815-818	T36	9.05	853-854	T103	114.55	885-84	T170	19.45
818-18	T37	7.23	854-855	T104	150.07	885-85	T171	8.83
818-819	T38	204.48	855-856	T105	157.00	885-886	T172	23.65
819-19	T39	5.41	856-49	T106	2.00	886-86	T173	7.77
819-820	T40	288.24	856-50	T107	2.00	886-87	T174	412.18
820-821	T41	311.09	845-857	T108	11.31	885-887	T175	371.90
821-822	T42	9.53	857-51	T109	5.03	887-888	T176	354.78
822-20	T43	6.03	857-858	T110	286.65	888-88	T177	9.97
822-21	T44	316.41	858-52	T111	6.51	888-89	T178	8.22
821-823	T45	285.73	52-53	T112	7.30	888-889	T179	136.47
823-22	T46	8.10	858-859	T113	385.76	889-890	T180	110.16
823-23	T47	3.51	859-54	T114	3.07	890-90	T181	3.28
823-24	T48	370.73	859-860	T115	15.17	890-891	T182	15.36
814-824	T49	16.50	860-55	T116	4.26	891-91	T183	215.96
824-25	T50	5.72	860-861	T117	210.34	889-892	T184	62.35
824-825	T51	311.04	861-56	T118	1.80	892-92	T185	4.07
825-26	T52	26.81	861-862	T119	68.83	892-893	T186	245.49
825-826	T53	132.03	862-863	T120	13.88	893-93	T187	45.64
826-27	T54	12.64	863-57	T121	4.46	893-894	T188	450.00
826-827	T55	106.81	863-58	T122	10.87	894-895	T189	545.23
827-28	T56	3.38	862-864	T123	162.68	895-94	T190	12.39
827-828	T57	152.94	864-59	T124	21.19	895-896	T191	117.59
828-829	T58	300.00	864-865	T125	300.00	896-95	T192	31.28
829-29	T59	433.10	865-60	T126	525.99	896-96	T193	5.77
29-30	T60	7.14	860-866	T127	473.81	896-897	T194	6.92
828-830	T61	26.07	866-61	T128	23.88	897-97	T195	10.35
830-31	T62	6.46	866-867	T129	110.42	897-898	T196	230.26
830-831	T63	284.05	867-62	T130	3.71	898-899	T197	173.54
831-32	T64	314.20	867-868	T131	146.05	899-98	T198	4.71
825-33	T65	240.98	868-63	T132	23.16	899-900	T199	208.52
33-832	T66	449.34	868-869	T133	124.59	900-99	T200	273.67
832-833	T67	6.50	869-64	T134	2.00	869-870	T135	93.96

---

**Tabla F.3. Valores de demanda en hidrantes. Caso RCRP “Molinar I”**

ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)
1	1	22.6	34	34	23.4	67	67	23.4
2	2	23.4	35	35	26	68	68	32.5
3	3	31.5	36	36	50.4	69	69	37.2
4	4	31.5	37	37	18	70	70	34.2
5	5	27.6	38	38	18	71	71	76
6	6	20.4	39	39	27.7	72	72	24.8
7	7	34.2	40	40	54	73	73	18
8	8	36.5	41	41	50	74	74	75
9	9	23.4	42	42	18	75	75	18
10	10	31	43	43	18	76	76	28.7
11	11	38	44	44	25.2	77	77	18
12	12	72	45	45	33.9	78	78	18
13	13	19.5	46	46	21.4	79	79	53.7
14	14	25.8	47	47	18	80	80	22.6
15	15	29	48	48	18	81	81	30.2
16	16	26	49	49	18	82	82	33.2
17	17	23.4	50	50	18	83	83	34.1
18	18	18	51	51	33	84	84	21.3
19	19	26.7	52	52	106	85	85	18.1
20	20	22.5	53	53	55.8	86	86	27.6
21	21	23.4	54	54	28.8	87	87	18
22	22	28.8	55	55	18	88	88	18
23	23	18	56	56	55	89	89	41.8
24	24	23.4	57	57	28.8	90	90	18
25	25	18	58	58	18	91	91	28.5
26	26	18	59	59	18	92	92	23.4
27	27	18	60	60	18	93	93	18
28	28	23.4	61	61	28.8	94	94	51.7
29	29	31.6	62	62	61.2	95	95	27.3
30	30	19.6	63	63	39.6	96	96	24.6
31	31	23.4	64	64	31.5	97	97	18
32	32	29.3	65	65	35.8	98	98	23.2
33	33	28.8	66	66	18	99	99	24.5



Tabla F.4. Variables de entrada topología. Caso RCRP "Molinar I"

ID Nudo	ID Hidrante	ASIG. TURNO	DOTAC. [L/S]	Q TT1	Q TT2	Q TT3	SQTT
				175.00	102.00	177.00	454.00
[1]	[2]	[3]	[4]	Q T1	Q T2	Q T3	
1	1	1	12.00	12.00			
2	1	2	12.00		12.00		
3	1	3	12.00			12.00	
4	1	3	12.00			12.00	
5	1	2	15.00		15.00		
6	1	1	15.00	15.00			
7	1	2	12.00		12.00		
8	1	3	15.00			15.00	
9	1	1	12.00	12.00			
10	1	1	12.00	12.00			
11	1	1	15.00	15.00			
12	1	3	18.00			18.00	
13	1	1	12.00	12.00			
14	1	3	15.00			15.00	
15	1	2	12.00		12.00		
16	1	3	18.00			18.00	
17	1	3	12.00			12.00	
18	1	2	12.00		12.00		
19	1	1	12.00	12.00			
20	1	1	15.00	15.00			
21	1	3	15.00			15.00	
22	1	1	12.00	12.00			
23	1	3	15.00			15.00	
24	1	2	15.00		15.00		
25	1	3	18.00			18.00	
26	1	1	12.00	12.00			
27	1	2	12.00		12.00		
28	1	3	12.00			12.00	
29	1	2	12.00		12.00		
30	1	1	15.00	15.00			
31	1	1	12.00	12.00			
32	1	1	19.00	19.00			
33	1	3	15.00			15.00	

**Coste 4513577 USD**

**Tabla F.5. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Molinar I”**

**Datos generales**

Viscosidad cinemática	0,000001 m <sup>2</sup> /s
Rugosidad absoluta	7,00E-03 mm
Curva de costo de la tubería	
Coefficiente A	745
Exponente a	1975
Viscosidad dinámica	1,00E-03 kg/m.s

<b>Turno 1</b>					
ID Nudo	Nin-Nfin	ID Linea	Cota	Longitud	Pmin
[1]	[2]	[3]	[m]	[m]	[mca]
[4]	[5]	[6]			
			436.00		
801	0-801	T1	370.00	50.00	
802	801-802	T2	370.00	70.00	
803	802-803	T3	380.00	258.05	
804	803-804	T4	381.00	193.89	
1	804-1	T5	380.06	8.31	
805	804-805	T6	381.00	56.10	
2	805-2	T7	364.47	288.24	
806	805-806	T8	380.00	117.61	
3	806-3	T9	381.15	15.25	
807	806-807	T10	379.00	121.78	
808	807-808	T11	379.50	79.68	
4	808-4	T12	379.01	24.79	48.89
5	808-5	T13	376.29	363.92	
6	43621	T14	365.85	338.61	
809	807-809	T15	375.50	288.42	
810	809-810	T16	375.50	13.32	
7	810-7	T17	375.76	4.38	
8	810-8	T18	375.82	5.24	
9	809-9	T19	378.60	322.20	
10	43747	T20	376.02	201.86	54.09
901	803-901	T21	380.00	86.10	
11	901-11	T22	380.32	9.85	46.58
12	901-12	T23	378.78	13.71	
811	901-811	T24	380.00	415.34	
812	811-812	T25	374.00	310.65	
13	812-13	T26	374.14	5.98	
813	812-813	T27	377.00	58.28	
14	813-14	T28	376.55	10.48	
15	813-15	T29	379.78	123.41	
814	811-814	T30	380.00	160.13	

---

815	814-815	T31	370.00	199.91	
816	815-816	T32	360.00	82.78	
16	816-16	T33	360.53	7.43	
817	816-817	T34	360.00	256.20	
17	817-17	T35	359.94	8.80	47.59
818	815-818	T36	370.00	9.05	
18	818-18	T37	369.50	7.23	46.33
819	818-819	T38	368.00	204.48	
19	819-19	T39	367.76	5.41	55.43
820	819-820	T40	370.00	288.24	
821	820-821	T41	361.00	311.09	
822	821-822	T42	361.00	9.53	
20	822-20	T43	360.66	6.03	50.02
21	822-21	T44	362.03	316.41	45.42
823	821-823	T45	365.00	285.73	
22	823-22	T46	364.09	8.10	
23	823-23	T47	364.21	3.51	50.78
24	823-24	T48	361.98	370.73	
824	814-824	T49	380.00	16.50	
25	824-25	T50	378.86	5.72	
825	824-825	T51	378.00	311.04	
26	825-26	T52	378.08	26.81	
826	825-826	T53	375.00	132.03	
27	826-27	T54	374.71	12.64	
827	826-827	T55	371.00	106.81	
28	827-28	T56	370.46	3.38	
828	827-828	T57	371.00	152.94	
829	828-829	T58	365.00	300.00	
29	829-29	T59	361.38	433.10	59.98
30	29-30	T60	361.72	7.14	
830	828-830	T61	371.00	26.07	
31	830-31	T62	371.00	6.46	
831	830-831	T63	368.00	284.05	
32	831-32	T64	365.21	314.20	55.59
33	825-33	T65	376.68	240.98	
832	33-832	T66	375.00	449.34	
833	832-833	T67	375.00	6.50	
34	833-34	T68	374.68	3.28	45.30
834	833-834	T69	372.00	284.56	
835	834-835	T70	370.00	181.85	
836	835-836	T71	365.00	207.24	
35	836-35	T72	365.52	6.37	
837	835-837	T73	370.00	273.35	
838	837-838	T74	370.00	14.85	
36	838-36	T75	370.04	7.45	
37	838-37	T76	369.72	9.22	45.03

---

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

839	837-839	T77	370.00	172.83	
38	839-38	T78	368.77	4.89	
840	839-840	T79	369.00	202.85	
841	840-841	T80	362.00	66.56	
39	841-39	T81	361.32	10.51	
40	841-40	T82	351.93	144.63	
842	840-842	T83	350.00	367.09	
41	842-41	T84	349.55	33.36	69.09
843	842-843	T85	360.00	361.15	
844	843-844	T86	362.00	310.89	
42	844-42	T87	354.80	113.23	
43	844-43	T88	362.64	7.87	
845	844-845	T89	362.00	202.96	
846	845-846	T90	361.00	180.48	
44	846-44	T91	361.82	6.70	52.64
847	846-847	T92	351.00	209.34	
848	847-848	T93	350.00	291.32	
45	848-45	T94	346.57	9.28	
849	848-849	T95	352.00	260.64	
850	849-850	T96	346.00	185.09	
851	850-851	T97	356.00	239.55	
46	851-46	T98	357.28	257.55	
852	850-852	T99	345.00	18.73	
47	852-47	T100	345.16	6.25	
853	852-853	T101	344.00	71.01	
48	853-48	T102	343.79	1.40	48.57
854	853-854	T103	344.00	114.55	
855	854-855	T104	345.00	150.07	
856	855-856	T105	344.00	157.00	
49	856-49	T106	342.52	2.00	
50	856-50	T107	342.56	2.00	
857	845-857	T108	362.00	11.31	
51	857-51	T109	361.68	5.03	51.40
858	857-858	T110	366.00	286.65	
52	858-52	T111	365.12	6.51	
53	52-53	T112	364.77	7.30	49.41
859	858-859	T113	363.00	385.76	
54	859-54	T114	362.44	3.07	47.54
860	859-860	T115	363.00	15.17	
55	860-55	T116	363.27	4.26	56.08
861	860-861	T117	371.00	210.34	
56	861-56	T118	371.63	1.80	
862	861-862	T119	374.00	68.83	
863	862-863	T120	374.00	13.88	
57	863-57	T121	373.21	4.46	
58	863-58	T122	373.41	10.87	46.54

---

864	862-864	T123	368.00	162.68	
59	864-59	T124	366.25	21.19	
865	864-865	T125	365.00	300.00	
60	865-60	T126	383.02	525.99	
866	860-866	T127	363.00	473.81	
61	866-61	T128	362.67	23.88	47.33
867	866-867	T129	366.00	110.42	
62	867-62	T130	365.27	3.71	
868	867-868	T131	365.00	146.05	
63	868-63	T132	363.47	23.16	
869	868-869	T133	363.00	124.59	
64	869-64	T134	360.76	2.00	68.94
870	869-870	T135	358.00	93.96	
65	870-65	T136	357.86	4.47	56.46
871	870-871	T137	357.00	12.54	
872	871-872	T138	357.00	4.45	
66	872-66	T139	356.91	4.68	46.41
67	872-67	T140	357.30	177.73	47.46
873	871-873	T141	353.00	186.23	
68	873-68	T142	352.44	17.42	
874	873-874	T143	352.00	174.43	
69	874-69	T144	350.66	3.75	
875	874-875	T145	350.00	198.31	
876	875-876	T146	348.00	252.08	
70	876-70	T147	348.40	36.03	
877	876-877	T148	348.00	202.17	
878	877-878	T149	349.00	372.52	
71	878-71	T150	348.71	25.23	
72	878-72	T151	348.82	10.82	
879	878-879	T152	351.00	352.52	
73	879-73	T153	350.84	3.43	45.12
74	879-74	T154	350.95	10.72	
75	877-75	T155	348.13	12.79	
76	877-76	T156	347.76	18.19	
880	877-880	T157	348.00	280.57	
77	880-77	T158	346.76	27.12	47.52
881	880-881	T159	352.00	315.37	
78	881-78	T160	351.86	11.18	
882	881-882	T161	366.00	235.00	
79	882-79	T162	365.61	28.43	53.79
80	882-80	T163	366.17	103.24	54.63
81	880-81	T164	346.56	294.91	
82	81-82	T165	347.26	30.21	
883	81-883	T166	347.00	338.83	

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

884	883-884	T167	346.00	349.49	
83	884-83	T168	345.77	3.74	
885	884-885	T169	346.50	129.37	
84	885-84	T170	345.81	19.45	
85	885-85	T171	345.84	8.83	53.05
886	885-886	T172	346.00	23.65	
86	886-86	T173	345.05	7.77	54.06
87	886-87	T174	345.25	412.18	
887	885-887	T175	351.00	371.90	
888	887-888	T176	354.40	354.78	
88	888-88	T177	354.16	9.97	47.31
89	888-89	T178	354.25	8.22	
889	888-889	T179	350.00	136.47	
890	889-890	T180	351.00	110.16	
90	890-90	T181	350.74	3.28	58.06
891	890-891	T182	351.00	15.36	
91	891-91	T183	357.02	215.96	
892	889-892	T184	348.00	62.35	
92	892-92	T185	347.11	4.07	
893	892-893	T186	344.00	245.49	
93	893-93	T187	342.55	45.64	47.58
894	893-894	T188	351.00	450.00	
895	894-895	T189	345.00	545.23	
94	895-94	T190	343.92	12.39	55.18
896	895-896	T191	336.00	117.59	
95	896-95	T192	335.82	31.28	
96	896-96	T193	335.66	5.77	53.10
897	896-897	T194	337.00	6.92	
97	897-97	T195	335.79	10.35	45.49
898	897-898	T196	334.00	230.26	
899	898-899	T197	333.00	173.54	
98	899-98	T198	332.78	4.71	
900	899-900	T199	333.00	208.52	
99	900-99	T200	334.78	273.67	

<b>Turno 2</b>					
<b>ID Nudo</b>	<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Cota</b>	<b>Longitud</b>	<b>Pm in</b>
<b>[1]</b>	<b>[2]</b>	<b>[3]</b>	<b>[m]</b>	<b>[m]</b>	<b>[mca]</b>
<b>[1]</b>	<b>[2]</b>	<b>[3]</b>	<b>[4]</b>	<b>[5]</b>	<b>[6]</b>
			436.00		
801	0-801	T1	370.00	50.00	
802	801-802	T2	370.00	70.00	
803	802-803	T3	380.00	258.05	
804	803-804	T4	381.00	193.89	
1	804-1	T5	380.06	8.31	
805	804-805	T6	381.00	56.10	

---

2	805-2	T7	364.47	288.24	48.19
806	805-806	T8	380.00	117.61	
3	806-3	T9	381.15	15.25	
807	806-807	T10	379.00	121.78	
808	807-808	T11	379.50	79.68	
4	808-4	T12	379.01	24.79	
5	808-5	T13	376.29	363.92	50.32
6	43621	T14	365.85	338.61	61.71
809	807-809	T15	375.50	288.42	
810	809-810	T16	375.50	13.32	
7	810-7	T17	375.76	4.38	51.34
8	810-8	T18	375.82	5.24	
9	809-9	T19	378.60	322.20	45.82
10	43747	T20	376.02	201.86	
901	803-901	T21	380.00	86.10	
11	901-11	T22	380.32	9.85	
12	901-12	T23	378.78	13.71	48.76
811	901-811	T24	380.00	415.34	
812	811-812	T25	374.00	310.65	
13	812-13	T26	374.14	5.98	
813	812-813	T27	377.00	58.28	
14	813-14	T28	376.55	10.48	
15	813-15	T29	379.78	123.41	53.62
814	811-814	T30	380.00	160.13	
815	814-815	T31	370.00	199.91	
816	815-816	T32	360.00	82.78	
16	816-16	T33	360.53	7.43	51.36
817	816-817	T34	360.00	256.20	
17	817-17	T35	359.94	8.80	
818	815-818	T36	370.00	9.05	
18	818-18	T37	369.50	7.23	
819	818-819	T38	368.00	204.48	
19	819-19	T39	367.76	5.41	
820	819-820	T40	370.00	288.24	
821	820-821	T41	361.00	311.09	
822	821-822	T42	361.00	9.53	
20	822-20	T43	360.66	6.03	
21	822-21	T44	362.03	316.41	
823	821-823	T45	365.00	285.73	
22	823-22	T46	364.09	8.10	46.41
23	823-23	T47	364.21	3.51	
24	823-24	T48	361.98	370.73	48.90
824	814-824	T49	380.00	16.50	
25	824-25	T50	378.86	5.72	45.39
825	824-825	T51	378.00	311.04	

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

26	825-26	T52	378.08	26.81	
826	825-826	T53	375.00	132.03	
27	826-27	T54	374.71	12.64	49.51
827	826-827	T55	371.00	106.81	
28	827-28	T56	370.46	3.38	49.13
828	827-828	T57	371.00	152.94	
829	828-829	T58	365.00	300.00	
29	829-29	T59	361.38	433.10	
30	29-30	T60	361.72	7.14	51.89
830	828-830	T61	371.00	26.07	
31	830-31	T62	371.00	6.46	45.56
831	830-831	T63	368.00	284.05	
32	831-32	T64	365.21	314.20	
33	825-33	T65	376.68	240.98	
832	33-832	T66	375.00	449.34	
833	832-833	T67	375.00	6.50	
34	833-34	T68	374.68	3.28	
834	833-834	T69	372.00	284.56	
835	834-835	T70	370.00	181.85	
836	835-836	T71	365.00	207.24	
35	836-35	T72	365.52	6.37	56.44
837	835-837	T73	370.00	273.35	
838	837-838	T74	370.00	14.85	
36	838-36	T75	370.04	7.45	
37	838-37	T76	369.72	9.22	
839	837-839	T77	370.00	172.83	
38	839-38	T78	368.77	4.89	46.00
840	839-840	T79	369.00	202.85	
841	840-841	T80	362.00	66.56	
39	841-39	T81	361.32	10.51	54.88
40	841-40	T82	351.93	144.63	
842	840-842	T83	350.00	367.09	
41	842-41	T84	349.55	33.36	
843	842-843	T85	360.00	361.15	
844	843-844	T86	362.00	310.89	
42	844-42	T87	354.80	113.23	50.75
43	844-43	T88	362.64	7.87	50.96
845	844-845	T89	362.00	202.96	
846	845-846	T90	361.00	180.48	
44	846-44	T91	361.82	6.70	
847	846-847	T92	351.00	209.34	
848	847-848	T93	350.00	291.32	
45	848-45	T94	346.57	9.28	
849	848-849	T95	352.00	260.64	
850	849-850	T96	346.00	185.09	



---

851	850-851	T97	356.00	239.55	
46	851-46	T98	357.28	257.55	54.14
852	850-852	T99	345.00	18.73	
47	852-47	T100	345.16	6.25	
853	852-853	T101	344.00	71.01	
48	853-48	T102	343.79	1.40	
854	853-854	T103	344.00	114.55	
855	854-855	T104	345.00	150.07	
856	855-856	T105	344.00	157.00	
49	856-49	T106	342.52	2.00	
50	856-50	T107	342.56	2.00	49.67
857	845-857	T108	362.00	11.31	
51	857-51	T109	361.68	5.03	
858	857-858	T110	366.00	286.65	
52	858-52	T111	365.12	6.51	
53	52-53	T112	364.77	7.30	
859	858-859	T113	363.00	385.76	
54	859-54	T114	362.44	3.07	
860	859-860	T115	363.00	15.17	
55	860-55	T116	363.27	4.26	
861	860-861	T117	371.00	210.34	
56	861-56	T118	371.63	1.80	57.60
862	861-862	T119	374.00	68.83	
863	862-863	T120	374.00	13.88	
57	863-57	T121	373.21	4.46	
58	863-58	T122	373.41	10.87	
864	862-864	T123	368.00	162.68	
59	864-59	T124	366.25	21.19	46.51
865	864-865	T125	365.00	300.00	
60	865-60	T126	383.02	525.99	
866	860-866	T127	363.00	473.81	
61	866-61	T128	362.67	23.88	
867	866-867	T129	366.00	110.42	
62	867-62	T130	365.27	3.71	
868	867-868	T131	365.00	146.05	
63	868-63	T132	363.47	23.16	45.48
869	868-869	T133	363.00	124.59	
64	869-64	T134	360.76	2.00	
870	869-870	T135	358.00	93.96	
65	870-65	T136	357.86	4.47	
871	870-871	T137	357.00	12.54	
872	871-872	T138	357.00	4.45	
66	872-66	T139	356.91	4.68	
67	872-67	T140	357.30	177.73	
873	871-873	T141	353.00	186.23	
68	873-68	T142	352.44	17.42	
874	873-874	T143	352.00	174.43	
69	874-69	T144	350.66	3.75	

---

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

---

875	874-875	T145	350.00	198.31	
876	875-876	T146	348.00	252.08	
70	876-70	T147	348.40	36.03	48.41
877	876-877	T148	348.00	202.17	
878	877-878	T149	349.00	372.52	
71	878-71	T150	348.71	25.23	
72	878-72	T151	348.82	10.82	
879	878-879	T152	351.00	352.52	
73	879-73	T153	350.84	3.43	
74	879-74	T154	350.95	10.72	72.42
75	877-75	T155	348.13	12.79	
76	877-76	T156	347.76	18.19	
880	877-880	T157	348.00	280.57	
77	880-77	T158	346.76	27.12	
881	880-881	T159	352.00	315.37	
78	881-78	T160	351.86	11.18	
882	881-882	T161	366.00	235.00	
79	882-79	T162	365.61	28.43	
80	882-80	T163	366.17	103.24	
81	880-81	T164	346.56	294.91	
82	81-82	T165	347.26	30.21	53.90
883	81-883	T166	347.00	338.83	
884	883-884	T167	346.00	349.49	
83	884-83	T168	345.77	3.74	52.85
885	884-885	T169	346.50	129.37	
84	885-84	T170	345.81	19.45	
85	885-85	T171	345.84	8.83	
886	885-886	T172	346.00	23.65	
86	886-86	T173	345.05	7.77	
87	886-87	T174	345.25	412.18	45.54
887	885-887	T175	351.00	371.90	
888	887-888	T176	354.40	354.78	
88	888-88	T177	354.16	9.97	
89	888-89	T178	354.25	8.22	53.48
889	888-889	T179	350.00	136.47	
890	889-890	T180	351.00	110.16	
90	890-90	T181	350.74	3.28	
891	890-891	T182	351.00	15.36	
91	891-91	T183	357.02	215.96	62.68
892	889-892	T184	348.00	62.35	
92	892-92	T185	347.11	4.07	49.21
893	892-893	T186	344.00	245.49	
93	893-93	T187	342.55	45.64	
894	893-894	T188	351.00	450.00	
895	894-895	T189	345.00	545.23	
94	895-94	T190	343.92	12.39	
896	895-896	T191	336.00	117.59	

---

95	896-95	T192	335.82	31.28	50.96
96	896-96	T193	335.66	5.77	
897	896-897	T194	337.00	6.92	
97	897-97	T195	335.79	10.35	
898	897-898	T196	334.00	230.26	
899	898-899	T197	333.00	173.54	
98	899-98	T198	332.78	4.71	54.98
900	899-900	T199	333.00	208.52	
99	900-99	T200	334.78	273.67	59.87

<b>Turno 3</b>					
<b>ID Nudo</b>	<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Cota</b>	<b>Longitud</b>	<b>Pmin</b>
<b>[1]</b>	<b>[2]</b>	<b>[3]</b>	<b>[m]</b>	<b>[m]</b>	<b>[mca]</b>
<b>[4]</b>	<b>[5]</b>	<b>[6]</b>			
			436.00		
801	0-801	T1	370.00	50.00	
802	801-802	T2	370.00	70.00	
803	802-803	T3	380.00	258.05	
804	803-804	T4	381.00	193.89	
1	804-1	T5	380.06	8.31	46.84
805	804-805	T6	381.00	56.10	
2	805-2	T7	364.47	288.24	
806	805-806	T8	380.00	117.61	
3	806-3	T9	381.15	15.25	48.15
807	806-807	T10	379.00	121.78	
808	807-808	T11	379.50	79.68	
4	808-4	T12	379.01	24.79	
5	808-5	T13	376.29	363.92	
6	43621	T14	365.85	338.61	
809	807-809	T15	375.50	288.42	
810	809-810	T16	375.50	13.32	
7	810-7	T17	375.76	4.38	
8	810-8	T18	375.82	5.24	53.65
9	809-9	T19	378.60	322.20	
10	43747	T20	376.02	201.86	
901	803-901	T21	380.00	86.10	
11	901-11	T22	380.32	9.85	
12	901-12	T23	378.78	13.71	
811	901-811	T24	380.00	415.34	
812	811-812	T25	374.00	310.65	
13	812-13	T26	374.14	5.98	51.08
813	812-813	T27	377.00	58.28	
14	813-14	T28	376.55	10.48	50.10
15	813-15	T29	379.78	123.41	
814	811-814	T30	380.00	160.13	
815	814-815	T31	370.00	199.91	

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

---

816	815-816	T32	360.00	82.78	
16	816-16	T33	360.53	7.43	
817	816-817	T34	360.00	256.20	
17	817-17	T35	359.94	8.80	
818	815-818	T36	370.00	9.05	
18	818-18	T37	369.50	7.23	
819	818-819	T38	368.00	204.48	
19	819-19	T39	367.76	5.41	
820	819-820	T40	370.00	288.24	
821	820-821	T41	361.00	311.09	
822	821-822	T42	361.00	9.53	
20	822-20	T43	360.66	6.03	
21	822-21	T44	362.03	316.41	
823	821-823	T45	365.00	285.73	
22	823-22	T46	364.09	8.10	
23	823-23	T47	364.21	3.51	
24	823-24	T48	361.98	370.73	
824	814-824	T49	380.00	16.50	
25	824-25	T50	378.86	5.72	
825	824-825	T51	378.00	311.04	
26	825-26	T52	378.08	26.81	45.46
826	825-826	T53	375.00	132.03	
27	826-27	T54	374.71	12.64	
827	826-827	T55	371.00	106.81	
28	827-28	T56	370.46	3.38	
828	827-828	T57	371.00	152.94	
829	828-829	T58	365.00	300.00	
29	829-29	T59	361.38	433.10	
30	29-30	T60	361.72	7.14	
830	828-830	T61	371.00	26.07	
31	830-31	T62	371.00	6.46	
831	830-831	T63	368.00	284.05	
32	831-32	T64	365.21	314.20	
33	825-33	T65	376.68	240.98	47.05
832	33-832	T66	375.00	449.34	
833	832-833	T67	375.00	6.50	
34	833-34	T68	374.68	3.28	
834	833-834	T69	372.00	284.56	
835	834-835	T70	370.00	181.85	
836	835-836	T71	365.00	207.24	
35	836-35	T72	365.52	6.37	
837	835-837	T73	370.00	273.35	
838	837-838	T74	370.00	14.85	
36	838-36	T75	370.04	7.45	48.77
37	838-37	T76	369.72	9.22	

---

839	837-839	T77	370.00	172.83	
38	839-38	T78	368.77	4.89	
840	839-840	T79	369.00	202.85	
841	840-841	T80	362.00	66.56	
39	841-39	T81	361.32	10.51	
40	841-40	T82	351.93	144.63	59.88
842	840-842	T83	350.00	367.09	
41	842-41	T84	349.55	33.36	
843	842-843	T85	360.00	361.15	
844	843-844	T86	362.00	310.89	
42	844-42	T87	354.80	113.23	
43	844-43	T88	362.64	7.87	
845	844-845	T89	362.00	202.96	
846	845-846	T90	361.00	180.48	
44	846-44	T91	361.82	6.70	
847	846-847	T92	351.00	209.34	
848	847-848	T93	350.00	291.32	
45	848-45	T94	346.57	9.28	53.89
849	848-849	T95	352.00	260.64	
850	849-850	T96	346.00	185.09	
851	850-851	T97	356.00	239.55	
46	851-46	T98	357.28	257.55	
852	850-852	T99	345.00	18.73	
47	852-47	T100	345.16	6.25	48.56
853	852-853	T101	344.00	71.01	
48	853-48	T102	343.79	1.40	
854	853-854	T103	344.00	114.55	
855	854-855	T104	345.00	150.07	
856	855-856	T105	344.00	157.00	
49	856-49	T106	342.52	2.00	46.95
50	856-50	T107	342.56	2.00	
857	845-857	T108	362.00	11.31	
51	857-51	T109	361.68	5.03	
858	857-858	T110	366.00	286.65	
52	858-52	T111	365.12	6.51	51.30
53	52-53	T112	364.77	7.30	
859	858-859	T113	363.00	385.76	
54	859-54	T114	362.44	3.07	
860	859-860	T115	363.00	15.17	
55	860-55	T116	363.27	4.26	
861	860-861	T117	371.00	210.34	
56	861-56	T118	371.63	1.80	
862	861-862	T119	374.00	68.83	
863	862-863	T120	374.00	13.88	
57	863-57	T121	373.21	4.46	46.68
58	863-58	T122	373.41	10.87	

---

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

---

59	864-59	T124	366.25	21.19	
865	864-865	T125	365.00	300.00	
60	865-60	T126	383.02	525.99	44.37
866	860-866	T127	363.00	473.81	
61	866-61	T128	362.67	23.88	
867	866-867	T129	366.00	110.42	
62	867-62	T130	365.27	3.71	61.88
868	867-868	T131	365.00	146.05	
63	868-63	T132	363.47	23.16	
869	868-869	T133	363.00	124.59	
64	869-64	T134	360.76	2.00	
870	869-870	T135	358.00	93.96	
65	870-65	T136	357.86	4.47	
871	870-871	T137	357.00	12.54	
872	871-872	T138	357.00	4.45	
66	872-66	T139	356.91	4.68	
67	872-67	T140	357.30	177.73	
873	871-873	T141	353.00	186.23	
68	873-68	T142	352.44	17.42	51.89
874	873-874	T143	352.00	174.43	
69	874-69	T144	350.66	3.75	59.94
875	874-875	T145	350.00	198.31	
876	875-876	T146	348.00	252.08	
70	876-70	T147	348.40	36.03	
877	876-877	T148	348.00	202.17	
878	877-878	T149	349.00	372.52	
71	878-71	T150	348.71	25.23	58.27
72	878-72	T151	348.82	10.82	50.48
879	878-879	T152	351.00	352.52	
73	879-73	T153	350.84	3.43	
74	879-74	T154	350.95	10.72	
75	877-75	T155	348.13	12.79	47.48
76	877-76	T156	347.76	18.19	51.14
880	877-880	T157	348.00	280.57	
77	880-77	T158	346.76	27.12	
881	880-881	T159	352.00	315.37	
78	881-78	T160	351.86	11.18	57.04
882	881-882	T161	366.00	235.00	
79	882-79	T162	365.61	28.43	
80	882-80	T163	366.17	103.24	
81	880-81	T164	346.56	294.91	54.08
82	81-82	T165	347.26	30.21	
883	81-883	T166	347.00	338.83	
884	883-884	T167	346.00	349.49	
83	884-83	T168	345.77	3.74	

885	884-885	T169	346.50	129.37	
84	885-84	T170	345.81	19.45	53.63
85	885-85	T171	345.84	8.83	
886	885-886	T172	346.00	23.65	
86	886-86	T173	345.05	7.77	
87	886-87	T174	345.25	412.18	
887	885-887	T175	351.00	371.90	
888	887-888	T176	354.40	354.78	
88	888-88	T177	354.16	9.97	
89	888-89	T178	354.25	8.22	
889	888-889	T179	350.00	136.47	
890	889-890	T180	351.00	110.16	
90	890-90	T181	350.74	3.28	
891	890-891	T182	351.00	15.36	
91	891-91	T183	357.02	215.96	
892	889-892	T184	348.00	62.35	
92	892-92	T185	347.11	4.07	
893	892-893	T186	344.00	245.49	
93	893-93	T187	342.55	45.64	
894	893-894	T188	351.00	450.00	
895	894-895	T189	345.00	545.23	
94	895-94	T190	343.92	12.39	
896	895-896	T191	336.00	117.59	
95	896-95	T192	335.82	31.28	
96	896-96	T193	335.66	5.77	
897	896-897	T194	337.00	6.92	
97	897-97	T195	335.79	10.35	
898	897-898	T196	334.00	230.26	
899	898-899	T197	333.00	173.54	
98	899-98	T198	332.78	4.71	
900	899-900	T199	333.00	208.52	
99	900-99	T200	334.78	273.67	

Tabla F.6. Celdas para configurar la PNL

COSTO TOTAL \$ 4513577.35										
Turno 1										
Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
			436.00							
801	0-801	T1	370.00	1025.40	50.00	1000.00		37102.13	435.93	65.93
802	801-802	T2	370.00	1025.40	70.00	1000.00		51942.98	435.84	65.84
803	802-803	T3	380.00	1025.40	258.05	1000.00		191484.07	435.50	55.50
804	803-804	T4	381.00	62.50	193.89	301.44		13491.15	435.13	54.13
1	804-1	T5	380.06		8.31	59.35		23.39	435.13	55.07
805	804-805	T6	381.00	62.50	56.10	300.15		3870.26	435.02	54.02
2	805-2	T7	364.47		288.24	99.77		2261.57	435.02	70.55

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

806	805-806	T8	380.00	62.50	117.61	287.79		7468.26	434.73	54.73
3	806-3	T9	381.15		15.25	84.58		86.39	434.73	53.58
807	806-807	T10	379.00	62.50	121.78	287.88		7737.65	434.43	55.43
808	807-808	T11	379.50	31.50	79.68	218.93		2948.85	434.23	54.73
4	808-4	T12	379.01	31.50	24.79	88.70	48.89	154.19	428.90	49.89
5	808-5	T13	376.29		363.92	221.04		13727.53	434.23	57.94
6	5-6	T14	365.85		338.61	175.85		8131.99	434.23	68.38
809	807-809	T15	375.50	31.00	288.42	201.38		9052.40	433.34	57.84
810	809-810	T16	375.50		13.32	132.75		183.72	433.34	57.84
7	810-7	T17	375.76		4.38	131.82		59.57	433.34	57.58
8	810-8	T18	375.82		5.24	84.76		29.81	433.34	57.52
9	809-9	T19	378.60	31.00	322.20	196.87		9670.43	431.96	53.37
10	9-10	T20	376.02	31.00	201.86	196.90	54.09	6060.11	431.11	55.09
901	803-901	T21	380.00	962.90	86.10	1000.00		63889.86	435.40	55.40
11	901-11	T22	380.32	38.00	9.85	73.81	46.58	42.66	427.90	47.58
12	901-12	T23	378.78		13.71	102.38		113.24	435.40	56.62
811	901-811	T24	380.00	924.90	415.34	1000.00		308199.94	434.96	54.96
812	811-812	T25	374.00		310.65	244.85		14339.99	434.96	60.96
13	812-13	T26	374.14		5.98	212.98		209.58	434.96	60.82
813	812-813	T27	377.00		58.28	244.81		2689.46	434.96	57.96
14	813-14	T28	376.55		10.48	66.09		36.47	434.96	58.41
15	813-15	T29	379.78		123.41	244.86		5696.80	434.96	55.18
814	811-814	T30	380.00	924.90	160.13	1000.00		118823.27	434.79	54.79
815	814-815	T31	370.00	132.00	199.91	241.13		8953.28	430.24	60.24
816	815-816	T32	360.00	23.40	82.78	101.75		675.18	425.02	65.02
16	816-16	T33	360.53		7.43	53.33		16.93	425.02	64.49
817	816-817	T34	360.00	23.40	256.20	102.01		2100.54	409.08	49.08
17	817-17	T35	359.94	23.40	8.80	101.90	47.59	72.03	408.53	48.59
818	815-818	T36	370.00	108.60	9.05	224.73		352.49	430.03	60.03
18	818-18	T37	369.50	18.00	7.23	255.91	46.33	364.05	430.03	60.53
819	818-819	T38	368.00	90.60	204.48	215.32		7323.70	426.00	58.00
19	819-19	T39	367.76	26.70	5.41	76.20	55.43	24.96	424.19	56.43
820	819-820	T40	370.00	63.90	288.24	199.41		8872.46	421.67	51.67
821	820-821	T41	361.00	63.90	311.09	199.39		9574.39	416.98	55.98
822	821-822	T42	361.00	45.90	9.53	146.46		159.50	416.63	55.63
20	822-20	T43	360.66	22.50	6.03	244.01	50.02	276.53	416.63	55.97
21	822-21	T44	362.03	23.40	316.41	122.11	45.42	3699.71	408.45	46.42
823	821-823	T45	365.00	18.00	285.73	167.67		6246.70	416.00	51.00
22	823-22	T46	364.09		8.10	71.82		33.23	416.00	51.91
23	823-23	T47	364.21	18.00	3.51	176.82	50.78	85.23	415.99	51.78
24	823-24	T48	361.98		370.73	131.51		5017.64	416.00	54.02
824	814-824	T49	380.00	792.90	16.50	962.10		11346.01	434.77	54.77
25	824-25	T50	378.86		5.72	265.22		309.36	434.77	55.91
825	824-825	T51	378.00	792.90	311.04	962.25		213925.49	434.47	56.47
26	825-26	T52	378.08		26.81	63.71		86.80	434.47	56.39
826	825-826	T53	375.00	60.90	132.03	210.62		4527.32	433.08	58.08
27	826-27	T54	374.71		12.64	59.43		35.66	433.08	58.36
827	826-827	T55	371.00	60.90	106.81	210.42		3655.85	431.95	60.95
28	827-28	T56	370.46		3.38	401.88		414.36	431.95	61.48
828	827-828	T57	371.00	60.90	152.94	210.37		5232.40	430.32	59.32
829	828-829	T58	365.00	31.60	300.00	163.43		6235.59	427.06	62.06
29	829-29	T59	361.38	31.60	433.10	163.43	59.98	9001.42	422.36	60.98
30	29-30	T60	361.72		7.14	260.37		372.19	422.36	60.64
830	828-830	T61	371.00	29.30	26.07	151.55		466.90	429.97	58.97
31	830-31	T62	371.00		6.46	210.33		220.95	429.97	58.97
831	830-831	T63	368.00	29.30	284.05	151.55		5086.48	426.09	58.09
32	831-32	T64	365.21	29.30	314.20	151.54	55.59	5625.93	421.80	56.59



33	825-33	T65	376.68	732.00	240.98	898.24		144682.59	434.25	57.57
832	33-832	T66	375.00	732.00	449.34	892.70		266506.93	433.84	58.84
833	832-833	T67	375.00	732.00	6.50	897.65		3897.49	433.83	58.83
34	833-34	T68	374.68	23.40	3.28	552.20	45.30	754.22	433.83	59.16
834	833-834	T69	372.00	708.60	284.56	890.92		168111.59	433.58	61.58
835	834-835	T70	370.00	708.60	181.85	890.73		107386.78	433.43	63.43
836	835-836	T71	365.00		207.24	110.53		1990.54	433.43	68.43
35	836-35	T72	365.52		6.37	110.52		61.14	433.43	67.91
837	835-837	T73	370.00	708.60	273.35	890.22		161238.37	433.18	63.18
838	837-838	T74	370.00	18.00	14.85	85.47		85.87	431.83	61.83
36	838-36	T75	370.04		7.45	85.55		43.14	431.83	61.79
37	838-37	T76	369.72	18.00	9.22	169.10	45.03	205.04	431.80	62.08
839	837-839	T77	370.00	690.60	172.83	884.06		100557.00	433.03	63.03
38	839-38	T78	368.77		4.89	40.64		6.52	433.03	64.26
840	839-840	T79	369.00	690.60	202.85	883.70		117930.18	432.86	63.86
841	840-841	T80	362.00		66.56	127.61		848.84	432.86	70.86
39	841-39	T81	361.32		10.51	124.68		127.98	432.86	71.54
40	841-40	T82	351.93		144.63	127.66		1846.11	432.86	80.93
842	840-842	T83	350.00	690.60	367.09	883.08		213116.33	432.54	82.54
41	842-41	T84	349.55	50.00	33.36	93.89	69.09	232.21	419.64	70.09
843	842-843	T85	360.00	640.60	361.15	866.50		201971.68	432.24	72.24
844	843-844	T86	362.00	640.60	310.89	866.41		173824.86	431.98	69.98
42	844-42	T87	354.80		113.23	70.66		449.71	431.98	77.18
43	844-43	T88	362.64		7.87	230.90		323.54	431.98	69.34
845	844-845	T89	362.00	640.60	202.96	865.27		113186.05	431.81	69.81
846	845-846	T90	361.00	43.20	180.48	176.38		4360.59	429.41	68.41
44	846-44	T91	361.82	25.20	6.70	51.62	52.64	14.31	415.46	53.64
847	846-847	T92	351.00	18.00	209.34	176.34		5055.32	428.84	77.84
848	847-848	T93	350.00	18.00	291.32	177.19		7101.93	428.07	78.07
45	848-45	T94	346.57		9.28	167.01		201.35	428.07	81.50
849	848-849	T95	352.00	18.00	260.64	167.11		5660.76	427.16	75.16
850	849-850	T96	346.00	18.00	185.09	167.08		4018.60	426.51	80.51
851	850-851	T97	356.00		239.55	137.65		3548.09	426.51	70.51
46	851-46	T98	357.28		257.55	136.94		3775.78	426.51	69.23
852	850-852	T99	345.00	18.00	18.73	130.86		251.07	426.30	81.30
47	852-47	T100	345.16		6.25	310.49		461.34	426.30	81.14
853	852-853	T101	344.00	18.00	71.01	107.98		651.35	424.23	80.23
48	853-48	T102	343.79	18.00	1.40	68.73	48.57	5.28	423.86	80.07
854	853-854	T103	344.00		114.55	108.00		1051.16	424.23	80.23
855	854-855	T104	345.00		150.07	108.07		1378.86	424.23	79.23
856	855-856	T105	344.00		157.00	109.09		1469.43	424.23	80.23
49	856-49	T106	342.52		2.00	364.91		202.91	424.23	81.71
50	856-50	T107	342.56		2.00	67.68		7.30	424.23	81.67
857	845-857	T108	362.00	597.40	11.31	848.23		6063.39	431.80	69.80
51	857-51	T109	361.68	33.00	5.03	394.08	51.40	593.99	431.80	70.12
858	857-858	T110	366.00	564.40	286.65	836.66		149594.49	431.57	65.57
52	858-52	T111	365.12	55.80	6.51	87.45		39.40	427.16	62.04
53	52-53	T112	364.77	55.80	7.30	73.27	49.41	31.13	415.18	50.41
859	858-859	T113	363.00	508.60	385.76	814.86		191091.23	431.29	68.29
54	859-54	T114	362.44	28.80	3.07	574.13	47.54	762.32	431.29	68.85
860	859-860	T115	363.00	479.80	15.17	802.54		7291.60	431.28	68.28
55	860-55	T116	363.27	18.00	4.26	459.79	56.08	682.16	431.28	68.01
861	860-861	T117	371.00	18.00	210.34	229.69		8558.79	431.12	60.12
56	861-56	T118	371.63		1.80	287.97		114.35	431.12	59.49
862	861-862	T119	374.00	18.00	68.83	227.27		2742.77	431.07	57.07

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

863	862-863	T120	374.00	18.00	13.88	67.45		50.29	427.02	53.02
57	863-57	T121	373.21		4.46	102.15		36.67	427.02	53.81
58	863-58	T122	373.41	18.00	10.87	59.16	46.54	30.40	420.95	47.54
864	862-864	T123	368.00		162.68	175.95		3911.32	431.07	63.07
59	864-59	T124	366.25		21.19	55.69		52.61	431.07	64.82
865	864-865	T125	365.00		300.00	175.93		7211.95	431.07	66.07
60	865-60	T126	383.02		525.99	175.97		12649.08	431.07	48.05
866	860-866	T127	363.00	443.80	473.81	784.11		217547.90	430.96	67.96
61	866-61	T128	362.67	28.80	23.88	65.20	47.33	80.94	411.00	48.33
867	866-867	T129	366.00	415.00	110.42	769.86		48896.45	430.88	64.88
62	867-62	T130	365.27		3.71	83.03		20.27	430.88	65.62
868	867-868	T131	365.00	415.00	146.05	770.22		64734.98	430.78	65.78
63	868-63	T132	363.47		23.16	71.80		94.94	430.78	67.32
869	868-869	T133	363.00	415.00	124.59	768.64		54999.54	430.70	67.70
64	869-64	T134	360.76	31.50	2.00	377.76	68.94	217.26	430.70	69.94
870	869-870	T135	358.00	383.50	93.96	526.34		19643.97	430.36	72.36
65	870-65	T136	357.86	35.80	4.47	53.64	56.46	10.31	415.32	57.46
871	870-871	T137	357.00	347.70	12.54	524.61		2604.42	430.32	73.32
872	871-872	T138	357.00	41.40	4.45	109.27		41.82	429.75	72.75
66	872-66	T139	356.91	18.00	4.68	425.03	46.41	641.08	429.75	72.84
67	872-67	T140	357.30	23.40	177.73	87.11	47.46	1066.89	405.76	48.46
873	871-873	T141	353.00	306.30	186.23	522.41		38362.44	429.85	76.85
68	873-68	T142	352.44		17.42	60.80		51.42	429.85	77.41
874	873-874	T143	352.00	306.30	174.43	522.44		35935.05	429.41	77.41
69	874-69	T144	350.66		3.75	505.91		725.40	429.41	78.75
875	874-875	T145	350.00	306.30	198.31	522.39		40847.27	428.92	78.92
876	875-876	T146	348.00	306.30	252.08	522.39		51922.78	428.28	80.28
70	876-70	T147	348.40		36.03	69.28		137.61	428.28	79.88
877	876-877	T148	348.00	306.30	202.17	509.77		39680.02	427.71	79.71
878	877-878	T149	349.00	18.00	372.52	266.83		20374.96	427.58	78.58
71	878-71	T150	348.71		25.23	96.34		184.73	427.58	78.87
72	878-72	T151	348.82		10.82	119.92		122.11	427.58	78.76
879	878-879	T152	351.00	18.00	352.52	266.76		19270.64	427.45	76.45
73	879-73	T153	350.84	18.00	3.43	537.23	45.12	746.60	427.45	76.61
74	879-74	T154	350.95		10.72	266.53		584.89	427.45	76.50
75	877-75	T155	348.13		12.79	77.57		61.08	427.71	79.58
76	877-76	T156	347.76		18.19	56.76		46.88	427.71	79.95
880	877-880	T157	348.00	288.30	280.57	464.98		45926.40	426.60	78.60
77	880-77	T158	346.76	18.00	27.12	51.11	47.52	56.85	395.28	48.52
881	880-881	T159	352.00	76.30	315.37	242.00		14224.95	424.04	72.04
78	881-78	T160	351.86		11.18	111.00		108.26	424.04	72.18
882	881-882	T161	366.00	76.30	235.00	241.47		10554.29	422.11	56.11
79	882-79	T162	365.61	53.70	28.43	140.61	53.79	439.19	420.40	54.79
80	882-80	T163	366.17	22.60	103.24	187.51	54.63	2814.60	421.80	55.63
81	880-81	T164	346.56	194.00	294.91	454.12		46074.25	425.97	79.41
82	81-82	T165	347.26		30.21	69.58		116.39	425.97	78.71
883	81-883	T166	347.00	194.00	338.83	437.51		49183.03	425.11	78.11
884	883-884	T167	346.00	194.00	349.49	437.51		50729.38	424.21	78.21
83	884-83	T168	345.77		3.74	506.62		725.95	424.21	78.44
885	884-885	T169	346.50	194.00	129.37	419.84		17311.29	423.81	77.31
84	885-84	T170	345.81		19.45	51.61		41.56	423.81	78.00
85	885-85	T171	345.84	18.10	8.83	183.40	53.05	230.49	423.79	77.95
886	885-886	T172	346.00	27.60	23.65	89.50		149.77	420.01	74.01
86	886-86	T173	345.05	27.60	7.77	228.04	54.06	311.79	419.99	74.94
87	886-87	T174	345.25		412.18	89.52		2611.23	420.01	74.75

887	885-887	T175	351.00	148.30	371.90	407.57		46933.23	422.99	71.99
888	887-888	T176	354.40	148.30	354.78	407.20		44694.14	422.21	67.81
88	888-88	T177	354.16	18.00	9.97	144.51	47.31	162.55	422.14	67.99
89	888-89	T178	354.25		8.22	93.79		57.05	422.21	67.96
889	888-889	T179	350.00	130.30	136.47	377.36		14794.26	421.87	71.87
890	889-890	T180	351.00	18.00	110.16	250.20		5306.64	421.82	70.82
90	890-90	T181	350.74	18.00	3.28	450.12	58.06	503.35	421.82	71.08
891	890-891	T182	351.00		15.36	249.66		736.84	421.82	70.82
91	891-91	T183	357.02		215.96	249.77		10368.28	421.82	64.80
892	889-892	T184	348.00	112.30	62.35	242.02		2812.76	420.84	72.84
92	892-92	T185	347.11		4.07	476.19		699.09	420.84	73.73
893	892-893	T186	344.00	112.30	245.49	234.73		10426.22	416.12	72.12
93	893-93	T187	342.55	18.00	45.64	59.39	47.58	128.63	391.12	48.58
894	893-894	T188	351.00	94.30	450.00	228.80		18170.41	409.02	58.02
895	894-895	T189	345.00	94.30	545.23	228.37		21933.45	400.33	55.33
94	895-94	T190	343.92	51.70	12.39	175.62	55.18	296.69	400.10	56.18
896	895-896	T191	336.00	42.60	117.59	206.78		3888.37	399.63	63.63
95	896-95	T192	335.82		31.28	68.91		118.23	399.63	63.81
96	896-96	T193	335.66	24.60	5.77	341.46	53.10	513.40	399.63	63.97
897	896-897	T194	337.00	18.00	6.92	182.82		179.43	399.61	62.61
97	897-97	T195	335.79	18.00	10.35	132.92	45.49	143.01	399.50	63.71
898	897-898	T196	334.00		230.26	182.85		5973.21	399.61	65.61
899	898-899	T197	333.00		173.54	182.60		4489.42	399.61	66.61
98	899-98	T198	332.78		4.71	213.81		166.22	399.61	66.83
900	899-900	T199	333.00		208.52	152.89		3799.38	399.61	66.61
99	900-99	T200	334.78		273.67	152.97		4991.71	399.61	64.83

## Turno 2

Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
			436.00							
801	0-801	T1	370.00	1033.50	50.00				435.93	65.93
802	801-802	T2	370.00	1033.50	70.00				435.84	65.84
803	802-803	T3	380.00	1033.50	258.05				435.50	55.50
804	803-804	T4	381.00	129.00	193.89				434.07	53.07
1	804-1	T5	380.06		8.31				434.07	54.01
805	804-805	T6	381.00	129.00	56.10				433.65	52.65
2	805-2	T7	364.47	23.40	288.24		48.19		413.66	49.19
806	805-806	T8	380.00	105.60	117.61				432.91	52.91
3	806-3	T9	381.15		15.25				432.91	51.76
807	806-807	T10	379.00	105.60	121.78				432.13	53.13
808	807-808	T11	379.50	48.00	79.68				431.68	52.18
4	808-4	T12	379.01		24.79				431.68	52.67
5	808-5	T13	376.29	48.00	363.92		50.32		429.72	53.43
6	5-6	T14	365.85	20.40	338.61		61.71		428.56	62.71
809	807-809	T15	375.50	57.60	288.42				428.72	53.22
810	809-810	T16	375.50	34.20	13.32				428.26	52.76
7	810-7	T17	375.76	34.20	4.38		51.34		428.10	52.34
8	810-8	T18	375.82		5.24				428.26	52.44
9	809-9	T19	378.60	23.40	322.20		45.82		427.90	49.30
10	9-10	T20	376.02		201.86				427.90	51.88
901	803-901	T21	380.00	904.50	86.10				435.41	55.41
11	901-11	T22	380.32		9.85				435.41	55.09
12	901-12	T23	378.78	72.00	13.71		48.76		428.54	49.76

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

811	901-811	T24	380.00	832.50	415.34		435.05	55.05
812	811-812	T25	374.00	29.00	310.65		434.64	60.64
13	812-13	T26	374.14		5.98		434.64	60.50
813	812-813	T27	377.00	29.00	58.28		434.56	57.56
14	813-14	T28	376.55		10.48		434.56	58.01
15	813-15	T29	379.78	29.00	123.41	53.62	434.40	54.62
814	811-814	T30	380.00	803.50	160.13		434.91	54.91
815	814-815	T31	370.00	78.20	199.91		433.19	63.19
816	815-816	T32	360.00	26.00	82.78		426.85	66.85
16	816-16	T33	360.53	26.00	7.43	51.36	412.89	52.36
817	816-817	T34	360.00		256.20		426.85	66.85
17	817-17	T35	359.94		8.80		426.85	66.90
818	815-818	T36	370.00	52.20	9.05		433.13	63.13
18	818-18	T37	369.50		7.23		433.13	63.63
819	818-819	T38	368.00	52.20	204.48		431.67	63.67
19	819-19	T39	367.76		5.41		431.67	63.91
820	819-820	T40	370.00	52.20	288.24		428.68	58.68
821	820-821	T41	361.00	52.20	311.09		425.46	64.46
822	821-822	T42	361.00		9.53		425.46	64.46
20	822-20	T43	360.66		6.03		425.46	64.80
21	822-21	T44	362.03		316.41		425.46	63.43
823	821-823	T45	365.00	52.20	285.73		418.56	53.56
22	823-22	T46	364.09	28.80	8.10	46.41	414.38	50.29
23	823-23	T47	364.21		3.51		418.56	54.35
24	823-24	T48	361.98	23.40	370.73	48.90	411.88	49.90
824	814-824	T49	380.00	725.30	16.50		434.90	54.90
25	824-25	T50	378.86	18.00	5.72	45.39	434.90	56.04
825	824-825	T51	378.00	707.30	311.04		434.66	56.66
26	825-26	T52	378.08		26.81		434.66	56.58
826	825-826	T53	375.00	84.40	132.03		432.12	57.12
27	826-27	T54	374.71	18.00	12.64	49.51	425.22	50.51
827	826-827	T55	371.00	66.40	106.81		430.79	59.79
28	827-28	T56	370.46	23.40	3.38	49.13	430.79	60.33
828	827-828	T57	371.00	43.00	152.94		429.93	58.93
829	828-829	T58	365.00	19.60	300.00		428.57	63.57
29	829-29	T59	361.38	19.60	433.10		426.60	65.22
30	29-30	T60	361.72	19.60	7.14	51.89	426.59	64.87
830	828-830	T61	371.00	23.40	26.07		429.70	58.70
31	830-31	T62	371.00	23.40	6.46	45.56	429.69	58.69
831	830-831	T63	368.00		284.05		429.70	61.70
32	831-32	T64	365.21		314.20		429.70	64.49
33	825-33	T65	376.68	622.90	240.98		434.50	57.82
832	33-832	T66	375.00	622.90	449.34		434.19	59.19
833	832-833	T67	375.00	622.90	6.50		434.19	59.19
34	833-34	T68	374.68		3.28		434.19	59.51
834	833-834	T69	372.00	622.90	284.56		433.99	61.99
835	834-835	T70	370.00	622.90	181.85		433.87	63.87
836	835-836	T71	365.00	26.00	207.24		423.29	58.29
35	836-35	T72	365.52	26.00	6.37	56.44	422.96	57.44
837	835-837	T73	370.00	596.90	273.35		433.69	63.69
838	837-838	T74	370.00		14.85		433.69	63.69
36	838-36	T75	370.04		7.45		433.69	63.65
37	838-37	T76	369.72		9.22		433.69	63.97
839	837-839	T77	370.00	596.90	172.83		433.58	63.58
38	839-38	T78	368.77	18.00	4.89	46.00	415.77	47.00

840	839-840	T79	369.00	578.90	202.85		433.45	64.45
841	840-841	T80	362.00	27.70	66.56		431.56	69.56
39	841-39	T81	361.32	27.70	10.51	54.88	431.22	69.90
40	841-40	T82	351.93		144.63		431.56	79.63
842	840-842	T83	350.00	551.20	367.09		433.24	83.24
41	842-41	T84	349.55		33.36		433.24	83.69
843	842-843	T85	360.00	551.20	361.15		433.01	73.01
844	843-844	T86	362.00	551.20	310.89		432.81	70.81
42	844-42	T87	354.80	18.00	113.23	50.75	406.55	51.75
43	844-43	T88	362.64	18.00	7.87	50.96	432.81	70.17
845	844-845	T89	362.00	515.20	202.96		432.69	70.69
846	845-846	T90	361.00	39.40	180.48		430.67	69.67
44	846-44	T91	361.82		6.70		430.67	68.85
847	846-847	T92	351.00	39.40	209.34		428.31	77.31
848	847-848	T93	350.00	39.40	291.32		425.11	75.11
45	848-45	T94	346.57		9.28		425.11	78.54
849	848-849	T95	352.00	39.40	260.64		421.30	69.30
850	849-850	T96	346.00	39.40	185.09		418.59	72.59
851	850-851	T97	356.00	21.40	239.55		415.66	59.66
46	851-46	T98	357.28	21.40	257.55	54.14	412.42	55.14
852	850-852	T99	345.00	18.00	18.73		418.38	73.38
47	852-47	T100	345.16		6.25		418.38	73.22
853	852-853	T101	344.00	18.00	71.01		416.31	72.31
48	853-48	T102	343.79		1.40		416.31	72.53
854	853-854	T103	344.00	18.00	114.55		412.99	68.99
855	854-855	T104	345.00	18.00	150.07		408.64	63.64
856	855-856	T105	344.00	18.00	157.00		404.30	60.30
49	856-49	T106	342.52		2.00		404.30	61.78
50	856-50	T107	342.56	18.00	2.00	49.67	403.73	61.16
857	845-857	T108	362.00	475.80	11.31		432.69	70.69
51	857-51	T109	361.68		5.03		432.69	71.01
858	857-858	T110	366.00	475.80	286.65		432.52	66.52
52	858-52	T111	365.12		6.51		432.52	67.40
53	52-53	T112	364.77		7.30		432.52	67.76
859	858-859	T113	363.00	475.80	385.76		432.27	69.27
54	859-54	T114	362.44		3.07		432.27	69.83
860	859-860	T115	363.00	475.80	15.17		432.26	69.26
55	860-55	T116	363.27		4.26		432.26	68.99
861	860-861	T117	371.00	73.00	210.34		430.23	59.23
56	861-56	T118	371.63	55.00	1.80	57.60	430.23	58.60
862	861-862	T119	374.00	18.00	68.83		430.18	56.18
863	862-863	T120	374.00		13.88		430.18	56.18
57	863-57	T121	373.21		4.46		430.18	56.97
58	863-58	T122	373.41		10.87		430.18	56.77
864	862-864	T123	368.00	18.00	162.68		429.73	61.73
59	864-59	T124	366.25	18.00	21.19	46.51	413.76	47.51
865	864-865	T125	365.00		300.00		429.73	64.73
60	865-60	T126	383.02		525.99		429.73	46.72
866	860-866	T127	363.00	402.80	473.81		431.99	68.99
61	866-61	T128	362.67		23.88		431.99	69.33
867	866-867	T129	366.00	402.80	110.42		431.92	65.92
62	867-62	T130	365.27		3.71		431.92	66.66
868	867-868	T131	365.00	402.80	146.05		431.83	66.83
63	868-63	T132	363.47	39.60	23.16	45.48	409.95	46.48
869	868-869	T133	363.00	363.20	124.59		431.76	68.76

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

64	869-64	T134	360.76			2.00		431.76	71.00
870	869-870	T135	358.00	363.20		93.96		431.45	73.45
65	870-65	T136	357.86			4.47		431.45	73.59
871	870-871	T137	357.00	363.20		12.54		431.41	74.41
872	871-872	T138	357.00			4.45		431.41	74.41
66	872-66	T139	356.91			4.68		431.41	74.50
67	872-67	T140	357.30			177.73		431.41	74.11
873	871-873	T141	353.00	363.20		186.23		430.77	77.77
68	873-68	T142	352.44			17.42		430.77	78.33
874	873-874	T143	352.00	363.20		174.43		430.17	78.17
69	874-69	T144	350.66			3.75		430.17	79.51
875	874-875	T145	350.00	363.20		198.31		429.49	79.49
876	875-876	T146	348.00	363.20		252.08		428.62	80.62
70	876-70	T147	348.40			34.20	48.41	397.81	49.41
877	876-877	T148	348.00	329.00		202.17		427.97	79.97
878	877-878	T149	349.00			75.00		426.15	77.15
71	878-71	T150	348.71			25.23		426.15	77.44
72	878-72	T151	348.82			10.82		426.15	77.33
879	878-879	T152	351.00	75.00		352.52		424.42	73.42
73	879-73	T153	350.84			3.43		424.42	73.58
74	879-74	T154	350.95	75.00		10.72	72.42	424.37	73.42
75	877-75	T155	348.13			12.79		427.97	79.84
76	877-76	T156	347.76			18.19		427.97	80.21
880	877-880	T157	348.00	254.00		280.57		427.09	79.09
77	880-77	T158	346.76			27.12		427.09	80.34
881	880-881	T159	352.00			315.37		427.09	75.09
78	881-78	T160	351.86			11.18		427.09	75.23
882	881-882	T161	366.00			235.00		427.09	61.09
79	882-79	T162	365.61			28.43		427.09	61.48
80	882-80	T163	366.17			103.24		427.09	60.92
81	880-81	T164	346.56	254.00		294.91		426.06	79.50
82	81-82	T165	347.26			33.20	53.90	402.16	54.90
883	81-883	T166	347.00	220.80		338.83		424.95	77.95
884	883-884	T167	346.00	220.80		349.49		423.82	77.82
83	884-83	T168	345.77			34.10	52.85	423.82	78.05
885	884-885	T169	346.50	186.70		129.37		423.44	76.94
84	885-84	T170	345.81			19.45		423.44	77.63
85	885-85	T171	345.84			8.83		423.44	77.60
886	885-886	T172	346.00			18.00		421.72	75.72
86	886-86	T173	345.05			7.77		421.72	76.67
87	886-87	T174	345.25			18.00	45.54	391.79	46.54
887	885-887	T175	351.00	168.70		371.90		422.41	71.41
888	887-888	T176	354.40	168.70		354.78		421.42	67.02
88	888-88	T177	354.16			9.97		421.42	67.27
89	888-89	T178	354.25			41.80	53.48	419.15	64.90
889	888-889	T179	350.00	126.90		136.47		421.10	71.10
890	889-890	T180	351.00	28.50		110.16		420.97	69.97
90	890-90	T181	350.74			3.28		420.97	70.23
891	890-891	T182	351.00	28.50		15.36		420.95	69.95
91	891-91	T183	357.02	28.50		215.96	62.68	420.70	63.68
892	889-892	T184	348.00	98.40		62.35		420.29	72.29
92	892-92	T185	347.11			23.40	49.21	420.29	73.18
893	892-893	T186	344.00	75.00		245.49		418.05	74.05
93	893-93	T187	342.55			45.64		418.05	75.50
894	893-894	T188	351.00	75.00		450.00		413.39	62.39
895	894-895	T189	345.00	75.00		545.23		407.70	62.70
94	895-94	T190	343.92			12.39		407.70	63.78
896	895-896	T191	336.00	75.00		117.59		405.71	69.71
95	896-95	T192	335.82	27.30		31.28	50.96	387.78	51.96

96	896-96	T193	335.66		5.77					405.71	70.05
897	896-897	T194	337.00	47.70	6.92					405.62	68.62
97	897-97	T195	335.79		10.35					405.62	69.83
898	897-898	T196	334.00	47.70	230.26					402.54	68.54
899	898-899	T197	333.00	47.70	173.54					400.19	67.19
98	899-98	T198	332.78	23.20	4.71			54.98		400.19	67.41
900	899-900	T199	333.00	24.50	208.52					398.23	65.23
99	900-99	T200	334.78	24.50	273.67			59.87		395.65	60.87

## Turno 3

Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
			436.00							
801	0-801	T1	370.00	857.70	50.00				435.95	65.95
802	801-802	T2	370.00	857.70	70.00				435.89	65.89
803	802-803	T3	380.00	857.70	258.05				435.65	55.65
804	803-804	T4	381.00	90.60	193.89				434.91	53.91
1	804-1	T5	380.06	22.60	8.31		46.84		427.90	47.84
805	804-805	T6	381.00	68.00	56.10				434.78	53.78
2	805-2	T7	364.47		288.24				434.78	70.31
806	805-806	T8	380.00	68.00	117.61				434.44	54.44
3	806-3	T9	381.15	31.50	15.25		48.15		430.30	49.15
807	806-807	T10	379.00	36.50	121.78				434.33	55.33
808	807-808	T11	379.50		79.68				434.33	54.83
4	808-4	T12	379.01		24.79				434.33	55.32
5	808-5	T13	376.29		363.92				434.33	58.04
6	5-6	T14	365.85		338.61				434.33	68.48
809	807-809	T15	375.50	36.50	288.42				432.85	57.35
810	809-810	T16	375.50	36.50	13.32				432.33	56.83
7	810-7	T17	375.76		4.38				432.33	56.57
8	810-8	T18	375.82	36.50	5.24		53.65		430.47	54.65
9	809-9	T19	378.60		322.20				432.85	54.26
10	9-10	T20	376.02		201.86				432.85	56.83
901	803-901	T21	380.00	767.10	86.10				435.59	55.59
11	901-11	T22	380.32		9.85				435.59	55.27
12	901-12	T23	378.78		13.71				435.59	56.81
811	901-811	T24	380.00	767.10	415.34				435.28	55.28
812	811-812	T25	374.00	45.30	310.65				434.36	60.36
13	812-13	T26	374.14	19.50	5.98		51.08		434.35	60.21
813	812-813	T27	377.00	25.80	58.28				434.30	57.30
14	813-14	T28	376.55	25.80	10.48		50.10		427.65	51.10
15	813-15	T29	379.78		123.41				434.30	54.52
814	811-814	T30	380.00	721.80	160.13				435.17	55.17
815	814-815	T31	370.00		199.91				435.17	65.17
816	815-816	T32	360.00		82.78				435.17	75.17
16	816-16	T33	360.53		7.43				435.17	74.64
817	816-817	T34	360.00		256.20				435.17	75.17
17	817-17	T35	359.94		8.80				435.17	75.23
818	815-818	T36	370.00		9.05				435.17	65.17
18	818-18	T37	369.50		7.23				435.17	65.67
819	818-819	T38	368.00		204.48				435.17	67.17
19	819-19	T39	367.76		5.41				435.17	67.41
820	819-820	T40	370.00		288.24				435.17	65.17
821	820-821	T41	361.00		311.09				435.17	74.17
822	821-822	T42	361.00		9.53				435.17	74.17

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

20	822-20	T43	360.66			6.03		435.17	74.51
21	822-21	T44	362.03			316.41		435.17	73.14
823	821-823	T45	365.00			285.73		435.17	70.17
22	823-22	T46	364.09			8.10		435.17	71.08
23	823-23	T47	364.21			3.51		435.17	70.96
24	823-24	T48	361.98			370.73		435.17	73.19
824	814-824	T49	380.00	721.80		16.50		435.16	55.16
25	824-25	T50	378.86			5.72		435.16	56.30
825	824-825	T51	378.00	721.80		311.04		434.91	56.91
26	825-26	T52	378.08	18.00		26.81	45.46	424.54	46.46
826	825-826	T53	375.00			132.03		434.91	59.91
27	826-27	T54	374.71			12.64		434.91	60.19
827	826-827	T55	371.00			106.81		434.91	63.91
28	827-28	T56	370.46			3.38		434.91	64.45
828	827-828	T57	371.00			152.94		434.91	63.91
829	828-829	T58	365.00			300.00		434.91	69.91
29	829-29	T59	361.38			433.10		434.91	73.53
30	29-30	T60	361.72			7.14		434.91	73.19
830	828-830	T61	371.00			26.07		434.91	63.91
31	830-31	T62	371.00			6.46		434.91	63.91
831	830-831	T63	368.00			284.05		434.91	66.91
32	831-32	T64	365.21			314.20		434.91	69.70
33	825-33	T65	376.68	703.80		240.98	47.05	434.71	58.03
832	33-832	T66	375.00	675.00		449.34		434.35	59.35
833	832-833	T67	375.00	675.00		6.50		434.35	59.35
34	833-34	T68	374.68			3.28		434.35	59.67
834	833-834	T69	372.00	675.00		284.56		434.12	62.12
835	834-835	T70	370.00	675.00		181.85		433.97	63.97
836	835-836	T71	365.00			207.24		433.97	68.97
35	836-35	T72	365.52			6.37		433.97	68.45
837	835-837	T73	370.00	675.00		273.35		433.75	63.75
838	837-838	T74	370.00	50.40		14.85		424.46	54.46
36	838-36	T75	370.04	50.40		7.45	48.77	419.81	49.77
37	838-37	T76	369.72			9.22		424.46	54.73
839	837-839	T77	370.00	624.60		172.83		433.63	63.63
38	839-38	T78	368.77			4.89		433.63	64.85
840	839-840	T79	369.00	624.60		202.85		433.48	64.48
841	840-841	T80	362.00	54.00		66.56		426.96	64.96
39	841-39	T81	361.32			10.51		426.96	65.64
40	841-40	T82	351.93	54.00		144.63	59.88	412.81	60.88
842	840-842	T83	350.00	570.60		367.09		433.26	83.26
41	842-41	T84	349.55			33.36		433.26	83.71
843	842-843	T85	360.00	570.60		361.15		433.01	73.01
844	843-844	T86	362.00	570.60		310.89		432.80	70.80
42	844-42	T87	354.80			113.23		432.80	78.00
43	844-43	T88	362.64			7.87		432.80	70.16
845	844-845	T89	362.00	570.60		202.96		432.67	70.67
846	845-846	T90	361.00	69.90		180.48		426.83	65.83
44	846-44	T91	361.82			6.70		426.83	65.01
847	846-847	T92	351.00	69.90		209.34		420.05	69.05
848	847-848	T93	350.00	69.90		291.32		410.84	60.84
45	848-45	T94	346.57	33.90		9.28	53.89	410.73	64.16
849	848-849	T95	352.00	36.00		260.64		407.61	55.61
850	849-850	T96	346.00	36.00		185.09		405.32	59.32
851	850-851	T97	356.00			239.55		405.32	49.32



46	851-46	T98	357.28		257.55		405.32	48.04
852	850-852	T99	345.00	36.00	18.73		404.55	59.55
47	852-47	T100	345.16	18.00	6.25	48.56	404.55	59.39
853	852-853	T101	344.00	18.00	71.01		402.49	58.49
48	853-48	T102	343.79		1.40		402.49	58.70
854	853-854	T103	344.00	18.00	114.55		399.16	55.16
855	854-855	T104	345.00	18.00	150.07		394.81	49.81
856	855-856	T105	344.00	18.00	157.00		390.47	46.47
49	856-49	T106	342.52	18.00	2.00	46.95	390.47	47.95
50	856-50	T107	342.56		2.00		390.47	47.91
857	845-857	T108	362.00	500.70	11.31		432.66	70.66
51	857-51	T109	361.68		5.03		432.66	70.98
858	857-858	T110	366.00	500.70	286.65		432.48	66.48
52	858-52	T111	365.12	106.00	6.51	51.30	417.42	52.30
53	52-53	T112	364.77		7.30		417.42	52.66
859	858-859	T113	363.00	394.70	385.76		432.30	69.30
54	859-54	T114	362.44		3.07		432.30	69.86
860	859-860	T115	363.00	394.70	15.17		432.29	69.29
55	860-55	T116	363.27		4.26		432.29	69.02
861	860-861	T117	371.00	46.80	210.34		431.40	60.40
56	861-56	T118	371.63		1.80		431.40	59.77
862	861-862	T119	374.00	46.80	68.83		431.09	57.09
863	862-863	T120	374.00	28.80	13.88		421.30	47.30
57	863-57	T121	373.21	28.80	4.46	46.68	420.89	47.68
58	863-58	T122	373.41		10.87		421.30	47.89
864	862-864	T123	368.00	18.00	162.68		430.64	62.64
59	864-59	T124	366.25		21.19		430.64	64.39
865	864-865	T125	365.00	18.00	300.00		429.82	64.82
60	865-60	T126	383.02	18.00	525.99	44.37	428.39	45.37
866	860-866	T127	363.00	347.90	473.81		432.09	69.09
61	866-61	T128	362.67		23.88		432.09	69.42
867	866-867	T129	366.00	347.90	110.42		432.03	66.03
62	867-62	T130	365.27	61.20	3.71	61.88	428.15	62.88
868	867-868	T131	365.00	286.70	146.05		431.98	66.98
63	868-63	T132	363.47		23.16		431.98	68.52
869	868-869	T133	363.00	286.70	124.59		431.94	68.94
64	869-64	T134	360.76		2.00		431.94	71.18
870	869-870	T135	358.00	286.70	93.96		431.74	73.74
65	870-65	T136	357.86		4.47		431.74	73.88
871	870-871	T137	357.00	286.70	12.54		431.71	74.71
872	871-872	T138	357.00		4.45		431.71	74.71
66	872-66	T139	356.91		4.68		431.71	74.80
67	872-67	T140	357.30		177.73		431.71	74.42
873	871-873	T141	353.00	286.70	186.23		431.30	78.30
68	873-68	T142	352.44	32.50	17.42	51.89	405.33	52.89
874	873-874	T143	352.00	254.20	174.43		430.99	78.99
69	874-69	T144	350.66	37.20	3.75	59.94	430.99	80.33
875	874-875	T145	350.00	217.00	198.31		430.73	80.73
876	875-876	T146	348.00	217.00	252.08		430.39	82.39
70	876-70	T147	348.40		36.03		430.39	81.99
877	876-877	T148	348.00	217.00	202.17		430.09	82.09
878	877-878	T149	349.00	100.80	372.52		426.95	77.95
71	878-71	T150	348.71	76.00	25.23	58.27	407.98	59.27
72	878-72	T151	348.82	24.80	10.82	50.48	426.61	77.79
879	878-879	T152	351.00		352.52		426.95	75.95

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

73	879-73	T153 350.84		3.43		426.95	76.11
74	879-74	T154 350.95		10.72		426.95	76.00
75	877-75	T155 348.13	18.00	12.79	47.48	428.22	80.08
76	877-76	T156 347.76	28.70	18.19	51.14	399.90	52.14
880	877-880	T157 348.00	69.50	280.57		430.01	82.01
77	880-77	T158 346.76		27.12		430.01	83.25
881	880-881	T159 352.00	18.00	315.37		429.82	77.82
78	881-78	T160 351.86	18.00	11.18	57.04	429.54	77.68
882	881-882	T161 366.00		235.00		429.82	63.82
79	882-79	T162 365.61		28.43		429.82	64.21
80	882-80	T163 366.17		103.24		429.82	63.65
81	880-81	T164 346.56	51.50	294.91	54.08	429.95	83.39
82	81-82	T165 347.26		30.21		429.95	82.69
883	81-883	T166 347.00	21.30	338.83		429.94	82.94
884	883-884	T167 346.00	21.30	349.49		429.92	83.92
83	884-83	T168 345.77		3.74		429.92	84.15
885	884-885	T169 346.50	21.30	129.37		429.91	83.41
84	885-84	T170 345.81	21.30	19.45	53.63	400.44	54.63
85	885-85	T171 345.84		8.83		429.91	84.07
886	885-886	T172 346.00		23.65		429.91	83.91
86	886-86	T173 345.05		7.77		429.91	84.86
87	886-87	T174 345.25		412.18		429.91	84.66
887	885-887	T175 351.00		371.90		429.91	78.91
888	887-888	T176 354.40		354.78		429.91	75.51
88	888-88	T177 354.16		9.97		429.91	75.76
89	888-89	T178 354.25		8.22		429.91	75.66
889	888-889	T179 350.00		136.47		429.91	79.91
890	889-890	T180 351.00		110.16		429.91	78.91
90	890-90	T181 350.74		3.28		429.91	79.17
891	890-891	T182 351.00		15.36		429.91	78.91
91	891-91	T183 357.02		215.96		429.91	72.89
892	889-892	T184 348.00		62.35		429.91	81.91
92	892-92	T185 347.11		4.07		429.91	82.80
893	892-893	T186 344.00		245.49		429.91	85.91
93	893-93	T187 342.55		45.64		429.91	87.37
894	893-894	T188 351.00		450.00		429.91	78.91
895	894-895	T189 345.00		545.23		429.91	84.91
94	895-94	T190 343.92		12.39		429.91	85.99
896	895-896	T191 336.00		117.59		429.91	93.91
95	896-95	T192 335.82		31.28		429.91	94.09
96	896-96	T193 335.66		5.77		429.91	94.25
897	896-897	T194 337.00		6.92		429.91	92.91
97	897-97	T195 335.79		10.35		429.91	94.12
898	897-898	T196 334.00		230.26		429.91	95.91
899	898-899	T197 333.00		173.54		429.91	96.91
98	899-98	T198 332.78		4.71		429.91	97.13
900	899-900	T199 333.00		208.52		429.91	96.91
99	900-99	T200 334.78		273.67		429.91	95.13

**Tabla F.7. Diseño hidráulico de la Red Molinar I, luego de implementar AG-PNL**

ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]
T1	1000.00	T51	962.25	T101	107.98	T151	119.92
T2	1000.00	T52	63.71	T102	68.73	T152	266.76
T3	1000.00	T53	210.62	T103	108.00	T153	537.23
T4	301.44	T54	59.43	T104	108.07	T154	266.53
T5	59.35	T55	210.42	T105	109.09	T155	77.57
T6	300.15	T56	401.88	T106	364.91	T156	56.76
T7	99.77	T57	210.37	T107	67.68	T157	464.98
T8	287.79	T58	163.43	T108	848.23	T158	51.11
T9	84.58	T59	163.43	T109	394.08	T159	242.00
T10	287.88	T60	260.37	T110	836.66	T160	111.00
T11	218.93	T61	151.55	T111	87.45	T161	241.47
T12	88.70	T62	210.33	T112	73.27	T162	140.61
T13	221.04	T63	151.55	T113	814.86	T163	187.51
T14	175.85	T64	151.54	T114	574.13	T164	454.12
T15	201.38	T65	898.24	T115	802.54	T165	69.58
T16	132.75	T66	892.70	T116	459.79	T166	437.51
T17	131.82	T67	897.65	T117	229.69	T167	437.51
T18	84.76	T68	552.20	T118	287.97	T168	506.62
T19	196.87	T69	890.92	T119	227.27	T169	419.84
T20	196.90	T70	890.73	T120	67.45	T170	51.61
T21	1000.00	T71	110.53	T121	102.15	T171	183.40
T22	73.81	T72	110.52	T122	59.16	T172	89.50
T23	102.38	T73	890.22	T123	175.95	T173	228.04
T24	1000.00	T74	85.47	T124	55.69	T174	89.52
T25	244.85	T75	85.55	T125	175.93	T175	407.57
T26	212.98	T76	169.10	T126	175.97	T176	407.20
T27	244.81	T77	884.06	T127	784.11	T177	144.51
T28	66.09	T78	40.64	T128	65.20	T178	93.79
T29	244.86	T79	883.70	T129	769.86	T179	377.36
T30	1000.00	T80	127.61	T130	83.03	T180	250.20
T31	241.13	T81	124.68	T131	770.22	T181	450.12
T32	101.75	T82	127.66	T132	71.80	T182	249.66
T33	53.33	T83	883.08	T133	768.64	T183	249.77
T34	102.01	T84	93.89	T134	377.76	T184	242.02
T35	101.90	T85	866.50	T135	526.34	T185	476.19
T36	224.73	T86	866.41	T136	53.64	T186	234.73
T37	255.91	T87	70.66	T137	524.61	T187	59.39
T38	215.32	T88	230.90	T138	109.27	T188	228.80
T39	76.20	T89	865.27	T139	425.03	T189	228.37
T40	199.41	T90	176.38	T140	87.11	T190	175.62
T41	199.39	T91	51.62	T141	522.41	T191	206.78

T42	146.46	T92	176.34	T142	60.80	T192	68.91
T43	244.01	T93	177.19	T143	522.44	T193	341.46
T44	122.11	T94	167.01	T144	505.91	T194	182.82
T45	167.67	T95	167.11	T145	522.39	T195	132.92
T46	71.82	T96	167.08	T146	522.39	T196	182.85
T47	176.82	T97	137.65	T147	69.28	T197	182.60
T48	131.51	T98	136.94	T148	509.77	T198	213.81
T49	962.10	T99	130.86	T149	266.83	T199	152.89
T50	265.22	T100	310.49	T150	96.34	T200	152.97

**Tabla F.8. Resultados de asignación de turno con modelo AG-PNL en cada hidrante de la Red de Riego Molinar I**

Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]
1	3	22.60	26	3	18.00	51	1	33.00	76	3	28.70
2	2	23.40	27	2	18.00	52	3	106.00	77	1	18.00
3	3	31.50	28	2	23.40	53	1	55.80	78	3	18.00
4	1	31.50	29	1	31.60	54	1	28.80	79	1	53.70
5	2	27.60	30	2	19.60	55	1	18.00	80	1	22.60
6	2	20.40	31	2	23.40	56	2	55.00	81	3	30.20
7	2	34.20	32	1	29.30	57	3	28.80	82	2	33.20
8	3	36.50	33	3	28.80	58	1	18.00	83	2	34.10
9	2	23.40	34	1	23.40	59	2	18.00	84	3	21.30
10	1	31.00	35	2	26.00	60	3	18.00	85	1	18.10
11	1	38.00	36	3	50.40	61	1	28.80	86	1	27.60
12	2	72.00	37	1	18.00	62	3	61.20	87	2	18.00
13	3	19.50	38	2	18.00	63	2	39.60	88	1	18.00
14	3	25.80	39	2	27.70	64	1	31.50	89	2	41.80
15	2	29.00	40	3	54.00	65	1	35.80	90	1	18.00
16	2	26.00	41	1	50.00	66	1	18.00	91	2	28.50
17	1	23.40	42	2	18.00	67	1	23.40	92	2	23.40
18	1	18.00	43	2	18.00	68	3	32.50	93	1	18.00
19	1	26.70	44	1	25.20	69	3	37.20	94	1	51.70
20	1	22.50	45	3	33.90	70	2	34.20	95	2	27.30
21	1	23.40	46	2	21.40	71	3	76.00	96	1	24.60
22	2	28.80	47	3	18.00	72	3	24.80	97	1	18.00
23	1	18.00	48	1	18.00	73	1	18.00	98	2	23.20
24	2	23.40	49	3	18.00	74	2	75.00	99	2	24.50
25	2	18.00	50	2	18.00	75	3	18.00			

**Tabla F.9. Resultados de cumplimiento de la Fiabilidad de presión por hidrante de la Red de Riego Molinar I**

Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>	Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>	Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>
1	H44	748	1.00	34	H71	709	1.00	67	H29	771	0.47
2	H45	763	0.99	35	H76	763	1.00	68	H30	779	0.82
3	H46	729	0.56	36	H75	684	1.00	69	H32	776	0.57
4	H47	120	0.99	37	H70	677	1.00	70	H31	553	0.98
5	H48	112	0.96	38	H69	735	1.00	71	H28	673	1.00
6	H49	590	0.85	39	H68	498	1.00	72	H27	509	1.00
7	H50	182	0.56	40	H66	738	1.00	73	H26	468	1.00
8	H99	755	0.68	41	H65	719	1.00	74	H24	676	0.67
9	H98	711	0.83	42	H67	638	1.00	75	H23	745	0.84
10	H96	713	0.84	43	H64	764	0.64	76	H22	712	0.91
11	H97	441	0.95	44	H63	658	1.00	77	H21	580	0.87
12	H95	523	0.83	45	H62	669	0.98	78	H20	779	0.96
13	H94	792	0.62	46	H61	586	1.00	79	H19	699	1.00
14	H93	678	1.00	47	H60	455	0.63	80	H17	616	0.62
15	H92	617	1.00	48	H59	632	1.00	81	H16	768	1.00
16	H90	279	0.99	49	H58	453	1.00	82	H18	669	1.00
17	H91	780	0.64	50	H56	722	0.65	83	H25	475	1.00
18	H89	718	0.99	51	H54	664	1.00	84	H13	567	1.00
19	H88	372	1.00	52	H55	333	1.00	85	H14	645	1.00
20	H87	413	0.99	53	H53	698	1.00	86	H15	745	0.38
21	H84	741	1.00	54	H52	757	1.00	87	H11	716	1.00
22	H85	712	1.00	55	H51	713	1.00	88	H12	765	1.00
23	H86	831	1.00	56	H43	673	1.00	89	H1	740	1.00
24	H83	580	1.00	57	H42	418	1.00	90	H2	663	0.97
25	H82	762	1.00	58	H41	733	1.00	91	H3	703	0.94
26	H81	675	1.00	59	H40	745	1.00	92	H8	543	0.33
27	H77	539	1.00	60	H39	766	1.00	93	H7	772	0.73
28	H78	702	1.00	61	H38	520	1.00	94	H9	646	0.79
29	H79	752	0.75	62	H36	681	1.00	95	H10	702	0.14
30	H80	713	0.74	63	H37	470	1.00	96	H4	774	0.89
31	H73	134	1.00	64	H35	788	1.00	97	H5	744	0.94
32	H74	691	0.30	65	H34	608	1.00	98	H6	705	0.87
33	H72	745	1.00	66	H33	691	1.00	99	H57	711	1.00

$\Sigma$	88.64
IFC <sub>T</sub>	0.90

**Tabla F.10. Simulación de N<sub>T</sub> y Flexibilidad. Red Molinar I**

NT	Flexibilidad
1980	0.90

## **G) Ejemplo de implementación Navarra**

### **Características topológicas de la red**

**Tabla G.1. ID Nudos y cotas. Caso RCRP “Navarra”**

<b>ID Nudo</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>ID Nudo</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>ID Nudo</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>ID Nudo</b>	<b>Cota (m)</b>
9022	489.00	1281	422.88	882	384.00	49	347.96
10	440.67	1271	425.98	89	383.15	50	349.77
9801	443.30	1272	425.27	92	372.40	9912	360.92
9	444.57	126	425.12	993	373.02	51	362.03
11	432.00	149	427.00	102	377.00	9913	359.01
12	431.00	123	431.51	9923	375.38	55	356.38
13	439.00	1091	434.69	94	376.00	9914	353.64
9014	420.35	1092	424.35	1012	377.00	56	355.36
9967	420.22	9968	423.22	9088	377.33	541	355.06
156	425.12	121	427.14	901	378.00	542	345.48
155	419.00	122	434.09	9924	378.41	53	348.01
154	422.00	120	423.12	91	366.30	902	377.00
1531	422.48	110	420.31	9944	372.67	43	375.44
159	427.00	1041	399.00	222	374.55	45	373.33
160	427.00	133	400.00	41	411.00	9943	371.22
14	420.35	103	399.06	93	374.23	881	370.00
1502	419.95	134	386.00	9930	376.60	9934	368.05
1501	420.00	1011	385.00	221	383.82	442	365.45
16	406.00	9945	385.01	9950	376.77	46	369.61
9963	404.01	9955	385.01	9952	376.77	47	369.85
17	403.19	135	387.00	9951	376.63	9937	369.53
9015	402.18	100	384.06	211	383.00	85	372.26
137	402.00	9947	386.99	201	380.23	84	379.47
1361	402.34	1382	388.43	202	380.20	9928	373.13
9084	406.42	1392	388.64	9089	370.95	761	373.00
9085	406.43	99	385.03	9939	371.70	82	373.00
8	415.11	1381	389.19	9940	371.70	81	374.01
9966	409.21	9946	385.59	372	368.00	751	378.00
18	410.00	95	384.00	42	365.90	782	384.00
7	404.00	98	385.88	371	364.00	752	384.00
6	413.41	96	389.00	441	370.06	1622	398.00
9091	413.75	97	390.16	9929	373.49	73	404.11
9086	413.00	1362	390.10	9938	373.49	48	368.81
9087	413.00	1042	397.07	381	372.32	77	369.67
5	424.04	1051	399.14	40	367.90	762	362.00
9970	428.96	9964	397.94	9090	358.35	9932	367.81
4002	435.00	129	399.00	242	363.33	741	368.00
		106	397.23	9925	369.07	9933	373.31

---

3	430.00	107	398.16	29	371.84	991	373.28
2	435.00	9957	399.87	23	376.28	742	373.00
4001	411.00	1282	399.39	30	375.84	9927	374.83
1	411.00	1081	423.00	282	389.00	721	375.00
1581	421.22	125	423.68	281	389.12	722	386.00
157	417.00	124	425.88	272	388.09	71	361.00
9960	410.66	1052	384.03	271	383.69	9911	357.84
140	410.00	87	383.02	212	379.00	70	361.00
9965	409.86	9953	379.71	261	381.20	9021	352.29
1582	412.17	1082	380.00	9988	382.83	62	352.29
1391	410.66	86	380.00	262	385.20	61	351.96
9959	413.26	112	390.00	19	385.76	9915	358.23
143	407.00	111	387.21	25	388.80	63	358.10
1441	414.05	83	387.79	241	354.81	592	356.12
146	416.00	113	396.06	9920	354.00	9916	355.00
1532	420.39	114	395.14	32	352.00	60	351.49
152	421.00	801	395.00	31	368.10	591	349.28
151	426.00	998	388.00	33	349.79	9926	368.57
147	436.00	802	382.00	382	353.13	64	366.16
150	435.00	781	383.00	351	353.27	58	349.02
9958	413.26	79	388.57	352	350.90	57	349.36
142	405.00	1191	387.24	391	351.56	65	376.31
141	403.00	997	392.18	362	345.09	994	393.25
1442	399.15	1161	393.04	9921	351.27	995	399.09
999	399.00	115	401.46	392	351.49	682	389.00
1321	402.07	118	398.17	9918	348.00	69	400.34
145	402.00	9962	404.89	361	350.90	9954	389.22
1322	405.91	1171	405.04	9919	342.13	681	389.07
1311	414.00	1162	405.27	34	342.28	66	385.94
1312	428.48	1172	405.04	521	343.00	161	384.00
148	440.00	1192	401.20	522	343.02	67	378.00
130	430.00	1621	397.00	9922	347.96		
9969	427.16	1281	422.88	882	384.00		

---

**Tabla G.2. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Navarra”**

Nin-Nfin	ID Linea	Longitud (m)	Nin-Nfin	ID Linea	Longitud (m)	Nin-Nfin	ID Linea	Longitud (m)
0-9022	T1	875.00	9947-1382	T94	128.69	271-261	T187	67.46
9022-10	T2	247.00	1382-1392	T95	10.74	261-9988	T188	73.86
10-9801	T3	108.69	9947-99	T96	284.97	9988-262	T189	107.08
9801-9	T4	52.59	99-1381	T97	25.87	262-19	T190	17.96
9022-11	T5	56.00	99-9946	T98	44.68	262-25	T191	75.66
11-12	T6	50.48	9946-95	T99	77.24	9090-241	T192	149.48
12-13	T7	187.90	9946-98	T100	28.41	241-9920	T193	72.83
13-9014	T8	564.60	98-96	T101	237.65	9920-32	T194	227.14
9014-9967	T9	25.96	96-97	T102	21.18	32-31	T195	219.24
9967-156	T10	35.30	97-1362	T103	57.37	32-33	T196	203.55
156-155	T11	212.84	1041-1042	T104	216.54	9920-382	T197	129.27
155-154	T12	282.15	1042-1051	T105	446.56	382-351	T198	19.83
154-1531	T13	12.35	1051-9964	T106	49.35	351-352	T199	311.93
1531-159	T14	98.47	9964-129	T107	20.39	352-391	T200	20.25
159-160	T15	12.79	9964-106	T108	315.84	352-362	T201	261.91
9014-14	T16	58.00	106-107	T109	49.78	362-9921	T202	7.15
14-1502	T17	16.38	107-9957	T110	112.72	9921-392	T203	20.31
1502-1501	T18	568.00	9957-1282	T111	23.88	9921-9918	T204	187.20
1501-16	T19	277.00	9957-1081	T112	511.92	9918-361	T205	164.20
16-9963	T20	98.64	1081-125	T113	18.72	361-9919	T206	341.13
9963-17	T21	9.43	125-124	T114	188.42	9919-34	T207	14.16
17-9015	T22	25.95	1042-1052	T115	658.06	9919-521	T208	28.22
9015-137	T23	7.00	1052-87	T116	315.37	521-522	T209	7.31
9015-1361	T24	7.00	87-9953	T117	139.13	9918-9922	T210	86.79
9963-9084	T25	192.12	9953-1082	T118	19.27	9922-49	T211	20.23
9084-9085	T26	6.19	9953-86	T119	163.75	9922-50	T212	61.16
9085-8	T27	323.85	86-112	T120	233.69	50-9912	T213	319.83
9084-9966	T28	222.57	112-111	T121	158.52	9912-51	T214	17.46
9966-18	T29	19.13	111-83	T122	22.74	9912-9913	T215	71.41
9966-7	T30	176.66	111-113	T123	180.39	9913-55	T216	101.35
7-6	T31	119.92	113-114	T124	281.90	55-9914	T217	182.52
6-9091	T32	352.00	114-801	T125	19.11	9914-56	T218	181.81
9091-9086	T33	105.42	801-998	T126	161.81	9913-541	T219	185.10
9086-9087	T34	241.43	998-802	T127	250.04	541-542	T220	615.08
9087-5	T35	279.18	802-781	T128	15.26	542-53	T221	23.55
9087-9970	T36	185.33	998-79	T129	35.79	9088-902	T222	120.00
9970-4002	T37	1.00	79-1191	T130	24.18	902-43	T223	24.06
4002-3	T38	12.85	1191-997	T131	210.77	43-45	T224	106.18
9970-2	T39	18.31	997-1161	T132	21.16	45-9943	T225	58.63
9086-4001	T40	29.44	1161-115	T133	246.79	9943-881	T226	33.10
4001-1	T41	187.00	997-118	T134	241.42	9943-9934	T227	174.35
9967-1581	T42	206.91	118-9962	T135	290.34	9934-442	T228	164.01
1581-157	T43	47.31	9962-1171	T136	21.28	9934-46	T229	39.63
157-9960	T44	392.69	1171-1162	T137	14.16	46-47	T230	85.25
9960-140	T45	213.10	1171-1172	T138	6.23	47-9937	T231	26.46
140-9965	T46	1.00	9962-1192	T139	98.14	9937-85	T232	223.19
9965-1582	T47	17.91	79-1621	T140	274.10	85-84	T233	237.08



---

140-1391	T48	45.11	1052-882	T141	22.40	84-9928	T234	418.09
9960-9959	T49	13.42	882-89	T142	19.01	9928-761	T235	1.00
9959-143	T50	312.22	89-92	T143	731.21	761-82	T236	24.07
143-1441	T51	359.75	92-993	T144	128.86	82-81	T237	45.22
1441-146	T52	220.08	993-102	T145	36.48	761-751	T238	147.31
146-1532	T53	272.86	993-9923	T146	288.58	751-782	T239	350.06
1532-152	T54	15.80	9923-94	T147	27.18	782-752	T240	21.02
152-151	T55	248.82	9923-1012	T148	131.17	782-1622	T241	321.16
151-147	T56	209.44	882-9088	T149	500.92	1622-73	T242	123.57
147-150	T57	25.87	9088-901	T150	70.00	9937-48	T243	101.70
9959-9958	T58	1.00	901-9924	T151	1.00	48-77	T244	34.79
9958-142	T59	180.19	9924-91	T152	399.35	77-762	T245	340.83
142-141	T60	31.67	91-9944	T153	383.73	762-9932	T246	203.23
142-1442	T61	223.24	9944-222	T154	71.70	9932-741	T247	1.00
1442-999	T62	17.95	222-41	T155	68.11	741-9933	T248	129.47
999-1321	T63	251.11	9944-93	T156	148.62	9933-991	T249	13.53
1321-145	T64	19.01	93-9930	T157	94.57	991-742	T250	1.00
1321-1322	T65	77.48	9930-221	T158	26.31	742-9927	T251	84.12
1322-1311	T66	171.45	9930-9950	T159	160.70	9927-721	T252	1.00
1311-1312	T67	250.72	9950-9952	T160	1.00	721-722	T253	299.84
1312-148	T68	208.28	9952-9951	T161	10.71	9933-71	T254	336.37
148-130	T69	202.90	9951-211	T162	35.43	71-9911	T255	293.48
130-9969	T70	58.27	9951-201	T163	155.92	9911-70	T256	17.83
9969-1281	T71	40.49	201-202	T164	7.94	9911-9021	T257	347.00
9969-1271	T72	79.85	9088-9089	T165	515.78	9021-62	T258	48.70
1271-1272	T73	362.39	9089-9939	T166	81.04	62-61	T259	7.97
1272-126	T74	14.29	9939-9940	T167	1.00	9021-9915	T260	98.50
126-149	T75	23.93	9940-372	T168	20.05	9915-63	T261	9.51
126-123	T76	250.89	9939-42	T169	72.43	9915-592	T262	82.02
123-1091	T77	321.39	42-371	T170	19.72	592-9916	T263	38.72
1091-1092	T78	185.59	9089-441	T171	97.17	9916-60	T264	97.20
1092-9968	T79	24.29	441-9929	T172	47.75	9916-591	T265	276.87
9968-121	T80	149.45	9929-9938	T173	1.00	592-9926	T266	269.89
121-122	T81	105.63	9938-381	T174	19.66	9926-64	T267	627.24
9968-120	T82	43.96	9929-40	T175	258.01	64-58	T268	368.58
120-110	T83	103.16	9089-9090	T176	609.96	58-57	T269	23.61
1321-1041	T84	612.00	9090-242	T177	356.00	9926-65	T270	208.34
1041-133	T85	18.38	242-9925	T178	154.34	65-994	T271	500.84
1041-103	T86	41.27	9925-29	T179	26.98	994-995	T272	251.39
103-134	T87	365.77	9925-23	T180	163.86	995-682	T273	17.27
134-1011	T88	25.20	23-30	T181	17.45	995-69	T274	80.20
1011-9945	T89	22.05	23-282	T182	229.92	994-9954	T275	74.42
9945-9955	T90	1.00	282-281	T183	8.01	9954-681	T276	21.49
9955-135	T91	182.23	281-272	T184	50.10	9954-66	T277	454.22
9945-100	T92	116.76	272-271	T185	124.18	66-161	T278	20.81
9955-9947	T93	126.83	271-212	T186	18.44	161-67	T279	74.78

---

**Tabla G.3. Valores de demanda en hidrantes. Caso RCRP “Navarra”**

ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)
1	1	19.50	77	53	14.00	149	105	15.00	762	157	17.00
2	2	12.20	79	54	15.50	150	106	12.50	781	158	23.00
3	3	13.80	81	55	9.30	151	107	12.70	782	159	23.00
5	4	12.00	82	56	11.20	152	108	19.00	801	160	13.50
6	5	13.30	83	57	17.00	154	109	20.50	802	161	13.50
7	6	18.00	84	58	16.00	155	110	10.30	881	162	13.50
8	7	12.10	85	59	17.50	156	111	24.00	882	163	13.50
9	8	10.40	86	60	10.90	157	112	15.00	901	164	18.00
10	9	12.00	87	61	18.00	159	113	15.00	902	165	18.00
11	10	16.00	89	62	14.50	160	114	17.00	1011	166	12.50
12	11	12.50	91	63	12.30	161	115	12.60	1012	167	12.50
13	12	20.00	92	64	13.50	201	116	15.50	1041	168	23.00
14	13	20.00	93	65	17.00	202	117	15.50	1042	169	23.00
16	14	13.50	94	66	22.50	211	118	18.50	1051	170	29.00
17	15	17.00	95	67	14.00	212	119	18.50	1052	171	29.00
18	16	11.80	96	68	12.80	221	120	14.00	1081	172	16.00
19	17	16.00	97	69	13.20	222	121	14.00	1082	173	16.00
23	18	12.40	98	70	10.60	241	122	14.50	1091	174	15.00
25	19	14.50	99	71	15.50	242	123	14.50	1092	175	15.00
29	20	23.50	100	72	12.90	261	124	13.00	1161	176	15.00
30	21	16.00	102	73	19.00	262	125	13.00	1162	177	15.00
31	22	14.50	103	74	22.00	271	126	12.00	1171	178	13.00
32	23	20.00	106	75	11.70	272	127	12.00	1172	179	13.00
33	24	16.50	107	76	22.50	281	128	14.50	1191	180	42.50
34	25	18.00	110	77	12.50	282	129	14.50	1192	181	42.50
40	26	13.10	111	78	14.00	351	130	20.00	1271	182	14.00
41	27	14.00	112	79	13.00	352	131	20.00	1272	183	14.00
42	28	12.50	113	80	15.50	361	132	13.00	1281	184	16.00
43	29	19.00	114	81	20.50	362	133	13.00	1282	185	16.00
45	30	12.60	115	82	18.50	371	134	17.00	1311	186	21.50
46	31	12.50	118	83	11.50	372	135	17.00	1312	187	21.50
47	32	13.20	120	84	18.00	381	136	26.00	1321	188	12.50
48	33	12.50	121	85	12.00	382	137	26.00	1322	189	12.50
49	34	12.80	122	86	12.40	391	138	15.00	1361	190	13.00
50	35	15.50	123	87	12.60	392	139	15.00	1362	191	13.00
51	36	13.10	124	88	16.00	441	140	24.50	1381	192	13.50
53	37	15.00	125	89	22.00	442	141	24.50	1382	193	13.50
55	38	14.50	126	90	13.30	521	142	17.50	1391	194	23.00
56	39	20.00	129	91	20.00	522	143	17.50	1392	195	23.00
57	40	13.00	130	92	13.50	541	144	17.50	1441	196	20.50
58	41	12.30	133	93	15.00	542	145	17.50	1442	197	20.50
60	42	13.10	134	94	14.50	591	146	14.50	1501	198	14.00
61	43	11.80	135	95	15.00	592	147	14.50	1502	199	14.00
62	44	12.70	137	96	15.00	681	148	35.00	1531	200	27.50
63	45	11.70	140	97	18.50	682	149	31.00	1532	201	27.50
64	46	13.70	141	98	18.00	721	150	15.00	1581	202	23.00
66	47	14.50	142	99	17.00	722	151	15.00	1582	203	23.00
67	48	12.50	143	100	16.00	741	152	20.50	1621	204	20.50
69	49	30.00	145	101	23.50	742	153	20.50	1622	205	20.50
70	50	15.00	146	102	21.50	751	154	23.00	4001	206	15.50
71	51	11.90	147	103	22.50	752	155	23.00	4002	207	15.50
73	52	21.50	148	104	13.00	761	156	17.00			

Tabla G.4. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Navarra”

ID Nudo	ID Hidrante	ASIG. TURNO	DOTAC. [L/S]	Q TT1	Q TT2	Q TT3	SQTT
				1206.50	1050.20	1202.60	3459.30
[1]	[2]	[3]	[4]	Q T1	Q T2	Q T3	
1	1	1	19.50	19.50			
2	1	3	12.20			12.20	
3	1	2	13.80		13.80		
5	1	2	12.00		12.00		
6	1	2	13.30		13.30		
7	1	3	18.00			18.00	
8	1	1	12.10	12.10			
9	1	1	10.40	10.40			
10	1	1	12.00	12.00			
11	1	3	16.00			16.00	
12	1	1	12.50	12.50			
13	1	1	20.00	20.00			
14	1	3	20.00			20.00	
16	1	2	13.50		13.50		
17	1	1	17.00	17.00			
18	1	3	11.80			11.80	
19	1	2	16.00		16.00		
23	1	1	12.40	12.40			
25	1	1	14.50	14.50			
29	1	1	23.50	23.50			
30	1	2	16.00		16.00		
31	1	2	14.50		14.50		
32	1	3	20.00			20.00	
33	1	3	16.50			16.50	
34	1	3	18.00			18.00	
40	1	3	13.10			13.10	
41	1	2	14.00		14.00		
42	1	3	12.50			12.50	
43	1	2	19.00		19.00		
45	1	2	12.60		12.60		
46	1	1	12.50	12.50			
47	1	3	13.20			13.20	
48	1	3	12.50			12.50	
49	1	1	12.80	12.80			
50	1	2	15.50		15.50		
51	1	1	13.10	13.10			
53	1	2	15.00		15.00		
55	1	2	14.50		14.50		
56	1	2	20.00		20.00		
57	1	1	13.00	13.00			
58	1	2	12.30		12.30		
60	1	3	13.10			13.10	
61	1	1	11.80	11.80			
62	1	3	12.70			12.70	
63	1	1	11.70	11.70			
64	1	2	13.70		13.70		
66	1	2	14.50		14.50		
67	1	2	12.50		12.50		
69	1	1	30.00	30.00			
70	1	1	15.00	15.00			
71	1	1	11.90	11.90			
73	1	1	21.50	21.50			
77	1	2	14.00		14.00		

Coste 4578108.8 USD

**Tabla G.5. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Navarra”**

<b>Datos generales</b>					
Viscosidad cinemática	0,000001 m <sup>2</sup> /s				
Rugosidad absoluta	7,00E-03 mm				
Curva de costo de la tube					
Coefficiente A	745				
Exponente a	1975				
Viscosidad dinámica	1,00E-03 kg/m.s				
<b>Turno 1</b>					
<b>ID Nudo</b>	<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Cota</b>	<b>Longitud</b>	<b>Pmin</b>
<b>[1]</b>	<b>[2]</b>	<b>[3]</b>	<b>[4]</b>	<b>[5]</b>	<b>[6]</b>
			489.00		
9022	0-9022	T1	440.05	875.00	
10	9022-10	T2	440.67	247.00	36.30
9801	10-9801	T3	443.30	108.69	
9	9801-9	T4	444.57	52.59	40.00
11	9022-11	T5	432.00	56.00	
12	11-12	T6	431.00	50.48	56.00
13	12-13	T7	439.00	187.90	38.00
9014	13-9014	T8	420.35	564.60	
9967	9014-9967	T9	420.22	25.96	
156	9967-156	T10	425.12	35.30	56.00
155	156-155	T11	419.00	212.84	
154	155-154	T12	422.00	282.15	59.00
1531	154-1531	T13	422.48	12.35	61.00
159	1531-159	T14	427.00	98.47	
160	159-160	T15	427.00	12.79	
14	9014-14	T16	420.35	58.00	
1502	14-1502	T17	419.95	16.38	64.10
1501	1502-1501	T18	420.00	568.00	65.00
16	1501-16	T19	406.00	277.00	
9963	16-9963	T20	404.01	98.64	
17	9963-17	T21	403.19	9.43	67.80
9015	17-9015	T22	402.18	25.95	
137	9015-137	T23	402.00	7.00	
1361	9015-1361	T24	402.34	7.00	61.70
9084	9963-9084	T25	406.42	192.12	
9085	9084-9085	T26	406.43	6.19	
8	9085-8	T27	415.11	323.85	67.00
9966	9084-9966	T28	409.21	222.57	
18	9966-18	T29	410.00	19.13	
7	9966-7	T30	404.00	176.66	
6	7-6	T31	413.41	119.92	

---

9091	6-9091	T32	413.75	352.00	
9086	9091-9086	T33	413.00	105.42	
9087	9086-9087	T34	413.00	241.43	
5	9087-5	T35	424.04	279.18	
9970	9087-9970	T36	428.96	185.33	
4002	9970-4002	T37	435.00	1.00	
3	4002-3	T38	430.00	12.85	
2	9970-2	T39	435.00	18.31	
4001	9086-4001	T40	411.00	29.44	
1	4001-1	T41	411.00	187.00	70.00
1581	9967-1581	T42	421.22	206.91	54.80
157	1581-157	T43	417.00	47.31	
9960	157-9960	T44	410.66	392.69	
140	9960-140	T45	410.00	213.10	
9965	140-9965	T46	409.86	1.00	
1582	9965-1582	T47	412.17	17.91	
1391	140-1391	T48	410.66	45.11	
9959	9960-9959	T49	413.26	13.42	
143	9959-143	T50	407.00	312.22	
1441	143-1441	T51	414.05	359.75	58.90
146	1441-146	T52	416.00	220.08	
1532	146-1532	T53	420.39	272.86	
152	1532-152	T54	421.00	15.80	57.00
151	152-151	T55	426.00	248.82	53.00
147	151-147	T56	436.00	209.44	
150	147-150	T57	435.00	25.87	
9958	9959-9958	T58	413.26	1.00	
142	9958-142	T59	405.00	180.19	62.00
141	142-141	T60	403.00	31.67	62.00
1442	142-1442	T61	399.15	223.24	
999	1442-999	T62	399.00	17.95	
1321	999-1321	T63	402.07	251.11	
145	1321-145	T64	402.00	19.01	
1322	1321-1322	T65	405.91	77.48	
1311	1322-1311	T66	414.00	171.45	
1312	1311-1312	T67	428.48	250.72	
148	1312-148	T68	440.00	208.28	
130	148-130	T69	430.00	202.90	
9969	130-9969	T70	427.16	58.27	
1281	9969-1281	T71	422.88	40.49	56.10
1271	9969-1271	T72	425.98	79.85	
1272	1271-1272	T73	425.27	362.39	57.00
126	1272-126	T74	425.12	14.29	
149	126-149	T75	427.00	23.93	
123	126-123	T76	431.51	250.89	

---

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

---

1091	123-1091	T77	434.69	321.39	
1092	1091-1092	T78	424.35	185.59	48.00
9968	1092-9968	T79	423.22	24.29	
121	9968-121	T80	427.14	149.45	42.00
122	121-122	T81	434.09	105.63	
120	9968-120	T82	423.12	43.96	
110	120-110	T83	420.31	103.16	48.70
1041	1321-1041	T84	399.00	612.00	55.00
133	1041-133	T85	400.00	18.38	64.00
103	1041-103	T86	399.06	41.27	
134	103-134	T87	386.00	365.77	
1011	134-1011	T88	385.00	25.20	68.00
9945	1011-9945	T89	385.01	22.05	
9955	9945-9955	T90	385.01	1.00	
135	9955-135	T91	387.00	182.23	60.00
100	9945-100	T92	384.06	116.76	56.90
9947	9955-9947	T93	386.99	126.83	
1382	9947-1382	T94	388.43	128.69	
1392	1382-1392	T95	388.64	10.74	80.40
99	9947-99	T96	385.03	284.97	
1381	99-1381	T97	389.19	25.87	67.80
9946	99-9946	T98	385.59	44.68	
95	9946-95	T99	384.00	77.24	
98	9946-98	T100	385.88	28.41	
96	98-96	T101	389.00	237.65	
97	96-97	T102	390.16	21.18	58.80
1362	97-1362	T103	390.10	57.37	
1042	1041-1042	T104	397.07	216.54	56.90
1051	1042-1051	T105	399.14	446.56	
9964	1051-9964	T106	397.94	49.35	
129	9964-129	T107	399.00	20.39	
106	9964-106	T108	397.23	315.84	
107	106-107	T109	398.16	49.78	65.80
9957	107-9957	T110	399.87	112.72	
1282	9957-1282	T111	399.39	23.88	
1081	9957-1081	T112	423.00	511.92	
125	1081-125	T113	423.68	18.72	53.30
124	125-124	T114	425.88	188.42	50.00
1052	1042-1052	T115	384.03	658.06	71.00
87	1052-87	T116	383.02	315.37	
9953	87-9953	T117	379.71	139.13	
1082	9953-1082	T118	380.00	19.27	
86	9953-86	T119	380.00	163.75	
112	86-112	T120	390.00	233.69	
111	112-111	T121	387.21	158.52	

---

83	111-83	T122	387.79	22.74	
113	111-113	T123	396.06	180.39	
114	113-114	T124	395.14	281.90	
801	114-801	T125	395.00	19.11	
998	801-998	T126	388.00	161.81	
802	998-802	T127	382.00	250.04	
781	802-781	T128	383.00	15.26	75.00
79	998-79	T129	388.57	35.79	60.40
1191	79-1191	T130	387.24	24.18	86.00
997	1191-997	T131	392.18	210.77	
1161	997-1161	T132	393.04	21.16	
115	1161-115	T133	401.46	246.79	
118	997-118	T134	398.17	241.42	
9962	118-9962	T135	404.89	290.34	
1171	9962-1171	T136	405.04	21.28	
1162	1171-1162	T137	405.27	14.16	68.70
1172	1171-1172	T138	405.04	6.23	
1192	9962-1192	T139	401.20	98.14	67.80
1621	79-1621	T140	397.00	274.10	77.00
882	1052-882	T141	384.00	22.40	60.00
89	882-89	T142	383.15	19.01	
92	89-92	T143	372.40	731.21	
993	92-993	T144	373.02	128.86	
102	993-102	T145	377.00	36.48	
9923	993-9923	T146	375.38	288.58	
94	9923-94	T147	376.00	27.18	
1012	9923-1012	T148	377.00	131.17	76.00
9088	882-9088	T149	377.33	500.92	
901	9088-901	T150	378.00	70.00	
9924	901-9924	T151	378.41	1.00	
91	9924-91	T152	366.30	399.35	
9944	91-9944	T153	372.67	383.73	
222	9944-222	T154	374.55	71.70	
41	222-41	T155	411.00	68.11	
93	9944-93	T156	374.23	148.62	
9930	93-9930	T157	376.60	94.57	
221	9930-221	T158	383.82	26.31	
9950	9930-9950	T159	376.77	160.70	
9952	9950-9952	T160	376.77	1.00	
9951	9952-9951	T161	376.63	10.71	
211	9951-211	T162	383.00	35.43	
201	9951-201	T163	380.23	155.92	
202	201-202	T164	380.20	7.94	73.80
9089	9088-9089	T165	370.95	515.78	
9939	9089-9939	T166	371.70	81.04	

---

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

9940	9939-9940	T167	371.70	1.00	
372	9940-372	T168	368.00	20.05	
42	9939-42	T169	365.90	72.43	
371	42-371	T170	364.00	19.72	
441	9089-441	T171	370.06	97.17	
9929	441-9929	T172	373.49	47.75	
9938	9929-9938	T173	373.49	1.00	
381	9938-381	T174	372.32	19.66	
40	9929-40	T175	367.90	258.01	
9090	9089-9090	T176	358.35	609.96	
242	9090-242	T177	363.33	356.00	
9925	242-9925	T178	369.07	154.34	
29	9925-29	T179	371.84	26.98	63.20
23	9925-23	T180	376.28	163.86	64.70
30	23-30	T181	375.84	17.45	
282	23-282	T182	389.00	229.92	
281	282-281	T183	389.12	8.01	
272	281-272	T184	388.09	50.10	52.90
271	272-271	T185	383.69	124.18	
212	271-212	T186	379.00	18.44	
261	271-261	T187	381.20	67.46	
9988	261-9988	T188	382.83	73.86	
262	9988-262	T189	385.20	107.08	
19	262-19	T190	385.76	17.96	
25	262-25	T191	388.80	75.66	58.20
241	9090-241	T192	354.81	149.48	
9920	241-9920	T193	354.00	72.83	
32	9920-32	T194	352.00	227.14	
31	32-31	T195	368.10	219.24	
33	32-33	T196	349.79	203.55	
382	9920-382	T197	353.13	129.27	
351	382-351	T198	353.27	19.83	58.70
352	351-352	T199	350.90	311.93	
391	352-391	T200	351.56	20.25	
362	352-362	T201	345.09	261.91	
9921	362-9921	T202	351.27	7.15	
392	9921-392	T203	351.49	20.31	
9918	9921-9918	T204	348.00	187.20	
361	9918-361	T205	350.90	164.20	54.10
9919	361-9919	T206	342.13	341.13	
34	9919-34	T207	342.28	14.16	
521	9919-521	T208	343.00	28.22	
522	521-522	T209	343.02	7.31	
9922	9918-9922	T210	347.96	86.79	
49	9922-49	T211	347.96	20.23	62.00



---

50	9922-50	T212	349.77	61.16	
9912	50-9912	T213	360.92	319.83	
51	9912-51	T214	362.03	17.46	64.00
9913	9912-9913	T215	359.01	71.41	
55	9913-55	T216	356.38	101.35	
9914	55-9914	T217	353.64	182.52	
56	9914-56	T218	355.36	181.81	
541	9913-541	T219	355.06	185.10	
542	541-542	T220	345.48	615.08	
53	542-53	T221	348.01	23.55	
902	9088-902	T222	377.00	120.00	
43	902-43	T223	375.44	24.06	
45	43-45	T224	373.33	106.18	
9943	45-9943	T225	371.22	58.63	
881	9943-881	T226	370.00	33.10	
9934	9943-9934	T227	368.05	174.35	
442	9934-442	T228	365.45	164.01	
46	9934-46	T229	369.61	39.63	57.40
47	46-47	T230	369.85	85.25	
9937	47-9937	T231	369.53	26.46	
85	9937-85	T232	372.26	223.19	
84	85-84	T233	379.47	237.08	57.50
9928	84-9928	T234	373.13	418.09	
761	9928-761	T235	373.00	1.00	
82	761-82	T236	373.00	24.07	
81	82-81	T237	374.01	45.22	
751	761-751	T238	378.00	147.31	67.00
782	751-782	T239	384.00	350.06	
752	782-752	T240	384.00	21.02	
1622	782-1622	T241	398.00	321.16	
73	1622-73	T242	404.11	123.57	70.00
48	9937-48	T243	368.81	101.70	
77	48-77	T244	369.67	34.79	
762	77-762	T245	362.00	340.83	
9932	762-9932	T246	367.81	203.23	
741	9932-741	T247	368.00	1.00	69.00
9933	741-9933	T248	373.31	129.47	
991	9933-991	T249	373.28	13.53	
742	991-742	T250	373.00	1.00	
9927	742-9927	T251	374.83	84.12	
721	9927-721	T252	375.00	1.00	79.00
722	721-722	T253	386.00	299.84	68.00
71	9933-71	T254	361.00	336.37	58.00
9911	71-9911	T255	357.84	293.48	
70	9911-70	T256	361.00	17.83	51.00

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

9021	9911-9021	T257	352.29	347.00	
62	9021-62	T258	352.29	48.70	
61	62-61	T259	351.96	7.97	55.00
9915	9021-9915	T260	358.23	98.50	
63	9915-63	T261	358.10	9.51	65.90
592	9915-592	T262	356.12	82.02	
9916	592-9916	T263	355.00	38.72	
60	9916-60	T264	351.49	97.20	
591	9916-591	T265	349.28	276.87	
9926	592-9926	T266	368.57	269.89	
64	9926-64	T267	366.16	627.24	
58	64-58	T268	349.02	368.58	
57	58-57	T269	349.36	23.61	55.00
65	9926-65	T270	376.31	208.34	
994	65-994	T271	393.25	500.84	
995	994-995	T272	399.09	251.39	
682	995-682	T273	389.00	17.27	82.00
69	995-69	T274	400.34	80.20	72.00
9954	994-9954	T275	389.22	74.42	
681	9954-681	T276	389.07	21.49	
66	9954-66	T277	385.94	454.22	
161	66-161	T278	384.00	20.81	
67	161-67	T279	378.00	74.78	

<b>Turno 2</b>					
<b>ID Nudo</b>	<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Cota [m]</b>	<b>Longitud [m]</b>	<b>Pmin [mca]</b>
<b>[1]</b>	<b>[2]</b>	<b>[3]</b>	<b>[4]</b>	<b>[5]</b>	<b>[6]</b>
			489.00		
9022	0-9022	T1	440.05	875.00	
10	9022-10	T2	440.67	247.00	
9801	10-9801	T3	443.30	108.69	
9	9801-9	T4	444.57	52.59	
11	9022-11	T5	432.00	56.00	
12	11-12	T6	431.00	50.48	
13	12-13	T7	439.00	187.90	
9014	13-9014	T8	420.35	564.60	
9967	9014-9967	T9	420.22	25.96	
156	9967-156	T10	425.12	35.30	
155	156-155	T11	419.00	212.84	
154	155-154	T12	422.00	282.15	
1531	154-1531	T13	422.48	12.35	
159	1531-159	T14	427.00	98.47	
160	159-160	T15	427.00	12.79	
14	9014-14	T16	420.35	58.00	
1502	14-1502	T17	419.95	16.38	

---

1501	1502-1501	T18	420.00	568.00	
16	1501-16	T19	406.00	277.00	74.00
9963	16-9963	T20	404.01	98.64	
17	9963-17	T21	403.19	9.43	
9015	17-9015	T22	402.18	25.95	
137	9015-137	T23	402.00	7.00	63.00
1361	9015-1361	T24	402.34	7.00	
9084	9963-9084	T25	406.42	192.12	
9085	9084-9085	T26	406.43	6.19	
8	9085-8	T27	415.11	323.85	
9966	9084-9966	T28	409.21	222.57	
18	9966-18	T29	410.00	19.13	
7	9966-7	T30	404.00	176.66	
6	7-6	T31	413.41	119.92	66.60
9091	6-9091	T32	413.75	352.00	
9086	9091-9086	T33	413.00	105.42	
9087	9086-9087	T34	413.00	241.43	
5	9087-5	T35	424.04	279.18	50.00
9970	9087-9970	T36	428.96	185.33	
4002	9970-4002	T37	435.00	1.00	
3	4002-3	T38	430.00	12.85	49.00
2	9970-2	T39	435.00	18.31	
4001	9086-4001	T40	411.00	29.44	
1	4001-1	T41	411.00	187.00	
1581	9967-1581	T42	421.22	206.91	
157	1581-157	T43	417.00	47.31	55.00
9960	157-9960	T44	410.66	392.69	
140	9960-140	T45	410.00	213.10	53.00
9965	140-9965	T46	409.86	1.00	
1582	9965-1582	T47	412.17	17.91	
1391	140-1391	T48	410.66	45.11	
9959	9960-9959	T49	413.26	13.42	
143	9959-143	T50	407.00	312.22	
1441	143-1441	T51	414.05	359.75	
146	1441-146	T52	416.00	220.08	
1532	146-1532	T53	420.39	272.86	59.00
152	1532-152	T54	421.00	15.80	
151	152-151	T55	426.00	248.82	
147	151-147	T56	436.00	209.44	
150	147-150	T57	435.00	25.87	
9958	9959-9958	T58	413.26	1.00	
142	9958-142	T59	405.00	180.19	
141	142-141	T60	403.00	31.67	
1442	142-1442	T61	399.15	223.24	
999	1442-999	T62	399.00	17.95	

---

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

1321	999-1321	T63	402.07	251.11	67.90
145	1321-145	T64	402.00	19.01	
1322	1321-1322	T65	405.91	77.48	
1311	1322-1311	T66	414.00	171.45	68.00
1312	1311-1312	T67	428.48	250.72	
148	1312-148	T68	440.00	208.28	40.00
130	148-130	T69	430.00	202.90	48.90
9969	130-9969	T70	427.16	58.27	
1281	9969-1281	T71	422.88	40.49	
1271	9969-1271	T72	425.98	79.85	
1272	1271-1272	T73	425.27	362.39	
126	1272-126	T74	425.12	14.29	
149	126-149	T75	427.00	23.93	52.00
123	126-123	T76	431.51	250.89	
1091	123-1091	T77	434.69	321.39	
1092	1091-1092	T78	424.35	185.59	
9968	1092-9968	T79	423.22	24.29	
121	9968-121	T80	427.14	149.45	
122	121-122	T81	434.09	105.63	
120	9968-120	T82	423.12	43.96	45.90
110	120-110	T83	420.31	103.16	
1041	1321-1041	T84	399.00	612.00	
133	1041-133	T85	400.00	18.38	
103	1041-103	T86	399.06	41.27	54.90
134	103-134	T87	386.00	365.77	
1011	134-1011	T88	385.00	25.20	
9945	1011-9945	T89	385.01	22.05	
9955	9945-9955	T90	385.01	1.00	
135	9955-135	T91	387.00	182.23	
100	9945-100	T92	384.06	116.76	
9947	9955-9947	T93	386.99	126.83	
1382	9947-1382	T94	388.43	128.69	
1392	1382-1392	T95	388.64	10.74	
99	9947-99	T96	385.03	284.97	54.00
1381	99-1381	T97	389.19	25.87	
9946	99-9946	T98	385.59	44.68	
95	9946-95	T99	384.00	77.24	
98	9946-98	T100	385.88	28.41	
96	98-96	T101	389.00	237.65	64.00
97	96-97	T102	390.16	21.18	
1362	97-1362	T103	390.10	57.37	73.90
1042	1041-1042	T104	397.07	216.54	
1051	1042-1051	T105	399.14	446.56	55.90
9964	1051-9964	T106	397.94	49.35	
129	9964-129	T107	399.00	20.39	64.00

---

106	9964-106	T108	397.23	315.84	
107	106-107	T109	398.16	49.78	
9957	107-9957	T110	399.87	112.72	
1282	9957-1282	T111	399.39	23.88	77.00
1081	9957-1081	T112	423.00	511.92	
125	1081-125	T113	423.68	18.72	
124	125-124	T114	425.88	188.42	
1052	1042-1052	T115	384.03	658.06	
87	1052-87	T116	383.02	315.37	
9953	87-9953	T117	379.71	139.13	
1082	9953-1082	T118	380.00	19.27	
86	9953-86	T119	380.00	163.75	55.00
112	86-112	T120	390.00	233.69	
111	112-111	T121	387.21	158.52	
83	111-83	T122	387.79	22.74	67.20
113	111-113	T123	396.06	180.39	
114	113-114	T124	395.14	281.90	69.90
801	114-801	T125	395.00	19.11	58.00
998	801-998	T126	388.00	161.81	
802	998-802	T127	382.00	250.04	
781	802-781	T128	383.00	15.26	
79	998-79	T129	388.57	35.79	
1191	79-1191	T130	387.24	24.18	
997	1191-997	T131	392.18	210.77	
1161	997-1161	T132	393.04	21.16	
115	1161-115	T133	401.46	246.79	70.00
118	997-118	T134	398.17	241.42	
9962	118-9962	T135	404.89	290.34	
1171	9962-1171	T136	405.04	21.28	
1162	1171-1162	T137	405.27	14.16	
1172	1171-1172	T138	405.04	6.23	68.00
1192	9962-1192	T139	401.20	98.14	
1621	79-1621	T140	397.00	274.10	
882	1052-882	T141	384.00	22.40	
89	882-89	T142	383.15	19.01	
92	89-92	T143	372.40	731.21	56.60
993	92-993	T144	373.02	128.86	
102	993-102	T145	377.00	36.48	68.00
9923	993-9923	T146	375.38	288.58	
94	9923-94	T147	376.00	27.18	
1012	9923-1012	T148	377.00	131.17	
9088	882-9088	T149	377.33	500.92	
901	9088-901	T150	378.00	70.00	65.00
9924	901-9924	T151	378.41	1.00	
91	9924-91	T152	366.30	399.35	

---

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

9944	91-9944	T153	372.67	383.73	
222	9944-222	T154	374.55	71.70	71.40
41	222-41	T155	411.00	68.11	60.00
93	9944-93	T156	374.23	148.62	55.80
9930	93-9930	T157	376.60	94.57	
221	9930-221	T158	383.82	26.31	62.20
9950	9930-9950	T159	376.77	160.70	
9952	9950-9952	T160	376.77	1.00	
9951	9952-9951	T161	376.63	10.71	
211	9951-211	T162	383.00	35.43	
201	9951-201	T163	380.23	155.92	
202	201-202	T164	380.20	7.94	
9089	9088-9089	T165	370.95	515.78	
9939	9089-9939	T166	371.70	81.04	
9940	9939-9940	T167	371.70	1.00	
372	9940-372	T168	368.00	20.05	55.00
42	9939-42	T169	365.90	72.43	
371	42-371	T170	364.00	19.72	59.00
441	9089-441	T171	370.06	97.17	
9929	441-9929	T172	373.49	47.75	
9938	9929-9938	T173	373.49	1.00	
381	9938-381	T174	372.32	19.66	60.70
40	9929-40	T175	367.90	258.01	
9090	9089-9090	T176	358.35	609.96	
242	9090-242	T177	363.33	356.00	64.70
9925	242-9925	T178	369.07	154.34	
29	9925-29	T179	371.84	26.98	
23	9925-23	T180	376.28	163.86	
30	23-30	T181	375.84	17.45	60.20
282	23-282	T182	389.00	229.92	55.00
281	282-281	T183	389.12	8.01	54.90
272	281-272	T184	388.09	50.10	
271	272-271	T185	383.69	124.18	57.30
212	271-212	T186	379.00	18.44	
261	271-261	T187	381.20	67.46	
9988	261-9988	T188	382.83	73.86	
262	9988-262	T189	385.20	107.08	
19	262-19	T190	385.76	17.96	66.20
25	262-25	T191	388.80	75.66	
241	9090-241	T192	354.81	149.48	73.20
9920	241-9920	T193	354.00	72.83	
32	9920-32	T194	352.00	227.14	
31	32-31	T195	368.10	219.24	52.90
33	32-33	T196	349.79	203.55	
382	9920-382	T197	353.13	129.27	79.90

---

351	382-351	T198	353.27	19.83	
352	351-352	T199	350.90	311.93	
391	352-391	T200	351.56	20.25	73.40
362	352-362	T201	345.09	261.91	
9921	362-9921	T202	351.27	7.15	
392	9921-392	T203	351.49	20.31	
9918	9921-9918	T204	348.00	187.20	
361	9918-361	T205	350.90	164.20	
9919	361-9919	T206	342.13	341.13	
34	9919-34	T207	342.28	14.16	
521	9919-521	T208	343.00	28.22	
522	521-522	T209	343.02	7.31	
9922	9918-9922	T210	347.96	86.79	
49	9922-49	T211	347.96	20.23	
50	9922-50	T212	349.77	61.16	62.20
9912	50-9912	T213	360.92	319.83	
51	9912-51	T214	362.03	17.46	
9913	9912-9913	T215	359.01	71.41	
55	9913-55	T216	356.38	101.35	54.60
9914	55-9914	T217	353.64	182.52	
56	9914-56	T218	355.36	181.81	61.60
541	9913-541	T219	355.06	185.10	
542	541-542	T220	345.48	615.08	
53	542-53	T221	348.01	23.55	62.00
902	9088-902	T222	377.00	120.00	
43	902-43	T223	375.44	24.06	65.60
45	43-45	T224	373.33	106.18	54.70
9943	45-9943	T225	371.22	58.63	
881	9943-881	T226	370.00	33.10	74.00
9934	9943-9934	T227	368.05	174.35	
442	9934-442	T228	365.45	164.01	
46	9934-46	T229	369.61	39.63	
47	46-47	T230	369.85	85.25	
9937	47-9937	T231	369.53	26.46	
85	9937-85	T232	372.26	223.19	
84	85-84	T233	379.47	237.08	
9928	84-9928	T234	373.13	418.09	
761	9928-761	T235	373.00	1.00	60.00
82	761-82	T236	373.00	24.07	
81	82-81	T237	374.01	45.22	60.00
751	761-751	T238	378.00	147.31	
782	751-782	T239	384.00	350.06	
752	782-752	T240	384.00	21.02	
1622	782-1622	T241	398.00	321.16	77.00
73	1622-73	T242	404.11	123.57	

---

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

48	9937-48	T243	368.81	101.70	
77	48-77	T244	369.67	34.79	64.30
762	77-762	T245	362.00	340.83	
9932	762-9932	T246	367.81	203.23	
741	9932-741	T247	368.00	1.00	
9933	741-9933	T248	373.31	129.47	
991	9933-991	T249	373.28	13.53	
742	991-742	T250	373.00	1.00	64.00
9927	742-9927	T251	374.83	84.12	
721	9927-721	T252	375.00	1.00	
722	721-722	T253	386.00	299.84	
71	9933-71	T254	361.00	336.37	
9911	71-9911	T255	357.84	293.48	
70	9911-70	T256	361.00	17.83	
9021	9911-9021	T257	352.29	347.00	
62	9021-62	T258	352.29	48.70	
61	62-61	T259	351.96	7.97	
9915	9021-9915	T260	358.23	98.50	
63	9915-63	T261	358.10	9.51	
592	9915-592	T262	356.12	82.02	
9916	592-9916	T263	355.00	38.72	
60	9916-60	T264	351.49	97.20	
591	9916-591	T265	349.28	276.87	
9926	592-9926	T266	368.57	269.89	
64	9926-64	T267	366.16	627.24	69.80
58	64-58	T268	349.02	368.58	65.00
57	58-57	T269	349.36	23.61	
65	9926-65	T270	376.31	208.34	
994	65-994	T271	393.25	500.84	
995	994-995	T272	399.09	251.39	
682	995-682	T273	389.00	17.27	
69	995-69	T274	400.34	80.20	
9954	994-9954	T275	389.22	74.42	
681	9954-681	T276	389.07	21.49	82.00
66	9954-66	T277	385.94	454.22	64.10
161	66-161	T278	384.00	20.81	
67	161-67	T279	378.00	74.78	70.00

<b>Turno 3</b>					
<b>ID Nudo</b>	<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Cota</b>	<b>Longitud</b>	<b>Pmin</b>
<b>[1]</b>	<b>[2]</b>	<b>[3]</b>	<b>[m]</b>	<b>[m]</b>	<b>[mca]</b>
			<b>[4]</b>	<b>[5]</b>	<b>[6]</b>
			489.00		
9022	0-9022	T1	440.05	875.00	
10	9022-10	T2	440.67	247.00	
9801	10-9801	T3	443.30	108.69	



---

9	9801-9	T4	444.57	52.59	
11	9022-11	T5	432.00	56.00	55.00
12	11-12	T6	431.00	50.48	
13	12-13	T7	439.00	187.90	
9014	13-9014	T8	420.35	564.60	
9967	9014-9967	T9	420.22	25.96	
156	9967-156	T10	425.12	35.30	
155	156-155	T11	419.00	212.84	54.00
154	155-154	T12	422.00	282.15	
1531	154-1531	T13	422.48	12.35	
159	1531-159	T14	427.00	98.47	45.00
160	159-160	T15	427.00	12.79	57.00
14	9014-14	T16	420.35	58.00	63.60
1502	14-1502	T17	419.95	16.38	
1501	1502-1501	T18	420.00	568.00	
16	1501-16	T19	406.00	277.00	
9963	16-9963	T20	404.01	98.64	
17	9963-17	T21	403.19	9.43	
9015	17-9015	T22	402.18	25.95	
137	9015-137	T23	402.00	7.00	
1361	9015-1361	T24	402.34	7.00	
9084	9963-9084	T25	406.42	192.12	
9085	9084-9085	T26	406.43	6.19	
8	9085-8	T27	415.11	323.85	
9966	9084-9966	T28	409.21	222.57	
18	9966-18	T29	410.00	19.13	55.00
7	9966-7	T30	404.00	176.66	76.00
6	7-6	T31	413.41	119.92	
9091	6-9091	T32	413.75	352.00	
9086	9091-9086	T33	413.00	105.42	
9087	9086-9087	T34	413.00	241.43	
5	9087-5	T35	424.04	279.18	
9970	9087-9970	T36	428.96	185.33	
4002	9970-4002	T37	435.00	1.00	42.00
3	4002-3	T38	430.00	12.85	
2	9970-2	T39	435.00	18.31	38.00
4001	9086-4001	T40	411.00	29.44	70.00
1	4001-1	T41	411.00	187.00	
1581	9967-1581	T42	421.22	206.91	
157	1581-157	T43	417.00	47.31	
9960	157-9960	T44	410.66	392.69	
140	9960-140	T45	410.00	213.10	
9965	140-9965	T46	409.86	1.00	
1582	9965-1582	T47	412.17	17.91	63.80
1391	140-1391	T48	410.66	45.11	58.30

---

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

9959	9960-9959	T49	413.26	13.42	
143	9959-143	T50	407.00	312.22	58.00
1441	143-1441	T51	414.05	359.75	
146	1441-146	T52	416.00	220.08	56.00
1532	146-1532	T53	420.39	272.86	
152	1532-152	T54	421.00	15.80	
151	152-151	T55	426.00	248.82	
147	151-147	T56	436.00	209.44	42.00
150	147-150	T57	435.00	25.87	40.00
9958	9959-9958	T58	413.26	1.00	
142	9958-142	T59	405.00	180.19	
141	142-141	T60	403.00	31.67	
1442	142-1442	T61	399.15	223.24	73.90
999	1442-999	T62	399.00	17.95	
1321	999-1321	T63	402.07	251.11	
145	1321-145	T64	402.00	19.01	73.00
1322	1321-1322	T65	405.91	77.48	64.10
1311	1322-1311	T66	414.00	171.45	
1312	1311-1312	T67	428.48	250.72	53.00
148	1312-148	T68	440.00	208.28	
130	148-130	T69	430.00	202.90	
9969	130-9969	T70	427.16	58.27	
1281	9969-1281	T71	422.88	40.49	
1271	9969-1271	T72	425.98	79.85	55.00
1272	1271-1272	T73	425.27	362.39	
126	1272-126	T74	425.12	14.29	54.90
149	126-149	T75	427.00	23.93	
123	126-123	T76	431.51	250.89	46.00
1091	123-1091	T77	434.69	321.39	39.00
1092	1091-1092	T78	424.35	185.59	
9968	1092-9968	T79	423.22	24.29	
121	9968-121	T80	427.14	149.45	
122	121-122	T81	434.09	105.63	34.90
120	9968-120	T82	423.12	43.96	
110	120-110	T83	420.31	103.16	
1041	1321-1041	T84	399.00	612.00	
133	1041-133	T85	400.00	18.38	
103	1041-103	T86	399.06	41.27	
134	103-134	T87	386.00	365.77	65.00
1011	134-1011	T88	385.00	25.20	
9945	1011-9945	T89	385.01	22.05	
9955	9945-9955	T90	385.01	1.00	
135	9955-135	T91	387.00	182.23	
100	9945-100	T92	384.06	116.76	
9947	9955-9947	T93	386.99	126.83	

---

1382	9947-1382	T94	388.43	128.69	68.60
1392	1382-1392	T95	388.64	10.74	
99	9947-99	T96	385.03	284.97	
1381	99-1381	T97	389.19	25.87	
9946	99-9946	T98	385.59	44.68	
95	9946-95	T99	384.00	77.24	59.00
98	9946-98	T100	385.88	28.41	56.10
96	98-96	T101	389.00	237.65	
97	96-97	T102	390.16	21.18	
1362	97-1362	T103	390.10	57.37	
1042	1041-1042	T104	397.07	216.54	
1051	1042-1051	T105	399.14	446.56	
9964	1051-9964	T106	397.94	49.35	
129	9964-129	T107	399.00	20.39	
106	9964-106	T108	397.23	315.84	55.80
107	106-107	T109	398.16	49.78	
9957	107-9957	T110	399.87	112.72	
1282	9957-1282	T111	399.39	23.88	
1081	9957-1081	T112	423.00	511.92	54.00
125	1081-125	T113	423.68	18.72	
124	125-124	T114	425.88	188.42	
1052	1042-1052	T115	384.03	658.06	
87	1052-87	T116	383.02	315.37	56.00
9953	87-9953	T117	379.71	139.13	
1082	9953-1082	T118	380.00	19.27	97.00
86	9953-86	T119	380.00	163.75	
112	86-112	T120	390.00	233.69	76.00
111	112-111	T121	387.21	158.52	66.80
83	111-83	T122	387.79	22.74	
113	111-113	T123	396.06	180.39	76.90
114	113-114	T124	395.14	281.90	
801	114-801	T125	395.00	19.11	
998	801-998	T126	388.00	161.81	
802	998-802	T127	382.00	250.04	71.00
781	802-781	T128	383.00	15.26	
79	998-79	T129	388.57	35.79	
1191	79-1191	T130	387.24	24.18	
997	1191-997	T131	392.18	210.77	
1161	997-1161	T132	393.04	21.16	80.00
115	1161-115	T133	401.46	246.79	
118	997-118	T134	398.17	241.42	59.80
9962	118-9962	T135	404.89	290.34	
1171	9962-1171	T136	405.04	21.28	68.00
1162	1171-1162	T137	405.27	14.16	
1172	1171-1172	T138	405.04	6.23	

---

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

1192	9962-1192	T139	401.20	98.14	
1621	79-1621	T140	397.00	274.10	
882	1052-882	T141	384.00	22.40	
89	882-89	T142	383.15	19.01	56.90
92	89-92	T143	372.40	731.21	
993	92-993	T144	373.02	128.86	
102	993-102	T145	377.00	36.48	
9923	993-9923	T146	375.38	288.58	
94	9923-94	T147	376.00	27.18	58.00
1012	9923-1012	T148	377.00	131.17	
9088	882-9088	T149	377.33	500.92	
901	9088-901	T150	378.00	70.00	
9924	901-9924	T151	378.41	1.00	
91	9924-91	T152	366.30	399.35	60.70
9944	91-9944	T153	372.67	383.73	
222	9944-222	T154	374.55	71.70	
41	222-41	T155	411.00	68.11	
93	9944-93	T156	374.23	148.62	
9930	93-9930	T157	376.60	94.57	
221	9930-221	T158	383.82	26.31	
9950	9930-9950	T159	376.77	160.70	
9952	9950-9952	T160	376.77	1.00	
9951	9952-9951	T161	376.63	10.71	
211	9951-211	T162	383.00	35.43	71.00
201	9951-201	T163	380.23	155.92	73.80
202	201-202	T164	380.20	7.94	
9089	9088-9089	T165	370.95	515.78	
9939	9089-9939	T166	371.70	81.04	
9940	9939-9940	T167	371.70	1.00	
372	9940-372	T168	368.00	20.05	
42	9939-42	T169	365.90	72.43	60.10
371	42-371	T170	364.00	19.72	
441	9089-441	T171	370.06	97.17	70.90
9929	441-9929	T172	373.49	47.75	
9938	9929-9938	T173	373.49	1.00	
381	9938-381	T174	372.32	19.66	
40	9929-40	T175	367.90	258.01	56.10
9090	9089-9090	T176	358.35	609.96	
242	9090-242	T177	363.33	356.00	
9925	242-9925	T178	369.07	154.34	
29	9925-29	T179	371.84	26.98	
23	9925-23	T180	376.28	163.86	
30	23-30	T181	375.84	17.45	
282	23-282	T182	389.00	229.92	
281	282-281	T183	389.12	8.01	

---

272	281-272	T184	388.09	50.10	
271	272-271	T185	383.69	124.18	
212	271-212	T186	379.00	18.44	75.00
261	271-261	T187	381.20	67.46	57.80
9988	261-9988	T188	382.83	73.86	
262	9988-262	T189	385.20	107.08	53.80
19	262-19	T190	385.76	17.96	
25	262-25	T191	388.80	75.66	
241	9090-241	T192	354.81	149.48	
9920	241-9920	T193	354.00	72.83	
32	9920-32	T194	352.00	227.14	71.00
31	32-31	T195	368.10	219.24	
33	32-33	T196	349.79	203.55	60.20
382	9920-382	T197	353.13	129.27	
351	382-351	T198	353.27	19.83	
352	351-352	T199	350.90	311.93	61.10
391	352-391	T200	351.56	20.25	
362	352-362	T201	345.09	261.91	59.90
9921	362-9921	T202	351.27	7.15	
392	9921-392	T203	351.49	20.31	73.50
9918	9921-9918	T204	348.00	187.20	
361	9918-361	T205	350.90	164.20	
9919	361-9919	T206	342.13	341.13	
34	9919-34	T207	342.28	14.16	66.70
521	9919-521	T208	343.00	28.22	71.00
522	521-522	T209	343.02	7.31	71.00
9922	9918-9922	T210	347.96	86.79	
49	9922-49	T211	347.96	20.23	
50	9922-50	T212	349.77	61.16	
9912	50-9912	T213	360.92	319.83	
51	9912-51	T214	362.03	17.46	
9913	9912-9913	T215	359.01	71.41	
55	9913-55	T216	356.38	101.35	
9914	55-9914	T217	353.64	182.52	
56	9914-56	T218	355.36	181.81	
541	9913-541	T219	355.06	185.10	55.90
542	541-542	T220	345.48	615.08	65.50
53	542-53	T221	348.01	23.55	
902	9088-902	T222	377.00	120.00	66.00
43	902-43	T223	375.44	24.06	
45	43-45	T224	373.33	106.18	
9943	45-9943	T225	371.22	58.63	
881	9943-881	T226	370.00	33.10	
9934	9943-9934	T227	368.05	174.35	
442	9934-442	T228	365.45	164.01	75.60

---

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

---

46	9934-46	T229	369.61	39.63	
47	46-47	T230	369.85	85.25	58.20
9937	47-9937	T231	369.53	26.46	
85	9937-85	T232	372.26	223.19	69.70
84	85-84	T233	379.47	237.08	
9928	84-9928	T234	373.13	418.09	
761	9928-761	T235	373.00	1.00	
82	761-82	T236	373.00	24.07	68.00
81	82-81	T237	374.01	45.22	
751	761-751	T238	378.00	147.31	
782	751-782	T239	384.00	350.06	74.00
752	782-752	T240	384.00	21.02	61.00
1622	782-1622	T241	398.00	321.16	
73	1622-73	T242	404.11	123.57	
48	9937-48	T243	368.81	101.70	53.20
77	48-77	T244	369.67	34.79	
762	77-762	T245	362.00	340.83	71.00
9932	762-9932	T246	367.81	203.23	
741	9932-741	T247	368.00	1.00	
9933	741-9933	T248	373.31	129.47	
991	9933-991	T249	373.28	13.53	
742	991-742	T250	373.00	1.00	
9927	742-9927	T251	374.83	84.12	
721	9927-721	T252	375.00	1.00	
722	721-722	T253	386.00	299.84	
71	9933-71	T254	361.00	336.37	
9911	71-9911	T255	357.84	293.48	
70	9911-70	T256	361.00	17.83	
9021	9911-9021	T257	352.29	347.00	
62	9021-62	T258	352.29	48.70	60.70
61	62-61	T259	351.96	7.97	
9915	9021-9915	T260	358.23	98.50	
63	9915-63	T261	358.10	9.51	
592	9915-592	T262	356.12	82.02	59.90
9916	592-9916	T263	355.00	38.72	
60	9916-60	T264	351.49	97.20	53.50
591	9916-591	T265	349.28	276.87	66.70
9926	592-9926	T266	368.57	269.89	
64	9926-64	T267	366.16	627.24	
58	64-58	T268	349.02	368.58	
57	58-57	T269	349.36	23.61	
65	9926-65	T270	376.31	208.34	
994	65-994	T271	393.25	500.84	
995	994-995	T272	399.09	251.39	
682	995-682	T273	389.00	17.27	

69	995-69	T274	400.34	80.20	
9954	994-9954	T275	389.22	74.42	
681	9954-681	T276	389.07	21.49	
66	9954-66	T277	385.94	454.22	
161	66-161	T278	384.00	20.81	55.00
67	161-67	T279	378.00	74.78	

Tabla G.6. Celdas para configurar la PNL

											COSTO TOTAL \$ 4578108.8	
											Turno 1	
Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]		
			489.00									
9022	0-9022	T1	440.05	1206.50	875.00	938.22		623781.86	487.10	47.05		
10	9022-10	T2	440.67	22.40	247.00	151.77	36.30	5108.38	484.96	44.29		
9801	10-9801	T3	443.30	10.40	108.69	123.63		1508.88	484.34	41.04		
9	9801-9	T4	444.57	10.40	52.59	123.41	40.00	727.53	484.03	39.46		
11	9022-11	T5	432.00	1184.10	56.00	933.67		39546.51	486.98	54.98		
12	11-12	T6	431.00	1184.10	50.48	933.24	56.00	35617.81	486.87	55.87		
13	12-13	T7	439.00	1171.60	187.90	931.18	38.00	132006.50	486.47	47.47		
9014	13-9014	T8	420.35	1151.60	564.60	927.96		393990.76	485.28	64.93		
9967	9014-9967	T9	420.22	1062.00	25.96	883.09		16451.30	485.22	65.00		
156	9967-156	T10	425.12	72.00	35.30	247.72	56.00	1891.48	484.98	59.86		
155	156-155	T11	419.00	48.00	212.84	234.83		10280.97	484.10	65.10		
154	155-154	T12	422.00	48.00	282.15	225.50	59.00	12596.00	482.66	60.66		
1531	154-1531	T13	422.48	27.50	12.35	212.42	61.00	490.84	482.63	60.15		
159	1531-159	T14	427.00		98.47	201.94		3547.48	482.63	55.63		
160	159-160	T15	427.00		12.79	169.18		326.77	482.63	55.63		
14	9014-14	T16	420.35	89.60	58.00	359.24		6400.31	485.19	64.84		
1502	14-1502	T17	419.95	89.60	16.38	351.47	64.10	1732.15	485.16	65.21		
1501	1502-1501	T18	420.00	75.60	568.00	340.75	65.00	56562.94	484.27	64.27		
16	1501-16	T19	406.00	61.60	277.00	297.08		21130.59	483.69	77.69		
9963	16-9963	T20	404.01	61.60	98.64	296.94		7517.50	483.49	79.48		
17	9963-17	T21	403.19	30.00	9.43	195.96	67.80	320.55	483.45	80.26		
9015	17-9015	T22	402.18	13.00	25.95	56.90		79.74	472.84	70.66		
137	9015-137	T23	402.00		7.00	45.99		14.22	472.84	70.84		
1361	9015-1361	T24	402.34	13.00	7.00	251.42	61.70	386.08	472.84	70.50		
9084	9963-9084	T25	406.42	31.60	192.12	293.91		14353.55	483.36	76.94		
9085	9084-9085	T26	406.43	12.10	6.19	130.03		94.71	483.32	76.89		
8	9085-8	T27	415.11	12.10	323.85	127.67	67.00	4786.10	481.23	66.12		
9966	9084-9966	T28	409.21	19.50	222.57	292.79		16505.46	483.30	74.09		
18	9966-18	T29	410.00		19.13	221.44		824.42	483.30	73.30		
7	9966-7	T30	404.00	19.50	176.66	279.37		11958.61	483.24	79.24		
6	7-6	T31	413.41	19.50	119.92	254.79		6787.45	483.17	69.76		
9091	6-9091	T32	413.75	19.50	352.00	254.59		19892.61	482.98	69.23		
9086	9091-9086	T33	413.00	19.50	105.42	254.59		5957.81	482.93	69.93		
9087	9086-9087	T34	413.00		241.43	160.33		5554.59	482.93	69.93		
5	9087-5	T35	424.04		279.18	92.79		2219.15	482.93	58.89		
9970	9087-9970	T36	428.96		185.33	157.71		4129.71	482.93	53.97		
4002	9970-4002	T37	435.00		1.00	150.70		20.40	482.93	47.93		
3	4002-3	T38	430.00		12.85	66.39		53.30	482.93	52.93		
2	9970-2	T39	435.00		18.31	104.14		182.06	482.93	47.93		

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

4001	9086-4001	T40	411.00	19.50	29.44	192.40		965.36	482.86	71.86
1	4001-1	T41	411.00	19.50	187.00	128.26	70.00	2788.59	480.01	69.01
1581	9967-1581	T42	421.22	990.00	206.91	863.42	54.80	125511.48	484.75	63.53
157	1581-157	T43	417.00	967.00	47.31	858.99		28414.98	484.65	67.65
9960	157-9960	T44	410.66	967.00	392.69	858.60		235628.98	483.78	73.12
140	9960-140	T45	410.00		213.10	144.64		4013.44	483.78	73.78
9965	140-9965	T46	409.86		1.00	115.97		12.26	483.78	73.92
1582	9965-1582	T47	412.17		17.91	118.69		229.76	483.78	71.61
1391	140-1391	T48	410.66		45.11	81.71		280.08	483.78	73.12
9959	9960-9959	T49	413.26	967.00	13.42	857.10		8022.24	483.75	70.49
143	9959-143	T50	407.00	52.20	312.22	262.58		18737.19	482.87	75.87
1441	143-1441	T51	414.05	52.20	359.75	245.57	58.90	18954.73	481.47	67.42
146	1441-146	T52	416.00	31.70	220.08	245.55		11594.26	481.12	65.12
1532	146-1532	T53	420.39	31.70	272.86	215.94		11198.25	480.33	59.94
152	1532-152	T54	421.00	31.70	15.80	215.93	57.00	648.34	480.28	59.28
151	152-151	T55	426.00	12.70	248.82	215.94	53.00	10211.60	480.14	54.14
147	151-147	T56	436.00		209.44	215.66		8573.60	480.14	44.14
150	147-150	T57	435.00		25.87	70.06		119.09	480.14	45.14
9958	9959-9958	T58	413.26	914.80	1.00	859.71		601.54	483.75	70.49
142	9958-142	T59	405.00	914.80	180.19	839.99	62.00	103613.69	483.35	78.35
141	142-141	T60	403.00	18.00	31.67	56.88	62.00	97.26	459.11	56.11
1442	142-1442	T61	399.15	879.80	223.24	832.65		126196.94	482.86	83.71
999	1442-999	T62	399.00	879.80	17.95	832.55		10143.62	482.82	83.82
1321	999-1321	T63	402.07	879.80	251.11	832.62		141940.61	482.28	80.21
145	1321-145	T64	402.00		19.01	112.34		219.09	482.28	80.28
1322	1321-1322	T65	405.91	69.50	77.48	365.24		8830.14	482.20	76.29
1311	1322-1311	T66	414.00	69.50	171.45	365.21		19536.02	482.02	68.02
1312	1311-1312	T67	428.48	69.50	250.72	365.24		28572.63	481.75	53.27
148	1312-148	T68	440.00	69.50	208.28	365.14		23723.44	481.53	41.53
130	148-130	T69	430.00	69.50	202.90	365.13		23110.05	481.32	51.32
9969	130-9969	T70	427.16	69.50	58.27	365.09		6635.50	481.26	54.10
1281	9969-1281	T71	422.88	16.00	40.49	81.01	56.10	247.18	477.08	54.20
1271	9969-1271	T72	425.98	53.50	79.85	340.40		7935.75	481.18	55.20
1272	1271-1272	T73	425.27	53.50	362.39	339.76	57.00	35884.05	480.85	55.58
126	1272-126	T74	425.12	39.50	14.29	174.99		389.65	480.67	55.55
149	126-149	T75	427.00		23.93	69.37		108.09	480.67	53.67
123	126-123	T76	431.51	39.50	250.89	172.34		6642.17	477.34	45.83
1091	123-1091	T77	434.69	39.50	321.39	170.28		8311.91	472.82	38.13
1092	1091-1092	T78	424.35	39.50	185.59	168.84	48.00	4721.34	470.09	45.74
9968	1092-9968	T79	423.22	24.50	24.29	130.56		374.91	469.57	46.35
121	9968-121	T80	427.14	12.00	149.45	101.33	42.00	1409.69	466.61	39.47
122	121-122	T81	434.09		105.63	93.52		852.49	466.61	32.52
120	9968-120	T82	423.12	12.50	43.96	101.57		416.55	468.64	45.52
110	120-110	T83	420.31	12.50	103.16	101.57	48.70	977.52	466.46	46.15
1041	1321-1041	T84	399.00	810.30	612.00	755.42	55.00	286332.53	480.44	81.44
133	1041-133	T85	400.00	15.00	18.38	48.14	64.00	40.81	457.36	57.36
103	1041-103	T86	399.06	90.10	41.27	213.26		1652.99	479.54	80.48
134	103-134	T87	386.00	90.10	365.77	209.63		14170.03	470.90	84.90
1011	134-1011	T88	385.00	90.10	25.20	209.59	68.00	975.81	470.30	85.30
9945	1011-9945	T89	385.01	77.60	22.05	202.29		797.08	469.83	84.82
9955	9945-9955	T90	385.01	64.70	1.00	199.29		35.11	469.81	84.80
135	9955-135	T91	387.00	15.00	182.23	72.19	60.00	889.28	440.25	53.25
100	9945-100	T92	384.06	12.90	116.76	59.48	56.90	391.06	432.22	48.16
9947	9955-9947	T93	386.99	49.70	126.83	183.03		3774.44	467.89	80.90
1382	9947-1382	T94	388.43	23.00	128.69	141.99		2338.16	466.27	77.84
1392	1382-1392	T95	388.64	23.00	10.74	142.04	80.40	195.22	466.14	77.50
99	9947-99	T96	385.03	26.70	284.97	150.46		5794.73	464.33	79.30
1381	99-1381	T97	389.19	13.50	25.87	55.71	67.80	76.29	451.69	62.50
9946	99-9946	T98	385.59	13.20	44.68	132.62		710.91	464.05	78.46
95	9946-95	T99	384.00		77.24	56.67		235.47	464.05	80.05



98	9946-98	T100	385.88	13.20	28.41	132.44		450.88	463.87	77.99
96	98-96	T101	389.00	13.20	237.65	132.45		3771.97	462.36	73.36
97	96-97	T102	390.16	13.20	21.18	110.22	58.80	235.25	462.03	71.87
1362	97-1362	T103	390.10		57.37	110.14		636.33	462.03	71.93
1042	1041-1042	T104	397.07	682.20	216.54	725.14	56.90	93568.03	479.86	82.79
1051	1042-1051	T105	399.14	60.50	446.56	264.92		27264.34	478.28	79.14
9964	1051-9964	T106	397.94	60.50	49.35	264.87		3011.78	478.11	80.17
129	9964-129	T107	399.00		20.39	55.44		59.57	478.11	79.11
106	9964-106	T108	397.23	60.50	315.84	264.81		19268.50	476.99	79.76
107	106-107	T109	398.16	60.50	49.78	264.85	65.80	3037.60	476.81	78.65
9957	107-9957	T110	399.87	38.00	112.72	233.78		5397.32	476.50	76.63
1282	9957-1282	T111	399.39		23.88	72.88		118.68	476.50	77.11
1081	9957-1081	T112	423.00	38.00	511.92	233.85		24526.95	475.08	52.08
125	1081-125	T113	423.68	38.00	18.72	233.78	53.30	896.45	475.03	51.35
124	125-124	T114	425.88	16.00	188.42	143.19	50.00	3480.21	473.87	47.99
1052	1042-1052	T115	384.03	598.70	658.06	692.55	71.00	260045.48	478.14	94.11
87	1052-87	T116	383.02	159.00	315.37	395.32		41915.74	477.06	94.04
9953	87-9953	T117	379.71	159.00	139.13	395.19		18479.78	476.57	96.86
1082	9953-1082	T118	380.00		19.27	83.20		123.91	476.57	96.57
86	9953-86	T119	380.00	159.00	163.75	395.15		21745.50	476.01	96.01
112	86-112	T120	390.00	159.00	233.69	395.15		31033.23	475.20	85.20
111	112-111	T121	387.21	159.00	158.52	395.10		21046.59	474.65	87.44
83	111-83	T122	387.79		22.74	49.71		53.72	474.65	86.86
113	111-113	T123	396.06	159.00	180.39	395.06		23945.15	474.03	77.97
114	113-114	T124	395.14	159.00	281.90	395.12		37431.06	473.05	77.91
801	114-801	T125	395.00	159.00	19.11	394.92		2534.74	472.98	77.98
998	801-998	T126	388.00	159.00	161.81	394.98		21469.82	472.42	84.42
802	998-802	T127	382.00	23.00	250.04	99.10		2258.43	453.72	71.72
781	802-781	T128	383.00	23.00	15.26	99.10	75.00	137.84	452.58	69.58
79	998-79	T129	388.57	136.00	35.79	378.45	60.40	4370.47	472.32	83.75
1191	79-1191	T130	387.24	100.00	24.18	343.06	86.00	2439.56	472.26	85.02
997	1191-997	T131	392.18	57.50	210.77	295.84		15948.37	471.87	79.69
1161	997-1161	T132	393.04		21.16	110.16		234.72	471.87	78.83
115	1161-115	T133	401.46		246.79	110.17		2738.56	471.87	70.41
118	997-118	T134	398.17	57.50	241.42	295.71		18251.94	471.41	73.24
9962	118-9962	T135	404.89	57.50	290.34	295.23		21880.72	470.86	65.97
1171	9962-1171	T136	405.04	15.00	21.28	206.17		798.26	470.84	65.80
1162	1171-1162	T137	405.27	15.00	14.16	218.84	68.70	596.31	470.83	65.56
1172	1171-1172	T138	405.04		6.23	117.50		78.35	470.84	65.80
1192	9962-1192	T139	401.20	42.50	98.14	131.78	67.80	1542.43	465.21	64.01
1621	79-1621	T140	397.00	20.50	274.10	161.64	77.00	6406.78	470.85	73.85
882	1052-882	T141	384.00	410.70	22.40	619.14	60.00	7119.75	478.09	94.09
89	882-89	T142	383.15	12.50	19.01	128.20		283.19	477.97	94.82
92	89-92	T143	372.40	12.50	731.21	124.87		10349.65	472.36	99.96
993	92-993	T144	373.02	12.50	128.86	111.98		1475.95	470.67	97.65
102	993-102	T145	377.00		36.48	105.36		371.22	470.67	93.67
9923	993-9923	T146	375.38	12.50	288.58	95.17		2409.67	462.27	86.89
94	9923-94	T147	376.00		27.18	92.51		214.78	462.27	86.27
1012	9923-1012	T148	377.00	12.50	131.17	73.01	76.00	654.23	448.02	71.02
9088	882-9088	T149	377.33	384.70	500.92	608.87		154122.92	477.03	99.70
901	9088-901	T150	378.00	15.50	70.00	238.01		3470.64	476.99	98.99
9924	901-9924	T151	378.41	15.50	1.00	212.44		39.76	476.99	98.58
91	9924-91	T152	366.30	15.50	399.35	222.06		17304.12	476.72	110.42
9944	91-9944	T153	372.67	15.50	383.73	221.60		16559.73	476.45	103.78
222	9944-222	T154	374.55		71.70	180.63		2079.67	476.45	101.90
41	222-41	T155	411.00		68.11	150.10		1378.59	476.45	65.45
93	9944-93	T156	374.23	15.50	148.62	128.51		2224.47	474.98	100.75
9930	93-9930	T157	376.60	15.50	94.57	128.42		1413.48	474.04	97.44
221	9930-221	T158	383.82		26.31	49.45		61.54	474.04	90.22
9950	9930-9950	T159	376.77	15.50	160.70	128.39		2401.07	472.44	95.67

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

9952	9950-9952	T160	376.77	15.50	1.00	133.57		16.13	472.43	95.66
9951	9952-9951	T161	376.63	15.50	10.71	128.42		160.03	472.32	95.69
211	9951-211	T162	383.00		35.43	80.05		211.33	472.32	89.32
201	9951-201	T163	380.23	15.50	155.92	102.06		1491.25	467.52	87.29
202	201-202	T164	380.20	15.50	7.94	41.74	73.80	13.36	445.51	65.31
9089	9088-9089	T165	370.95	121.30	515.78	347.31		53300.65	475.27	104.32
9939	9089-9939	T166	371.70		81.04	82.79		516.12	475.27	103.57
9940	9939-9940	T167	371.70		1.00	75.23		5.29	475.27	103.57
372	9940-372	T168	368.00		20.05	49.65		47.28	475.27	107.27
42	9939-42	T169	365.90		72.43	67.96		314.36	475.27	109.37
371	42-371	T170	364.00		19.72	68.32		86.48	475.27	111.27
441	9089-441	T171	370.06		97.17	97.92		857.60	475.27	105.21
9929	441-9929	T172	373.49		47.75	73.75		242.88	475.27	101.78
9938	9929-9938	T173	373.49		1.00	78.77		5.78	475.27	101.78
381	9938-381	T174	372.32		19.66	159.26		446.55	475.27	102.95
40	9929-40	T175	367.90		258.01	73.84		1315.43	475.27	107.37
9090	9089-9090	T176	358.35	121.30	609.96	326.72		55974.30	472.46	114.11
242	9090-242	T177	363.33	62.40	356.00	242.76		18341.50	470.41	107.08
9925	242-9925	T178	369.07	62.40	154.34	230.56		7194.10	469.27	100.20
29	9925-29	T179	371.84	23.50	26.98	53.24	63.20	72.85	420.81	48.97
23	9925-23	T180	376.28	38.90	163.86	230.53	64.70	7635.43	468.76	92.48
30	23-30	T181	375.84		17.45	64.08		67.55	468.76	92.92
282	23-282	T182	389.00	26.50	229.92	215.69		9414.04	468.28	79.28
281	282-281	T183	389.12	26.50	8.01	200.75		285.26	468.25	79.13
272	281-272	T184	388.09	26.50	50.10	178.47	52.90	1419.71	467.99	79.90
271	272-271	T185	383.69	14.50	124.18	178.46		3518.58	467.77	84.08
212	271-212	T186	379.00		18.44	74.34		95.29	467.77	88.77
261	271-261	T187	381.20	14.50	67.46	153.35		1423.53	467.52	86.32
9988	261-9988	T188	382.83	14.50	73.86	153.35		1558.61	467.25	84.42
262	9988-262	T189	385.20	14.50	107.08	153.65		2268.23	466.85	81.65
19	262-19	T190	385.76		17.96	190.40		576.94	466.85	81.09
25	262-25	T191	388.80	14.50	75.66	60.82	58.20	264.62	439.62	50.82
241	9090-241	T192	354.81	58.90	149.48	249.96		8151.51	471.79	116.98
9920	241-9920	T193	354.00	58.90	72.83	248.95		3940.81	471.46	117.46
32	9920-32	T194	352.00		227.14	103.23		2221.27	471.46	119.46
31	32-31	T195	368.10		219.24	70.61		1024.92	471.46	103.36
33	32-33	T196	349.79		203.55	82.45		1285.92	471.46	121.67
382	9920-382	T197	353.13	58.90	129.27	232.58		6128.22	470.64	117.51
351	382-351	T198	353.27	58.90	19.83	230.61	58.70	924.73	470.50	117.23
352	351-352	T199	350.90	38.90	311.93	230.19		14493.74	469.53	118.63
391	352-391	T200	351.56		20.25	45.01		39.47	469.53	117.97
362	352-362	T201	345.09	38.90	261.91	220.34		11178.53	468.52	123.43
9921	362-9921	T202	351.27	38.90	7.15	214.18		288.61	468.49	117.22
392	9921-392	T203	351.49		20.31	200.60		722.38	468.49	117.00
9918	9921-9918	T204	348.00	38.90	187.20	206.28		7028.52	467.49	119.49
361	9918-361	T205	350.90	13.00	164.20	155.06	54.10	3540.33	467.02	116.12
9919	361-9919	T206	342.13		341.13	156.40		7479.24	467.02	124.89
34	9919-34	T207	342.28		14.16	87.82		101.13	467.02	124.74
521	9919-521	T208	343.00		28.22	139.10		492.62	467.02	124.02
522	521-522	T209	343.02		7.31	180.93		212.82	467.02	124.00
9922	9918-9922	T210	347.96	25.90	86.79	165.56		2125.45	466.85	118.89
49	9922-49	T211	347.96	12.80	20.23	36.09	62.00	25.66	385.40	37.44
50	9922-50	T212	349.77	13.10	61.16	165.47		1496.12	466.72	116.95
9912	50-9912	T213	360.92	13.10	319.83	158.93		7234.51	465.90	104.98
51	9912-51	T214	362.03	13.10	17.46	63.95	64.00	67.33	461.87	99.84
9913	9912-9913	T215	359.01		71.41	159.24		1621.22	465.90	106.89
55	9913-55	T216	356.38		101.35	128.89		1525.74	465.90	109.52
9914	55-9914	T217	353.64		182.52	111.12		2059.48	465.90	112.26
56	9914-56	T218	355.36		181.81	111.73		2073.28	465.90	110.54
541	9913-541	T219	355.06		185.10	145.33		3518.50	465.90	110.84

542	541-542	T220	345.48		615.08	121.37		8237.82	465.90	120.42
53	542-53	T221	348.01		23.55	53.82		64.93	465.90	117.89
902	9088-902	T222	377.00	247.90	120.00	498.53		25034.09	476.73	99.73
43	902-43	T223	375.44	247.90	24.06	498.56		5020.38	476.67	101.23
45	43-45	T224	373.33	247.90	106.18	495.36		21877.99	476.39	103.06
9943	45-9943	T225	371.22	247.90	58.63	493.35		11984.51	476.24	105.02
881	9943-881	T226	370.00		33.10	45.94		67.10	476.24	106.24
9934	9943-9934	T227	368.05	247.90	174.35	491.21		35341.69	475.76	107.71
442	9934-442	T228	365.45		164.01	79.17		957.66	475.76	110.31
46	9934-46	T229	369.61	247.90	39.63	491.24	57.40	8034.95	475.66	106.05
47	46-47	T230	369.85	235.40	85.25	485.79		16911.05	475.44	105.59
9937	47-9937	T231	369.53	235.40	26.46	485.80		5249.36	475.37	105.84
85	9937-85	T232	372.26	60.50	223.19	280.11		15186.45	474.77	102.51
84	85-84	T233	379.47	60.50	237.08	280.11	57.50	16131.88	474.13	94.66
9928	84-9928	T234	373.13	44.50	418.09	276.97		27831.74	473.45	100.32
761	9928-761	T235	373.00	44.50	1.00	306.92		81.27	473.45	100.45
82	761-82	T236	373.00		24.07	44.48		45.83	473.45	100.45
81	82-81	T237	374.01		45.22	44.49		86.13	473.45	99.44
751	761-751	T238	378.00	44.50	147.31	233.24	67.00	7022.16	472.90	94.90
782	751-782	T239	384.00	21.50	350.06	222.62		15242.57	472.47	88.47
752	782-752	T240	384.00		21.02	265.08		1284.69	472.47	88.47
1622	782-1622	T241	398.00	21.50	321.16	222.49		13968.53	472.07	74.07
73	1622-73	T242	404.11	21.50	123.57	165.61	70.00	3028.00	471.42	67.31
48	9937-48	T243	368.81	174.90	101.70	429.10		15852.31	475.09	106.28
77	48-77	T244	369.67	174.90	34.79	429.13		5422.94	474.99	105.32
762	77-762	T245	362.00	174.90	340.83	428.89		53073.89	474.06	112.06
9932	762-9932	T246	367.81	174.90	203.23	428.93		31653.82	473.50	105.69
741	9932-741	T247	368.00	174.90	1.00	416.82	69.00	147.32	473.50	105.50
9933	741-9933	T248	373.31	154.40	129.47	414.91		18903.70	473.17	99.86
991	9933-991	T249	373.28	30.00	13.53	107.76		143.78	472.07	98.79
742	991-742	T250	373.00	30.00	1.00	105.92		10.28	471.98	98.98
9927	742-9927	T251	374.83	30.00	84.12	107.76		894.10	465.13	90.30
721	9927-721	T252	375.00	30.00	1.00	100.70	79.00	9.32	465.02	90.02
722	721-722	T253	386.00	15.00	299.84	89.46	68.00	2220.12	448.33	62.33
71	9933-71	T254	361.00	124.40	336.37	391.26	58.00	43818.30	472.40	111.40
9911	71-9911	T255	357.84	112.50	293.48	380.92		36293.20	471.77	113.93
70	9911-70	T256	361.00	15.00	17.83	36.92	51.00	23.63	384.77	23.77
9021	9911-9021	T257	352.29	97.50	347.00	366.71		39855.44	471.09	118.80
62	9021-62	T258	352.29	11.80	48.70	42.79		85.99	400.98	48.69
61	62-61	T259	351.96	11.80	7.97	39.70	55.00	12.16	384.19	32.23
9915	9021-9915	T260	358.23	85.70	98.50	354.49		10592.34	470.91	112.68
63	9915-63	T261	358.10	11.70	9.51	54.92	65.90	27.28	467.11	109.01
592	9915-592	T262	356.12	74.00	82.02	341.07		8182.99	470.77	114.65
9916	592-9916	T263	355.00		38.72	84.66		257.57	470.77	115.77
60	9916-60	T264	351.49		97.20	49.92		231.60	470.77	119.28
591	9916-591	T265	349.28		276.87	67.09		1171.79	470.77	121.49
9926	592-9926	T266	368.57	74.00	269.89	340.99		26912.92	470.32	101.75
64	9926-64	T267	366.16	13.00	627.24	105.34		6379.01	458.40	92.24
58	64-58	T268	349.02	13.00	368.58	80.00		2196.33	431.08	82.06
57	58-57	T269	349.36	13.00	23.61	42.10	55.00	40.40	386.59	37.23
65	9926-65	T270	376.31	61.00	208.34	323.38		18741.21	470.00	93.69
994	65-994	T271	393.25	61.00	500.84	323.57		45103.96	469.24	75.99
995	994-995	T272	399.09	61.00	251.39	322.61		22509.64	468.89	69.80
682	995-682	T273	389.00	31.00	17.27	106.17	82.00	178.38	467.28	78.28
69	995-69	T274	400.34	30.00	80.20	274.24	72.00	5236.88	468.83	68.49
9954	994-9954	T275	389.22		74.42	174.29		2013.72	469.24	80.02
681	9954-681	T276	389.07		21.49	143.67		399.52	469.24	80.17
66	9954-66	T277	385.94		454.22	113.71		5360.15	469.24	83.30
161	66-161	T278	384.00		20.81	92.49		164.37	469.24	85.24
67	161-67	T279	378.00		74.78	92.57		591.64	469.24	91.24

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

<b>Turno 2</b>											
<b>Nudo</b>	<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID</b>	<b>Cota</b>	<b>Caudal</b>	<b>Longitud</b>	<b>Diam.</b>	<b>Pmin</b>	<b>Costo tub</b>	<b>Alt. Piez</b>	<b>Presión</b>	
<b>[1]</b>	<b>[2]</b>	<b>[3]</b>	<b>[4]</b>	<b>lin. [L/s]</b>	<b>[m]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mca]</b>	<b>[\$]</b>	<b>[m]</b>	<b>[m]</b>	
				<b>[5]</b>	<b>[6]</b>	<b>[7]</b>	<b>[8]</b>	<b>[9]</b>	<b>[10]</b>	<b>[11]</b>	
	0-		489.00								
9022	0-9022	T1	440.05	1050.20	875.00				487.55	47.50	
10	9022-10	T2	440.67		247.00				487.55	46.88	
9801	10-9801	T3	443.30		108.69				487.55	44.25	
9	9801-9	T4	444.57		52.59				487.55	42.98	
11	9022-11	T5	432.00	1050.20	56.00				487.45	55.45	
12	11-12	T6	431.00	1050.20	50.48				487.36	56.36	
13	12-13	T7	439.00	1050.20	187.90				487.04	48.04	
9014	13-9014	T8	420.35	1050.20	564.60				486.05	65.70	
9967	9014-9967	T9	420.22	982.60	25.96				486.00	65.78	
156	9967-156	T10	425.12		35.30				486.00	60.88	
155	156-155	T11	419.00		212.84				486.00	67.00	
154	155-154	T12	422.00		282.15				486.00	64.00	
1531	154-1531	T13	422.48		12.35				486.00	63.52	
159	1531-159	T14	427.00		98.47				486.00	59.00	
160	159-160	T15	427.00		12.79				486.00	59.00	
14	9014-14	T16	420.35	67.60	58.00				485.98	65.63	
1502	14-1502	T17	419.95	67.60	16.38				485.96	66.01	
1501	1502-1501	T18	420.00	67.60	568.00				485.16	65.16	
16	1501-16	T19	406.00	67.60	277.00			74.00	484.37	78.37	
9963	16-9963	T20	404.01	54.10	98.64				484.19	80.18	
17	9963-17	T21	403.19	15.00	9.43				484.18	80.99	
9015	17-9015	T22	402.18	15.00	25.95				465.28	63.10	
137	9015-137	T23	402.00	15.00	7.00			63.00	449.80	47.80	
1361	9015-1361	T24	402.34		7.00				465.28	62.94	
9084	9963-9084	T25	406.42	39.10	192.12				483.99	77.57	
9085	9084-9085	T26	406.43		6.19				483.99	77.56	
8	9085-8	T27	415.11		323.85				483.99	68.88	
9966	9084-9966	T28	409.21	39.10	222.57				483.75	74.54	
18	9966-18	T29	410.00		19.13				483.75	73.75	
7	9966-7	T30	404.00	39.10	176.66				483.50	79.50	
6	7-6	T31	413.41	39.10	119.92			66.60	483.25	69.84	
9091	6-9091	T32	413.75	25.80	352.00				482.90	69.15	
9086	9091-9086	T33	413.00	25.80	105.42				482.79	69.79	
9087	9086-9087	T34	413.00	25.80	241.43				480.34	67.34	
5	9087-5	T35	424.04	12.00	279.18			50.00	469.84	45.80	
9970	9087-9970	T36	428.96	13.80	185.33				479.73	50.77	
4002	9970-4002	T37	435.00	13.80	1.00				479.72	44.72	
3	4002-3	T38	430.00	13.80	12.85			49.00	476.16	46.16	
2	9970-2	T39	435.00		18.31				479.73	44.73	
4001	9086-4001	T40	411.00		29.44				482.79	71.79	
1	4001-1	T41	411.00		187.00				482.79	71.79	
1581	9967-1581	T42	421.22	982.60	206.91				485.54	64.32	
157	1581-157	T43	417.00	982.60	47.31			55.00	485.43	68.43	
9960	157-9960	T44	410.66	967.60	392.69				484.56	73.90	
140	9960-140	T45	410.00	18.50	213.10			53.00	482.63	72.63	
9965	140-9965	T46	409.86		1.00				482.63	72.77	
1582	9965-1582	T47	412.17		17.91				482.63	70.46	
1391	140-1391	T48	410.66		45.11				482.63	71.97	
9959	9960-9959	T49	413.26	949.10	13.42				484.53	71.27	
143	9959-143	T50	407.00	27.50	312.22				484.23	77.23	
1441	143-1441	T51	414.05	27.50	359.75				483.75	69.70	
146	1441-146	T52	416.00	27.50	220.08				483.45	67.45	
1532	146-1532	T53	420.39	27.50	272.86			59.00	482.76	62.37	
152	1532-152	T54	421.00		15.80				482.76	61.76	
151	152-151	T55	426.00		248.82				482.76	56.76	

147	151-147	T56	436.00		209.44		482.76	46.76
150	147-150	T57	435.00		25.87		482.76	47.76
9958	9959-9958	T58	413.26	921.60	1.00		484.52	71.26
142	9958-142	T59	405.00	921.60	180.19		484.12	79.12
141	142-141	T60	403.00		31.67		484.12	81.12
1442	142-1442	T61	399.15	921.60	223.24		483.59	84.44
999	1442-999	T62	399.00	921.60	17.95		483.55	84.55
1321	999-1321	T63	402.07	921.60	251.11	67.90	482.95	80.88
145	1321-145	T64	402.00		19.01		482.95	80.95
1322	1321-1322	T65	405.91	81.00	77.48		482.84	76.93
1311	1322-1311	T66	414.00	81.00	171.45	68.00	482.60	68.60
1312	1311-1312	T67	428.48	59.50	250.72		482.40	53.92
148	1312-148	T68	440.00	59.50	208.28	40.00	482.24	42.24
130	148-130	T69	430.00	46.50	202.90	48.90	482.14	52.14
9969	130-9969	T70	427.16	33.00	58.27		482.12	54.96
1281	9969-1281	T71	422.88		40.49		482.12	59.24
1271	9969-1271	T72	425.98	33.00	79.85		482.09	56.11
1272	1271-1272	T73	425.27	33.00	362.39		481.96	56.69
126	1272-126	T74	425.12	33.00	14.29		481.81	56.69
149	126-149	T75	427.00	15.00	23.93	52.00	475.58	48.58
123	126-123	T76	431.51	18.00	250.89		480.92	49.41
1091	123-1091	T77	434.69	18.00	321.39		479.71	45.02
1092	1091-1092	T78	424.35	18.00	185.59		478.98	54.63
9968	1092-9968	T79	423.22	18.00	24.29		478.63	55.41
121	9968-121	T80	427.14		149.45		478.63	51.49
122	121-122	T81	434.09		105.63		478.63	44.54
120	9968-120	T82	423.12	18.00	43.96	45.90	476.35	53.23
110	120-110	T83	420.31		103.16		476.35	56.04
1041	1321-1041	T84	399.00	828.10	612.00		481.03	82.03
133	1041-133	T85	400.00		18.38		481.03	81.03
103	1041-103	T86	399.06	63.30	41.27	54.90	480.48	81.42
134	103-134	T87	386.00	41.30	365.77		478.13	92.13
1011	134-1011	T88	385.00	41.30	25.20		477.96	92.96
9945	1011-9945	T89	385.01	41.30	22.05		477.79	92.78
9955	9945-9955	T90	385.01	41.30	1.00		477.79	92.78
135	9955-135	T91	387.00		182.23		477.79	90.79
100	9945-100	T92	384.06		116.76		477.79	93.73
9947	9955-9947	T93	386.99	41.30	126.83		476.16	89.17
1382	9947-1382	T94	388.43		128.69		476.16	87.73
1392	1382-1392	T95	388.64		10.74		476.16	87.52
99	9947-99	T96	385.03	41.30	284.97	54.00	466.24	81.21
1381	99-1381	T97	389.19		25.87		466.24	77.05
9946	99-9946	T98	385.59	25.80	44.68		465.05	79.46
95	9946-95	T99	384.00		77.24		465.05	81.05
98	9946-98	T100	385.88	25.80	28.41		464.29	78.41
96	98-96	T101	389.00	25.80	237.65	64.00	457.91	68.91
97	96-97	T102	390.16	13.00	21.18		457.53	67.37
1362	97-1362	T103	390.10	13.00	57.37	73.90	456.48	66.38
1042	1041-1042	T104	397.07	764.80	216.54		480.31	83.24
1051	1042-1051	T105	399.14	65.00	446.56	55.90	478.22	79.08
9964	1051-9964	T106	397.94	36.00	49.35		478.14	80.20
129	9964-129	T107	399.00	20.00	20.39	64.00	448.09	49.09
106	9964-106	T108	397.23	16.00	315.84		478.04	80.81
107	106-107	T109	398.16	16.00	49.78		478.02	79.86
9957	107-9957	T110	399.87	16.00	112.72		477.95	78.08
1282	9957-1282	T111	399.39	16.00	23.88	77.00	472.49	73.10
1081	9957-1081	T112	423.00		511.92		477.95	54.95
125	1081-125	T113	423.68		18.72		477.95	54.27
124	125-124	T114	425.88		188.42		477.95	52.07
1052	1042-1052	T115	384.03	699.80	658.06		477.99	93.96
87	1052-87	T116	383.02	93.40	315.37		477.59	94.57

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

9953	87-9953	T117	379.71	93.40	139.13		477.42	97.71
1082	9953-1082	T118	380.00		19.27		477.42	97.42
86	9953-86	T119	380.00	93.40	163.75	55.00	477.22	97.22
112	86-112	T120	390.00	82.50	233.69		476.99	86.99
111	112-111	T121	387.21	82.50	158.52		476.83	89.62
83	111-83	T122	387.79	17.00	22.74	67.20	433.89	46.10
113	111-113	T123	396.06	65.50	180.39		476.71	80.65
114	113-114	T124	395.14	65.50	281.90	69.90	476.53	81.39
801	114-801	T125	395.00	45.00	19.11	58.00	476.53	81.53
998	801-998	T126	388.00	31.50	161.81		476.50	88.50
802	998-802	T127	382.00		250.04		476.50	94.50
781	802-781	T128	383.00		15.26		476.50	93.50
79	998-79	T129	388.57	31.50	35.79		476.49	87.92
1191	79-1191	T130	387.24	31.50	24.18		476.48	89.24
997	1191-997	T131	392.18	31.50	210.77		476.34	84.16
1161	997-1161	T132	393.04	18.50	21.16		475.58	82.54
115	1161-115	T133	401.46	18.50	246.79	70.00	466.66	65.20
118	997-118	T134	398.17	13.00	241.42		476.31	78.14
9962	118-9962	T135	404.89	13.00	290.34		476.27	71.38
1171	9962-1171	T136	405.04	13.00	21.28		476.25	71.21
1162	1171-1162	T137	405.27		14.16		476.25	70.98
1172	1171-1172	T138	405.04	13.00	6.23	68.00	476.17	71.13
1192	9962-1192	T139	401.20		98.14		476.27	75.07
1621	79-1621	T140	397.00		274.10		476.49	79.49
882	1052-882	T141	384.00	606.40	22.40		477.88	93.88
89	882-89	T142	383.15	32.50	19.01		476.94	93.79
92	89-92	T143	372.40	32.50	731.21	56.60	435.37	62.97
993	92-993	T144	373.02	19.00	128.86		430.86	57.84
102	993-102	T145	377.00	19.00	36.48	68.00	429.11	52.11
9923	993-9923	T146	375.38		288.58		430.86	55.48
94	9923-94	T147	376.00		27.18		430.86	54.86
1012	9923-1012	T148	377.00		131.17		430.86	53.86
9088	882-9088	T149	377.33	573.90	500.92		475.57	98.24
901	9088-901	T150	378.00	77.00	70.00	65.00	474.79	96.79
9924	901-9924	T151	378.41	59.00	1.00		474.77	96.36
91	9924-91	T152	366.30	59.00	399.35		470.97	104.67
9944	91-9944	T153	372.67	59.00	383.73		467.28	94.61
222	9944-222	T154	374.55	28.00	71.70	71.40	466.81	92.26
41	222-41	T155	411.00	14.00	68.11	60.00	466.51	55.51
93	9944-93	T156	374.23	31.00	148.62	55.80	460.63	86.40
9930	93-9930	T157	376.60	14.00	94.57		459.71	83.11
221	9930-221	T158	383.82	14.00	26.31	62.20	424.96	41.14
9950	9930-9950	T159	376.77		160.70		459.71	82.94
9952	9950-9952	T160	376.77		1.00		459.71	82.94
9951	9952-9951	T161	376.63		10.71		459.71	83.08
211	9951-211	T162	383.00		35.43		459.71	76.71
201	9951-201	T163	380.23		155.92		459.71	79.48
202	201-202	T164	380.20		7.94		459.71	79.51
9089	9088-9089	T165	370.95	282.50	515.78		465.05	94.10
9939	9089-9939	T166	371.70	34.00	81.04		422.88	51.18
9940	9939-9940	T167	371.70	17.00	1.00		422.67	50.97
372	9940-372	T168	368.00	17.00	20.05	55.00	384.58	16.58
42	9939-42	T169	365.90	17.00	72.43		396.08	30.18
371	42-371	T170	364.00	17.00	19.72	59.00	388.98	24.98
441	9089-441	T171	370.06	26.00	97.17		452.56	82.50
9929	441-9929	T172	373.49	26.00	47.75		425.86	52.37
9938	9929-9938	T173	373.49	26.00	1.00		425.46	51.97
381	9938-381	T174	372.32	26.00	19.66	60.70	425.25	52.93
40	9929-40	T175	367.90		258.01		425.86	57.96
9090	9089-9090	T176	358.35	222.50	609.96		454.39	96.04
242	9090-242	T177	363.33	87.50	356.00	64.70	449.77	86.44

9925	242-9925	T178	369.07	73.00	154.34		447.94	78.87
29	9925-29	T179	371.84		26.98		447.94	76.10
23	9925-23	T180	376.28	73.00	163.86		445.99	69.71
30	23-30	T181	375.84	16.00	17.45	60.20	438.21	62.37
282	23-282	T182	389.00	57.00	229.92	55.00	443.61	54.61
281	282-281	T183	389.12	42.50	8.01	54.90	443.55	54.43
272	281-272	T184	388.09	28.00	50.10		443.20	55.11
271	272-271	T185	383.69	28.00	124.18	57.30	442.35	58.66
212	271-212	T186	379.00		18.44		442.35	63.35
261	271-261	T187	381.20	16.00	67.46		442.00	60.80
9988	261-9988	T188	382.83	16.00	73.86		441.63	58.80
262	9988-262	T189	385.20	16.00	107.08		441.09	55.89
19	262-19	T190	385.76	16.00	17.96	66.20	441.06	55.30
25	262-25	T191	388.80		75.66		441.09	52.29
241	9090-241	T192	354.81	135.00	149.48	73.20	450.50	95.69
9920	241-9920	T193	354.00	120.50	72.83		448.96	94.96
32	9920-32	T194	352.00	14.50	227.14		441.82	89.82
31	32-31	T195	368.10	14.50	219.24	52.90	393.14	25.04
33	32-33	T196	349.79		203.55		441.82	92.03
382	9920-382	T197	353.13	106.00	129.27	79.90	445.93	92.80
351	382-351	T198	353.27	80.00	19.83		445.64	92.37
352	351-352	T199	350.90	80.00	311.93		441.18	90.28
391	352-391	T200	351.56	15.00	20.25	73.40	391.04	39.48
362	352-362	T201	345.09	65.00	261.91		438.06	92.97
9921	362-9921	T202	351.27	65.00	7.15		437.96	86.69
392	9921-392	T203	351.49		20.31		437.96	86.47
9918	9921-9918	T204	348.00	65.00	187.20		434.82	86.82
361	9918-361	T205	350.90		164.20		434.82	83.92
9919	361-9919	T206	342.13		341.13		434.82	92.69
34	9919-34	T207	342.28		14.16		434.82	92.54
521	9919-521	T208	343.00		28.22		434.82	91.82
522	521-522	T209	343.02		7.31		434.82	91.80
9922	9918-9922	T210	347.96	65.00	86.79		430.34	82.38
49	9922-49	T211	347.96		20.23		430.34	82.38
50	9922-50	T212	349.77	65.00	61.16	62.20	427.18	77.41
9912	50-9912	T213	360.92	49.50	319.83		415.21	54.29
51	9912-51	T214	362.03		17.46		415.21	53.18
9913	9912-9913	T215	359.01	49.50	71.41		412.57	53.56
55	9913-55	T216	356.38	34.50	101.35	54.60	407.07	50.69
9914	55-9914	T217	353.64	20.00	182.52		399.73	46.09
56	9914-56	T218	355.36	20.00	181.81	61.60	392.62	37.26
541	9913-541	T219	355.06	15.00	185.10		411.47	56.41
542	541-542	T220	345.48	15.00	615.08		402.43	56.95
53	542-53	T221	348.01	15.00	23.55	62.00	379.50	31.49
902	9088-902	T222	377.00	214.40	120.00		475.34	98.34
43	902-43	T223	375.44	214.40	24.06	65.60	475.30	99.86
45	43-45	T224	373.33	195.40	106.18	54.70	475.12	101.79
9943	45-9943	T225	371.22	182.80	58.63		475.03	103.81
881	9943-881	T226	370.00	13.50	33.10	74.00	415.22	45.22
9934	9943-9934	T227	368.05	169.30	174.35		474.81	106.76
442	9934-442	T228	365.45		164.01		474.81	109.36
46	9934-46	T229	369.61	169.30	39.63		474.76	105.15
47	46-47	T230	369.85	169.30	85.25		474.64	104.79
9937	47-9937	T231	369.53	169.30	26.46		474.60	105.07
85	9937-85	T232	372.26	46.80	223.19		474.18	101.92
84	85-84	T233	379.47	46.80	237.08		473.73	94.26
9928	84-9928	T234	373.13	46.80	418.09		472.89	99.76
761	9928-761	T235	373.00	46.80	1.00	60.00	472.89	99.89
82	761-82	T236	373.00	9.30	24.07		448.24	75.24
81	82-81	T237	374.01	9.30	45.22	60.00	401.99	27.98
751	761-751	T238	378.00	20.50	147.31		472.75	94.75

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

782	751-782	T239	384.00	20.50	350.06				472.31	88.31
752	782-752	T240	384.00		21.02				472.31	88.31
1622	782-1622	T241	398.00	20.50	321.16		77.00		471.90	73.90
73	1622-73	T242	404.11		123.57				471.90	67.79
48	9937-48	T243	368.81	122.50	101.70				474.46	105.65
77	48-77	T244	369.67	122.50	34.79		64.30		474.41	104.74
762	77-762	T245	362.00	108.50	340.83				474.04	112.04
9932	762-9932	T246	367.81	108.50	203.23				473.81	106.00
741	9932-741	T247	368.00	108.50	1.00				473.81	105.81
9933	741-9933	T248	373.31	108.50	129.47				473.64	100.33
991	9933-991	T249	373.28	20.50	13.53				472.98	99.70
742	991-742	T250	373.00	20.50	1.00		64.00		472.92	99.92
9927	742-9927	T251	374.83		84.12				472.92	98.09
721	9927-721	T252	375.00		1.00				472.92	97.92
722	721-722	T253	386.00		299.84				472.92	86.92
71	9933-71	T254	361.00	88.00	336.37				473.25	112.25
9911	71-9911	T255	357.84	88.00	293.48				472.85	115.01
70	9911-70	T256	361.00		17.83				472.85	111.85
9021	9911-9021	T257	352.29	88.00	347.00				472.29	120.00
62	9021-62	T258	352.29		48.70				472.29	120.00
61	62-61	T259	351.96		7.97				472.29	120.33
9915	9021-9915	T260	358.23	88.00	98.50				472.10	113.87
63	9915-63	T261	358.10		9.51				472.10	114.00
592	9915-592	T262	356.12	88.00	82.02				471.91	115.79
9916	592-9916	T263	355.00		38.72				471.91	116.91
60	9916-60	T264	351.49		97.20				471.91	120.42
591	9916-591	T265	349.28		276.87				471.91	122.63
9926	592-9926	T266	368.57	88.00	269.89				471.28	102.71
64	9926-64	T267	366.16	26.00	627.24		69.80		415.92	49.76
58	64-58	T268	349.02	12.30	368.58		65.00		384.78	35.76
57	58-57	T269	349.36		23.61				384.78	35.42
65	9926-65	T270	376.31	62.00	208.34				470.95	94.64
994	65-994	T271	393.25	62.00	500.84				470.17	76.92
995	994-995	T272	399.09		251.39				470.17	71.08
682	995-682	T273	389.00		17.27				470.17	81.17
69	995-69	T274	400.34		80.20				470.17	69.83
9954	994-9954	T275	389.22	62.00	74.42				467.48	78.26
681	9954-681	T276	389.07	35.00	21.49		82.00		466.79	77.72
66	9954-66	T277	385.94	27.00	454.22		64.10		438.38	52.44
161	66-161	T278	384.00	12.50	20.81				437.52	53.52
67	161-67	T279	378.00	12.50	74.78		70.00		434.43	56.43

**Turno 3**

Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
			489.00							
9022	0-9022	T1	440.05	1202.60	875.00				487.11	47.06
10	9022-10	T2	440.67		247.00				487.11	46.44
9801	10-9801	T3	443.30		108.69				487.11	43.81
9	9801-9	T4	444.57		52.59				487.11	42.54
11	9022-11	T5	432.00	1202.60	56.00		55.00		486.99	54.99
12	11-12	T6	431.00	1186.60	50.48				486.88	55.88
13	12-13	T7	439.00	1186.60	187.90				486.47	47.47
9014	13-9014	T8	420.35	1186.60	564.60				485.21	64.86
9967	9014-9967	T9	420.22	1093.60	25.96				485.15	64.93
156	9967-156	T10	425.12	42.30	35.30				485.04	59.92
155	156-155	T11	419.00	42.30	212.84		54.00		484.24	65.24
154	155-154	T12	422.00	32.00	282.15				483.47	61.47
1531	154-1531	T13	422.48	32.00	12.35				483.42	60.94



159	1531-159	T14	427.00	32.00	98.47	45.00	482.95	55.95
160	159-160	T15	427.00	17.00	12.79	57.00	482.91	55.91
14	9014-14	T16	420.35	93.00	58.00	63.60	485.09	64.74
1502	14-1502	T17	419.95	73.00	16.38		485.07	65.12
1501	1502-1501	T18	420.00	73.00	568.00		484.13	64.13
16	1501-16	T19	406.00	73.00	277.00		483.23	77.23
9963	16-9963	T20	404.01	73.00	98.64		482.90	78.89
17	9963-17	T21	403.19		9.43		482.90	79.71
9015	17-9015	T22	402.18		25.95		482.90	80.72
137	9015-137	T23	402.00		7.00		482.90	80.90
1361	9015-1361	T24	402.34		7.00		482.90	80.56
9084	9963-9084	T25	406.42	73.00	192.12		482.24	75.82
9085	9084-9085	T26	406.43		6.19		482.24	75.81
8	9085-8	T27	415.11		323.85		482.24	67.13
9966	9084-9966	T28	409.21	73.00	222.57		481.45	72.24
18	9966-18	T29	410.00	11.80	19.13	55.00	481.44	71.44
7	9966-7	T30	404.00	61.20	176.66	76.00	480.88	76.88
6	7-6	T31	413.41	43.20	119.92		480.57	67.16
9091	6-9091	T32	413.75	43.20	352.00		479.65	65.90
9086	9091-9086	T33	413.00	43.20	105.42		479.37	66.37
9087	9086-9087	T34	413.00	27.70	241.43		476.57	63.57
5	9087-5	T35	424.04		279.18		476.57	52.53
9970	9087-9970	T36	428.96	27.70	185.33		474.22	45.26
4002	9970-4002	T37	435.00	15.50	1.00	42.00	474.22	39.22
3	4002-3	T38	430.00		12.85		474.22	44.22
2	9970-2	T39	435.00	12.20	18.31	38.00	473.83	38.83
4001	9086-4001	T40	411.00	15.50	29.44	70.00	479.33	68.33
1	4001-1	T41	411.00		187.00		479.33	68.33
1581	9967-1581	T42	421.22	1051.30	206.91		484.62	63.40
157	1581-157	T43	417.00	1051.30	47.31		484.50	67.50
9960	157-9960	T44	410.66	1051.30	392.69		483.47	72.81
140	9960-140	T45	410.00	46.00	213.10		472.26	62.26
9965	140-9965	T46	409.86	23.00	1.00		472.22	62.36
1582	9965-1582	T47	412.17	23.00	17.91	63.80	471.54	59.37
1391	140-1391	T48	410.66	23.00	45.11	58.30	460.63	49.97
9959	9960-9959	T49	413.26	1005.30	13.42		483.44	70.18
143	9959-143	T50	407.00	72.50	312.22	58.00	481.55	74.55
1441	143-1441	T51	414.05	56.50	359.75		479.66	65.61
146	1441-146	T52	416.00	56.50	220.08	56.00	478.50	62.50
1532	146-1532	T53	420.39	35.00	272.86		477.40	57.01
152	1532-152	T54	421.00	35.00	15.80		477.34	56.34
151	152-151	T55	426.00	35.00	248.82		476.34	50.34
147	151-147	T56	436.00	35.00	209.44	42.00	475.49	39.49
150	147-150	T57	435.00	12.50	25.87	40.00	471.02	36.02
9958	9959-9958	T58	413.26	932.80	1.00		483.44	70.18
142	9958-142	T59	405.00	932.80	180.19		483.02	78.02
141	142-141	T60	403.00		31.67		483.02	80.02
1442	142-1442	T61	399.15	932.80	223.24	73.90	482.48	83.33
999	1442-999	T62	399.00	912.30	17.95		482.44	83.44
1321	999-1321	T63	402.07	912.30	251.11		481.86	79.79
145	1321-145	T64	402.00	23.50	19.01	73.00	480.87	78.87
1322	1321-1322	T65	405.91	101.30	77.48	64.10	480.70	74.79
1311	1322-1311	T66	414.00	88.80	171.45		480.41	66.41
1312	1311-1312	T67	428.48	88.80	250.72	53.00	479.99	51.51
148	1312-148	T68	440.00	67.30	208.28		479.78	39.78
130	148-130	T69	430.00	67.30	202.90		479.58	49.58
9969	130-9969	T70	427.16	67.30	58.27		479.52	52.36
1281	9969-1281	T71	422.88		40.49		479.52	56.64
1271	9969-1271	T72	425.98	67.30	79.85	55.00	479.41	53.43
1272	1271-1272	T73	425.27	53.30	362.39		479.07	53.80
126	1272-126	T74	425.12	53.30	14.29	54.90	478.70	53.58

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

149	126-149	T75	427.00		23.93		478.70	51.70
123	126-123	T76	431.51	40.00	250.89	46.00	474.60	43.09
1091	123-1091	T77	434.69	27.40	321.39	39.00	471.90	37.21
1092	1091-1092	T78	424.35	12.40	185.59		471.54	47.19
9968	1092-9968	T79	423.22	12.40	24.29		471.37	48.15
121	9968-121	T80	427.14	12.40	149.45		467.55	40.41
122	121-122	T81	434.09	12.40	105.63	34.90	463.48	29.39
120	9968-120	T82	423.12		43.96		471.37	48.25
110	120-110	T83	420.31		103.16		471.37	51.06
1041	1321-1041	T84	399.00	787.50	612.00		480.11	81.11
133	1041-133	T85	400.00		18.38		480.11	80.11
103	1041-103	T86	399.06	52.60	41.27		479.72	80.66
134	103-134	T87	386.00	52.60	365.77	65.00	475.98	89.98
1011	134-1011	T88	385.00	38.10	25.20		475.84	90.84
9945	1011-9945	T89	385.01	38.10	22.05		475.70	90.69
9955	9945-9955	T90	385.01	38.10	1.00		475.69	90.68
135	9955-135	T91	387.00		182.23		475.69	88.69
100	9945-100	T92	384.06		116.76		475.70	91.64
9947	9955-9947	T93	386.99	38.10	126.83		474.30	87.31
1382	9947-1382	T94	388.43	13.50	128.69	68.60	473.60	85.17
1392	1382-1392	T95	388.64		10.74		473.60	84.96
99	9947-99	T96	385.03	24.60	284.97		470.66	85.63
1381	99-1381	T97	389.19		25.87		470.66	81.47
9946	99-9946	T98	385.59	24.60	44.68		469.58	83.99
95	9946-95	T99	384.00	14.00	77.24	59.00	419.41	35.41
98	9946-98	T100	385.88	10.60	28.41	56.10	469.44	83.56
96	98-96	T101	389.00		237.65		469.44	80.44
97	96-97	T102	390.16		21.18		469.44	79.28
1362	97-1362	T103	390.10		57.37		469.44	79.34
1042	1041-1042	T104	397.07	734.90	216.54		479.45	82.38
1051	1042-1051	T105	399.14	27.70	446.56		479.03	79.89
9964	1051-9964	T106	397.94	27.70	49.35		478.99	81.05
129	9964-129	T107	399.00		20.39		478.99	79.99
106	9964-106	T108	397.23	27.70	315.84	55.80	478.69	81.46
107	106-107	T109	398.16	16.00	49.78		478.67	80.51
9957	107-9957	T110	399.87	16.00	112.72		478.60	78.73
1282	9957-1282	T111	399.39		23.88		478.60	79.21
1081	9957-1081	T112	423.00	16.00	511.92	54.00	478.29	55.29
125	1081-125	T113	423.68		18.72		478.29	54.61
124	125-124	T114	425.88		188.42		478.29	52.41
1052	1042-1052	T115	384.03	707.20	658.06		477.08	93.05
87	1052-87	T116	383.02	129.50	315.37	56.00	476.34	93.32
9953	87-9953	T117	379.71	111.50	139.13		476.10	96.39
1082	9953-1082	T118	380.00	16.00	19.27	97.00	473.88	93.88
86	9953-86	T119	380.00	95.50	163.75		475.89	95.89
112	86-112	T120	390.00	95.50	233.69	76.00	475.58	85.58
111	112-111	T121	387.21	82.50	158.52	66.80	475.42	88.21
83	111-83	T122	387.79		22.74		475.42	87.63
113	111-113	T123	396.06	68.50	180.39	76.90	475.30	79.24
114	113-114	T124	395.14	53.00	281.90		475.18	80.04
801	114-801	T125	395.00	53.00	19.11		475.17	80.17
998	801-998	T126	388.00	53.00	161.81		475.10	87.10
802	998-802	T127	382.00	13.50	250.04	71.00	466.66	84.66
781	802-781	T128	383.00		15.26		466.66	83.66
79	998-79	T129	388.57	39.50	35.79		475.09	86.52
1191	79-1191	T130	387.24	39.50	24.18		475.08	87.84
997	1191-997	T131	392.18	39.50	210.77		474.86	82.68
1161	997-1161	T132	393.04	15.00	21.16	80.00	474.35	81.31
115	1161-115	T133	401.46		246.79		474.35	72.89
118	997-118	T134	398.17	24.50	241.42	59.80	474.75	76.58
9962	118-9962	T135	404.89	13.00	290.34		474.71	69.82

1171	9962-1171	T136	405.04	13.00	21.28	68.00	474.70	69.66
1162	1171-1162	T137	405.27		14.16		474.70	69.43
1172	1171-1172	T138	405.04		6.23		474.70	69.66
1192	9962-1192	T139	401.20		98.14		474.71	73.51
1621	79-1621	T140	397.00		274.10		475.09	78.09
882	1052-882	T141	384.00	577.70	22.40		476.98	92.98
89	882-89	T142	383.15	37.00	19.01	56.90	475.77	92.62
92	89-92	T143	372.40	22.50	731.21		455.43	83.03
993	92-993	T144	373.02	22.50	128.86		449.17	76.15
102	993-102	T145	377.00		36.48		449.17	72.17
9923	993-9923	T146	375.38	22.50	288.58		416.78	41.40
94	9923-94	T147	376.00	22.50	27.18	58.00	413.24	37.24
1012	9923-1012	T148	377.00		131.17		416.78	39.78
9088	882-9088	T149	377.33	540.70	500.92		474.92	97.59
901	9088-901	T150	378.00	46.30	70.00		474.63	96.63
9924	901-9924	T151	378.41	46.30	1.00		474.62	96.21
91	9924-91	T152	366.30	46.30	399.35	60.70	472.23	105.93
9944	91-9944	T153	372.67	34.00	383.73		470.95	98.28
222	9944-222	T154	374.55		71.70		470.95	96.40
41	222-41	T155	411.00		68.11		470.95	59.95
93	9944-93	T156	374.23	34.00	148.62		462.99	88.76
9930	93-9930	T157	376.60	34.00	94.57		457.91	81.31
221	9930-221	T158	383.82		26.31		457.91	74.09
9950	9930-9950	T159	376.77	34.00	160.70		449.26	72.49
9952	9950-9952	T160	376.77	34.00	1.00		449.22	72.45
9951	9952-9951	T161	376.63	34.00	10.71		448.64	72.01
211	9951-211	T162	383.00	18.50	35.43	71.00	442.01	59.01
201	9951-201	T163	380.23	15.50	155.92	73.80	442.73	62.50
202	201-202	T164	380.20		7.94		442.73	62.53
9089	9088-9089	T165	370.95	267.10	515.78		465.50	94.55
9939	9089-9939	T166	371.70	12.50	81.04		459.57	87.87
9940	9939-9940	T167	371.70		1.00		459.57	87.87
372	9940-372	T168	368.00		20.05		459.57	91.57
42	9939-42	T169	365.90	12.50	72.43	60.10	444.92	79.02
371	42-371	T170	364.00		19.72		444.92	80.92
441	9089-441	T171	370.06	37.60	97.17	70.90	439.70	69.64
9929	441-9929	T172	373.49	13.10	47.75		432.76	59.27
9938	9929-9938	T173	373.49		1.00		432.76	59.27
381	9938-381	T174	372.32		19.66		432.76	60.44
40	9929-40	T175	367.90	13.10	258.01	56.10	395.48	27.58
9090	9089-9090	T176	358.35	217.00	609.96		455.34	96.99
242	9090-242	T177	363.33	44.50	356.00		454.08	90.75
9925	242-9925	T178	369.07	44.50	154.34		453.38	84.31
29	9925-29	T179	371.84		26.98		453.38	81.54
23	9925-23	T180	376.28	44.50	163.86		452.63	76.35
30	23-30	T181	375.84		17.45		452.63	76.79
282	23-282	T182	389.00	44.50	229.92		451.15	62.15
281	282-281	T183	389.12	44.50	8.01		451.08	61.96
272	281-272	T184	388.09	44.50	50.10		450.23	62.14
271	272-271	T185	383.69	44.50	124.18		448.15	64.46
212	271-212	T186	379.00	18.50	18.44	75.00	443.09	64.09
261	271-261	T187	381.20	26.00	67.46	57.80	447.28	66.08
9988	261-9988	T188	382.83	13.00	73.86		447.02	64.19
262	9988-262	T189	385.20	13.00	107.08	53.80	446.66	61.46
19	262-19	T190	385.76		17.96		446.66	60.90
25	262-25	T191	388.80		75.66		446.66	57.86
241	9090-241	T192	354.81	172.50	149.48		449.06	94.25
9920	241-9920	T193	354.00	172.50	72.83		445.94	91.94
32	9920-32	T194	352.00	36.50	227.14	71.00	402.68	50.68
31	32-31	T195	368.10		219.24		402.68	34.58
33	32-33	T196	349.79	16.50	203.55	60.20	376.56	26.77

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

382	9920-382	T197	353.13	136.00	129.27		441.01	87.88
351	382-351	T198	353.27	136.00	19.83		440.22	86.95
352	351-352	T199	350.90	136.00	311.93	61.10	427.67	76.77
391	352-391	T200	351.56		20.25		427.67	76.11
362	352-362	T201	345.09	116.00	261.91	59.90	418.00	72.91
9921	362-9921	T202	351.27	103.00	7.15		417.76	66.49
392	9921-392	T203	351.49	15.00	20.31	73.50	417.74	66.25
9918	9921-9918	T204	348.00	88.00	187.20		412.11	64.11
361	9918-361	T205	350.90	53.00	164.20		404.15	53.25
9919	361-9919	T206	342.13	53.00	341.13		388.31	46.18
34	9919-34	T207	342.28	18.00	14.16	66.70	386.76	44.48
521	9919-521	T208	343.00	35.00	28.22	71.00	387.25	44.25
522	521-522	T209	343.02	17.50	7.31	71.00	387.23	44.21
9922	9918-9922	T210	347.96	35.00	86.79		410.77	62.81
49	9922-49	T211	347.96		20.23		410.77	62.81
50	9922-50	T212	349.77	35.00	61.16		409.82	60.05
9912	50-9912	T213	360.92	35.00	319.83		403.72	42.80
51	9912-51	T214	362.03		17.46		403.72	41.69
9913	9912-9913	T215	359.01	35.00	71.41		402.37	43.36
55	9913-55	T216	356.38		101.35		402.37	45.99
9914	55-9914	T217	353.64		182.52		402.37	48.73
56	9914-56	T218	355.36		181.81		402.37	47.01
541	9913-541	T219	355.06	35.00	185.10	55.90	396.79	41.73
542	541-542	T220	345.48	17.50	615.08	65.50	384.62	39.14
53	542-53	T221	348.01		23.55		384.62	36.61
902	9088-902	T222	377.00	227.30	120.00	66.00	474.66	97.66
43	902-43	T223	375.44	209.30	24.06		474.62	99.18
45	43-45	T224	373.33	209.30	106.18		474.42	101.09
9943	45-9943	T225	371.22	209.30	58.63		474.31	103.09
881	9943-881	T226	370.00		33.10		474.31	104.31
9934	9943-9934	T227	368.05	209.30	174.35		473.97	105.92
442	9934-442	T228	365.45	24.50	164.01	75.60	417.56	52.11
46	9934-46	T229	369.61	184.80	39.63		473.91	104.30
47	46-47	T230	369.85	184.80	85.25	58.20	473.77	103.92
9937	47-9937	T231	369.53	171.60	26.46		473.73	104.20
85	9937-85	T232	372.26	74.70	223.19	69.70	472.70	100.44
84	85-84	T233	379.47	57.20	237.08		472.04	92.57
9928	84-9928	T234	373.13	57.20	418.09		470.82	97.69
761	9928-761	T235	373.00	57.20	1.00		470.82	97.82
82	761-82	T236	373.00	11.20	24.07	68.00	435.23	62.23
81	82-81	T237	374.01		45.22		435.23	61.22
751	761-751	T238	378.00	46.00	147.31		470.14	92.14
782	751-782	T239	384.00	46.00	350.06	74.00	468.10	84.10
752	782-752	T240	384.00	23.00	21.02	61.00	468.09	84.09
1622	782-1622	T241	398.00		321.16		468.10	70.10
73	1622-73	T242	404.11		123.57		468.10	63.99
48	9937-48	T243	368.81	96.90	101.70	53.20	473.64	104.83
77	48-77	T244	369.67	84.40	34.79		473.62	103.95
762	77-762	T245	362.00	84.40	340.83	71.00	473.38	111.38
9932	762-9932	T246	367.81	67.40	203.23		473.29	105.48
741	9932-741	T247	368.00	67.40	1.00		473.29	105.29
9933	741-9933	T248	373.31	67.40	129.47		473.22	99.91
991	9933-991	T249	373.28		13.53		473.22	99.94
742	991-742	T250	373.00		1.00		473.22	100.22
9927	742-9927	T251	374.83		84.12		473.22	98.39
721	9927-721	T252	375.00		1.00		473.22	98.22
722	721-722	T253	386.00		299.84		473.22	87.22
71	9933-71	T254	361.00	67.40	336.37		472.99	111.99
9911	71-9911	T255	357.84	67.40	293.48		472.75	114.91
70	9911-70	T256	361.00		17.83		472.75	111.75
9021	9911-9021	T257	352.29	67.40	347.00		472.41	120.12

62	9021-62	T258	352.29	12.70	48.70	60.70	359.32	7.03
61	62-61	T259	351.96		7.97		359.32	7.36
9915	9021-9915	T260	358.23	54.70	98.50		472.33	114.10
63	9915-63	T261	358.10		9.51		472.33	114.23
592	9915-592	T262	356.12	54.70	82.02	59.90	472.25	116.13
9916	592-9916	T263	355.00	27.60	38.72		460.36	105.36
60	9916-60	T264	351.49	13.10	97.20	53.50	353.15	1.66
591	9916-591	T265	349.28	14.50	276.87	66.70	380.22	30.94
9926	592-9926	T266	368.57	12.60	269.89		472.24	103.67
64	9926-64	T267	366.16		627.24		472.24	106.08
58	64-58	T268	349.02		368.58		472.24	123.22
57	58-57	T269	349.36		23.61		472.24	122.88
65	9926-65	T270	376.31	12.60	208.34		472.22	95.91
994	65-994	T271	393.25	12.60	500.84		472.18	78.93
995	994-995	T272	399.09		251.39		472.18	73.09
682	995-682	T273	389.00		17.27		472.18	83.18
69	995-69	T274	400.34		80.20		472.18	71.84
9954	994-9954	T275	389.22	12.60	74.42		472.05	82.83
681	9954-681	T276	389.07		21.49		472.05	82.98
66	9954-66	T277	385.94	12.60	454.22		465.40	79.46
161	66-161	T278	384.00	12.60	20.81	55.00	464.52	80.52
67	161-67	T279	378.00		74.78		464.52	86.52

**Tabla G.7. Diseño hidráulico de la Red Navarra, luego de implementar AG-PNL**

ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]
T1	938.22	T71	81.01	T141	619.14	T211	36.09
T2	151.77	T72	340.40	T142	128.20	T212	165.47
T3	123.63	T73	339.76	T143	124.87	T213	158.93
T4	123.41	T74	174.99	T144	111.98	T214	63.95
T5	933.67	T75	69.37	T145	105.36	T215	159.24
T6	933.24	T76	172.34	T146	95.17	T216	128.89
T7	931.18	T77	170.28	T147	92.51	T217	111.12
T8	927.96	T78	168.84	T148	73.01	T218	111.73
T9	883.09	T79	130.56	T149	608.87	T219	145.33
T10	247.72	T80	101.33	T150	238.01	T220	121.37
T11	234.83	T81	93.52	T151	212.44	T221	53.82
T12	225.50	T82	101.57	T152	222.06	T222	498.53
T13	212.42	T83	101.57	T153	221.60	T223	498.56
T14	201.94	T84	755.42	T154	180.63	T224	495.36
T15	169.18	T85	48.14	T155	150.10	T225	493.35
T16	359.24	T86	213.26	T156	128.51	T226	45.94
T17	351.47	T87	209.63	T157	128.42	T227	491.21
T18	340.75	T88	209.59	T158	49.45	T228	79.17
T19	297.08	T89	202.29	T159	128.39	T229	491.24
T20	296.94	T90	199.29	T160	133.57	T230	485.79
T21	195.96	T91	72.19	T161	128.42	T231	485.80
T22	56.90	T92	59.48	T162	80.05	T232	280.11
T23	45.99	T93	183.03	T163	102.06	T233	280.11

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

T24	251.42	T94	141.99	T164	41.74	T234	276.97
T25	293.91	T95	142.04	T165	347.31	T235	306.92
T26	130.03	T96	150.46	T166	82.79	T236	44.48
T27	127.67	T97	55.71	T167	75.23	T237	44.49
T28	292.79	T98	132.62	T168	49.65	T238	233.24
T29	221.44	T99	56.67	T169	67.96	T239	222.62
T30	279.37	T100	132.44	T170	68.32	T240	265.08
T31	254.79	T101	132.45	T171	97.92	T241	222.49
T32	254.59	T102	110.22	T172	73.75	T242	165.61
T33	254.59	T103	110.14	T173	78.77	T243	429.10
T34	160.33	T104	725.14	T174	159.26	T244	429.13
T35	92.79	T105	264.92	T175	73.84	T245	428.89
T36	157.71	T106	264.87	T176	326.72	T246	428.93
T37	150.70	T107	55.44	T177	242.76	T247	416.82
T38	66.39	T108	264.81	T178	230.56	T248	414.91
T39	104.14	T109	264.85	T179	53.24	T249	107.76
T40	192.40	T110	233.78	T180	230.53	T250	105.92
T41	128.26	T111	72.88	T181	64.08	T251	107.76
T42	863.42	T112	233.85	T182	215.69	T252	100.70
T43	858.99	T113	233.78	T183	200.75	T253	89.46
T44	858.60	T114	143.19	T184	178.47	T254	391.26
T45	144.64	T115	692.55	T185	178.46	T255	380.92
T46	115.97	T116	395.32	T186	74.34	T256	36.92
T47	118.69	T117	395.19	T187	153.35	T257	366.71
T48	81.71	T118	83.20	T188	153.35	T258	42.79
T49	857.10	T119	395.15	T189	153.65	T259	39.70
T50	262.58	T120	395.15	T190	190.40	T260	354.49
T51	245.57	T121	395.10	T191	60.82	T261	54.92
T52	245.55	T122	49.71	T192	249.96	T262	341.07
T53	215.94	T123	395.06	T193	248.95	T263	84.66
T54	215.93	T124	395.12	T194	103.23	T264	49.92
T55	215.94	T125	394.92	T195	70.61	T265	67.09
T56	215.66	T126	394.98	T196	82.45	T266	340.99
T57	70.06	T127	99.10	T197	232.58	T267	105.34
T58	859.71	T128	99.10	T198	230.61	T268	80.00
T59	839.99	T129	378.45	T199	230.19	T269	42.10
T60	56.88	T130	343.06	T200	45.01	T270	323.38
T61	832.65	T131	295.84	T201	220.34	T271	323.57
T62	832.55	T132	110.16	T202	214.18	T272	322.61
T63	832.62	T133	110.17	T203	200.60	T273	106.17
T64	112.34	T134	295.71	T204	206.28	T274	274.24
T65	365.24	T135	295.23	T205	155.06	T275	174.29
T66	365.21	T136	206.17	T206	156.40	T276	143.67
T67	365.24	T137	218.84	T207	87.82	T277	113.71
T68	365.14	T138	117.50	T208	139.10	T278	92.49
T69	365.13	T139	131.78	T209	180.93	T279	92.57
T70	365.09	T140	161.64	T210	165.56		

**Tabla G.8. Resultados de asignación de turno con modelo AG-PNL en cada hidrante de la Red de Riego Navarra**

Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]
1	1	19.50	77	2	14.00	149	2	15.00	762	3	17.00
2	3	12.20	79	1	15.50	150	3	12.50	781	1	23.00
3	2	13.80	81	2	9.30	151	1	12.70	782	3	23.00
5	2	12.00	82	3	11.20	152	1	19.00	801	2	13.50
6	2	13.30	83	2	17.00	154	1	20.50	802	3	13.50
7	3	18.00	84	1	16.00	155	3	10.30	881	2	13.50
8	1	12.10	85	3	17.50	156	1	24.00	882	1	13.50
9	1	10.40	86	2	10.90	157	2	15.00	901	2	18.00
10	1	12.00	87	3	18.00	159	3	15.00	902	3	18.00
11	3	16.00	89	3	14.50	160	3	17.00	1011	1	12.50
12	1	12.50	91	3	12.30	161	3	12.60	1012	1	12.50
13	1	20.00	92	2	13.50	201	3	15.50	1041	1	23.00
14	3	20.00	93	2	17.00	202	1	15.50	1042	1	23.00
16	2	13.50	94	3	22.50	211	3	18.50	1051	2	29.00
17	1	17.00	95	3	14.00	212	3	18.50	1052	1	29.00
18	3	11.80	96	2	12.80	221	2	14.00	1081	3	16.00
19	2	16.00	97	1	13.20	222	2	14.00	1082	3	16.00
23	1	12.40	98	3	10.60	241	2	14.50	1091	3	15.00
25	1	14.50	99	2	15.50	242	2	14.50	1092	1	15.00
29	1	23.50	100	1	12.90	261	3	13.00	1161	3	15.00
30	2	16.00	102	2	19.00	262	3	13.00	1162	1	15.00
31	2	14.50	103	2	22.00	271	2	12.00	1171	3	13.00
32	3	20.00	106	3	11.70	272	1	12.00	1172	2	13.00
33	3	16.50	107	1	22.50	281	2	14.50	1191	1	42.50
34	3	18.00	110	1	12.50	282	2	14.50	1192	1	42.50
40	3	13.10	111	3	14.00	351	1	20.00	1271	3	14.00
41	2	14.00	112	3	13.00	352	3	20.00	1272	1	14.00
42	3	12.50	113	3	15.50	361	1	13.00	1281	1	16.00
43	2	19.00	114	2	20.50	362	3	13.00	1282	2	16.00
45	2	12.60	115	2	18.50	371	2	17.00	1311	2	21.50
46	1	12.50	118	3	11.50	372	2	17.00	1312	3	21.50
47	3	13.20	120	2	18.00	381	2	26.00	1321	2	12.50
48	3	12.50	121	1	12.00	382	2	26.00	1322	3	12.50
49	1	12.80	122	3	12.40	391	2	15.00	1361	1	13.00
50	2	15.50	123	3	12.60	392	3	15.00	1362	2	13.00
51	1	13.10	124	1	16.00	441	3	24.50	1381	1	13.50
53	2	15.00	125	1	22.00	442	3	24.50	1382	3	13.50
55	2	14.50	126	3	13.30	521	3	17.50	1391	3	23.00
56	2	20.00	129	2	20.00	522	3	17.50	1392	1	23.00
57	1	13.00	130	2	13.50	541	3	17.50	1441	1	20.50
58	2	12.30	133	1	15.00	542	3	17.50	1442	3	20.50
60	3	13.10	134	3	14.50	591	3	14.50	1501	1	14.00
61	1	11.80	135	1	15.00	592	3	14.50	1502	1	14.00
62	3	12.70	137	2	15.00	681	2	35.00	1531	1	27.50
63	1	11.70	140	2	18.50	682	1	31.00	1532	2	27.50
64	2	13.70	141	1	18.00	721	1	15.00	1581	1	23.00
66	2	14.50	142	1	17.00	722	1	15.00	1582	3	23.00
67	2	12.50	143	3	16.00	741	1	20.50	1621	1	20.50
69	1	30.00	145	3	23.50	742	2	20.50	1622	2	20.50
70	1	15.00	146	3	21.50	751	1	23.00	4001	3	15.50
71	1	11.90	147	3	22.50	752	3	23.00	4002	3	15.50
73	1	21.50	148	2	13.00	761	2	17.00			

**Tabla G.9. Resultados de cumplimiento de la Fiabilidad de presión por hidrante de la Red de Riego Navarra**

Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>	Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>	Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>
1	361	213	1.00	71	722	184	1.00	141	113	209	0.99
2	522	206	1.00	72	134	227	1.00	142	282	202	0.99
3	521	179	1.00	73	135	206	1.00	143	152	199	0.98
4	34	221	1.00	74	1011	234	1.00	144	271	236	0.98
5	351	190	1.00	75	1382	207	1.00	145	261	228	0.98
6	391	217	1.00	76	99	188	1.00	146	66	237	0.97
7	57	103	1.00	77	97	43	1.00	147	1312	202	0.97
8	58	142	1.00	78	98	73	1.00	148	281	225	0.97
9	62	212	1.00	79	118	202	1.00	149	542	203	0.97
10	61	208	1.00	80	801	230	1.00	150	1392	225	0.96
11	60	52	1.00	81	114	216	1.00	151	53	195	0.96
12	591	197	1.00	82	103	235	1.00	152	41	216	0.96
13	541	169	1.00	83	1041	221	1.00	153	202	167	0.95
14	50	214	1.00	84	133	220	1.00	154	1311	225	0.95
15	49	87	1.00	85	1042	230	1.00	155	7	236	0.94
16	362	202	1.00	86	1051	218	1.00	156	147	206	0.94
17	392	192	1.00	87	129	208	1.00	157	1171	217	0.94
18	352	201	1.00	88	106	125	1.00	158	201	183	0.93
19	382	200	1.00	89	107	220	1.00	159	1161	220	0.93
20	241	247	1.00	90	1321	205	1.00	160	1192	209	0.93
21	32	119	1.00	91	145	235	1.00	161	126	110	0.93
22	33	174	1.00	92	1442	222	1.00	162	67	191	0.93
23	592	231	1.00	93	141	229	1.00	163	2	149	0.92
24	371	110	1.00	94	1361	205	1.00	164	1501	220	0.92
25	442	228	1.00	95	137	189	1.00	165	1271	218	0.92
26	63	105	1.00	96	17	197	1.00	166	6	193	0.92
27	55	201	1.00	97	102	95	1.00	167	1172	224	0.92
28	51	151	1.00	98	1322	236	1.00	168	115	221	0.90
29	242	207	1.00	99	1391	205	1.00	169	1532	229	0.90
30	93	236	1.00	100	142	226	1.00	170	151	150	0.89
31	92	211	1.00	101	143	227	1.00	171	1191	218	0.87
32	91	182	1.00	102	16	232	1.00	172	94	164	0.87
33	42	143	1.00	103	18	188	1.00	173	121	196	0.85
34	372	165	1.00	104	1441	213	1.00	174	1162	228	0.85
35	381	184	1.00	105	146	221	1.00	175	120	219	0.85
36	40	109	1.00	106	157	219	1.00	176	149	207	0.83
37	46	238	1.00	107	1581	227	1.00	177	1091	226	0.81
38	47	148	1.00	108	156	233	1.00	178	1012	121	0.80
39	48	172	1.00	109	155	94	1.00	179	1081	220	0.80
40	77	203	1.00	110	1502	221	1.00	180	123	165	0.79
41	45	138	1.00	111	130	217	1.00	181	1092	243	0.79
42	881	206	1.00	112	159	222	1.00	182	110	182	0.78
43	85	217	1.00	113	148	204	1.00	183	1282	232	0.78
44	81	80	1.00	114	13	205	1.00	184	5	113	0.76
45	82	84	1.00	115	11	204	1.00	185	4002	223	0.75
46	741	207	1.00	116	12	209	1.00	186	1531	216	0.75
47	64	91	1.00	117	10	180	1.00	187	125	223	0.70
48	31	143	1.00	118	9	98	1.00	188	19	206	0.68
49	29	201	1.00	119	441	195	1.00	189	124	233	0.68
50	221	170	1.00	120	140	190	1.00	190	160	208	0.68
51	43	194	1.00	121	761	227	1.00	191	8	202	0.66
52	902	213	1.00	122	742	208	1.00	192	681	235	0.65
53	1052	214	1.00	123	721	141	1.00	193	4001	218	0.64
54	89	212	1.00	124	70	225	1.00	194	25	211	0.64
55	882	202	1.00	125	71	224	1.00	195	682	233	0.61
56	87	228	1.00	126	222	202	1.00	196	212	200	0.61
57	86	136	1.00	127	762	194	1.00	197	1362	179	0.60
58	84	222	1.00	128	901	231	1.00	198	1621	208	0.55



59	781	237	1.00	129	782	205	1.00	199	3	88	0.55
60	802	202	1.00	130	752	215	1.00	200	69	187	0.53
61	751	220	1.00	131	14	239	1.00	201	1	231	0.41
62	161	160	1.00	132	262	231	1.00	202	122	53	0.40
63	23	101	1.00	133	1381	206	1.00	203	1622	203	0.39
64	30	197	1.00	134	1582	189	0.99	204	1082	206	0.38
65	100	199	1.00	135	96	149	0.99	205	73	206	0.32
66	95	199	1.00	136	272	242	0.99	206	1281	237	0.27
67	112	223	1.00	137	56	196	0.99	207	1272	207	0.23
68	83	223	1.00	138	150	196	0.99				
69	111	237	1.00	139	211	192	0.99				
70	79	224	1.00	140	154	241	0.99				

$\Sigma$	192.35
<i>IFCT</i>	0.93

**Tabla G.10. Simulación de  $N_T$  y Flexibilidad. Red Navarra**

<b>NT</b>	<b>Flexibilidad</b>
4140	0.93

## **H) Ejemplo de implementación Callén Superior**

### **Características topológicas de la red**

**Tabla H.1. ID Nudos y cotas. Caso RCRP “Callén Superior”**

<b>ID Nudo</b>	<b>Cota (m)</b>	<b>ID Nudo</b>	<b>Cota (m)</b>
0	455.00	1011	380.43
NU10	379.55	1101	373.88
800	380.18	1012	375.03
800	378.57	814	379.12
1004	378.55	814	379.28
805	380.17	1012	372.11
805	378.79	NU1	370.71
800	378.07	807	372.08
801	375.24	NU2	376.62
802	374.13	807	370.64
1008	373.70	808	366.04
802	372.00	1013	368.36
NU9	373.65	809	367.75
803	373.71	809	368.66
1025	372.26	810	369.66
1026	370.44	811	372.27
816	369.21	NU3	375.76
816	371.67	811	372.14
803	365.92	NU4	372.13
N100	358.70	NU5	372.03
804	360.23	NU6	374.05
804	371.68	1014	369.68
NU8	378.43	1015	369.96
801	379.84	NU7	370.27
806	380.87	810	366.75
812	381.16	815	367.02
812	389.41	815	365.35
813	392.50	1023	365.88
813	400.46	808	371.35
806	380.32	1009	372.83

**Tabla H.2. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Callén Superior”**

<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Nin-Nfin</b>	<b>ID Linea</b>	<b>Longitud (m)</b>
NU10-800	TU01	211.72	1101-1012	TU31	544.48
800-1007	TU02	18.08	1012-814	TU32	23.72
800-1004	TU03	288.99	814-1102	TU33	307.25
1004-805	TU04	200.29	814-1020	TU34	277.97
805-1006	TU05	18.94	1012-NU1	TU35	203.30
805-1005	TU06	345.60	NU1-807	TU36	132.64
800-801	TU07	387.09	807-NU2	TU37	129.92
801-802	TU08	261.85	NU2-1103	TU38	94.87
802-1008	TU09	55.27	807-808	TU39	19.32
1008-1009	TU10	21.50	808-1013	TU40	694.68
802-NU9	TU11	156.00	1013-809	TU41	223.12
NU9-803	TU12	192.00	809-1022	TU42	18.41
803-1025	TU13	16.15	809-810	TU43	417.22
1025-1026	TU14	383.37	810-811	TU44	413.18
1026-816	TU15	328.14	811-NU3	TU45	64.96
816-1027	TU16	76.53	NU3-1104	TU46	89.67
816-1028	TU17	91.00	811-NU4	TU47	271.48
803-N100	TU18	1009.00	NU4-NU5	TU48	180.00
N100-804	TU19	1866.00	NU5-NU6	TU49	280.00
804-1110	TU20	16.20	NU6-1014	TU50	234.00
804-NU8	TU21	262.50	1014-1015	TU51	238.27
NU8-1002	TU22	279.00	1015-NU7	TU52	75.15
801-806	TU23	570.23	NU7-1016	TU53	106.04
806-812	TU24	21.85	810-815	TU54	18.27
812-1018	TU25	30.31	815-1024	TU55	16.12
812-813	TU26	157.41	815-1023	TU56	184.50
813-1019	TU27	44.62	1023-1105	TU57	727.16
813-1017	TU28	461.64	808-1021	TU58	25.41
806-1011	TU29	161.75	1009-1010	TU59	49.89
1011-1101	TU30	136.92	1101-1012	TU31	544.48
NU10-800	TU01	211.72	1012-814	TU32	23.72

**Tabla H.3. Valores de demanda en hidrantes. Caso RCRP “Callén Superior”**

ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)
1002	1	30.00	1019	17	80.00
1004	2	20.00	1020	18	12.00
1005	3	33.00	1021	19	79.90
1006	4	12.00	1022	20	30.00
1007	5	40.00	1023	21	22.00
1008	6	35.00	1024	22	18.00
1009	7	12.00	1025	23	22.00
1010	8	30.00	1026	24	12.00
1011	9	30.00	1027	25	20.00
1012	10	40.00	1028	26	18.00
1013	11	30.00	1101	27	22.00
1014	12	30.00	1102	28	30.00
1015	13	50.00	1103	29	30.00
1016	14	12.00	1104	30	96.10
1017	15	30.00	1105	31	22.00
1018	16	40.00	1110	32	80.00

**Tabla H.4. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Callén Superior”**

ID Nudo	ID Hidrante	ASIG. TURNO	DOTAC. [L/S]	Q TT1		Q TT2		SQTT
				Q T1	Q T2	Q T1	Q T2	
[1]	[2]	[3]	[4]					
1002	1	1	30.00	30.00				
1004	1	1	20.00	20.00				
1005	1	2	33.00			33.00		
1006	1	1	12.00	12.00				
1007	1	1	40.00	40.00				
1008	1	1	35.01	35.01				
1009	1	1	12.00	12.00				
1010	1	1	30.00	30.00				
1011	1	1	30.00	30.00				
1012	1	1	40.00	40.00				
1013	1	1	30.00	30.00				
1014	1	1	30.00	30.00				
1015	1	1	50.00	50.00				
1016	1	2	12.00			12.00		
1017	1	2	30.00			30.00		
1018	1	2	40.00			40.00		
<b>Coste</b>				<b>955994.9 E</b>				
								<b>676.89</b>
								<b>391.07</b>
								<b>1067.96</b>

1019	1	1	80.00	80.00	
1020	1	1	12.00	12.00	
1021	1	1	79.89	79.89	
1022	1	1	30.00	30.00	
1023	1	1	22.00	22.00	
1024	1	1	18.00	18.00	
1025	1	1	22.00	22.00	
1026	1	1	12.00	12.00	
1027	1	1	20.00	20.00	
1028	1	2	18.00		18.00
1101	1	1	22.00	22.00	
1102	1	2	30.00		30.00
1103	1	2	30.00		30.00
1104	1	2	96.07		96.07
1105	1	2	22.00		22.00
1110	1	2	80.00		80.00

**Tabla H.5. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Callén Superior”**

**Datos generales**

Viscosidad cinemática	0.000001 m <sup>2</sup> /s
Rugosidad absoluta	0.01 mm
<u>Curva de costo de la tubería</u>	
Coefficiente A	743.4273
Exponente a	2
Viscosidad dinámica	0.001 kg/m.s

<b>Turno 1</b>					
ID Nudo	Nin-Nfin	ID Linea	Cota [m]	Longitud [m]	Pmin [mca]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
			455.00		
800	-800	TU01	379.55	211.72	
1007	800-1007	TU02	380.18	18.08	48.00
1004	800-1004	TU03	378.57	288.99	48.00
805	1004-805	TU04	378.55	200.29	
1006	805-1006	TU05	380.17	18.94	47.00
1005	805-1005	TU06	378.79	345.60	
801	800-801	TU07	378.07	387.09	
802	801-802	TU08	375.24	261.85	
1008	802-1008	TU09	374.13	55.27	56.00
1009	1008-100	TU10	373.70	21.50	49.00
NU9	802-NU9	TU11	372.00	156.00	
803	NU9-803	TU12	373.65	192.00	
1025	803-1025	TU13	373.71	16.15	51.00
1026	1025-102	TU14	372.26	383.37	55.00

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

816	1026-816	TU15	370.44	328.14	
1027	816-1027	TU16	369.21	76.53	51.00
1028	816-1028	TU17	371.67	91.00	
N100	803-N100	TU18	365.92	1009.00	
804	N100-804	TU19	358.70	1866.00	
1110	804-1110	TU20	360.23	16.20	
NU8	804-NU8	TU21	371.68	262.50	
1002	NU8-1002	TU22	378.43	279.00	52.00
806	801-806	TU23	379.84	570.23	
812	806-812	TU24	380.87	21.85	
1018	812-1018	TU25	381.16	30.31	
813	812-813	TU26	389.41	157.41	
1019	813-1019	TU27	392.50	44.62	53.00
1017	813-1017	TU28	400.46	461.64	
1011	806-1011	TU29	380.32	161.75	51.00
1101	1011-1101	TU30	380.43	136.92	55.00
1012	1101-1012	TU31	373.88	544.48	53.00
814	1012-814	TU32	375.03	23.72	
1102	814-1102	TU33	379.12	307.25	
1020	814-1020	TU34	379.28	277.97	49.00
NU1	1012-NU1	TU35	372.11	203.30	
807	NU1-807	TU36	370.71	132.64	
NU2	807-NU2	TU37	372.08	129.92	
1103	NU2-1103	TU38	376.62	94.87	
808	807-808	TU39	370.64	19.32	
1013	808-1013	TU40	366.04	694.68	40.00
809	1013-809	TU41	368.36	223.12	
1022	809-1022	TU42	367.75	18.41	47.00
810	809-810	TU43	368.66	417.22	
811	810-811	TU44	369.66	413.18	
NU3	811-NU3	TU45	372.27	64.96	
1104	NU3-1104	TU46	375.76	89.67	
NU4	811-NU4	TU47	372.14	271.48	
NU5	NU4-NU5	TU48	372.13	180.00	
NU6	NU5-NU6	TU49	372.03	280.00	
1014	NU6-1014	TU50	374.05	234.00	49.00
1015	1014-1015	TU51	369.68	238.27	53.00
NU7	1015-NU7	TU52	369.96	75.15	
1016	NU7-1016	TU53	370.27	106.04	
815	810-815	TU54	366.75	18.27	
1024	815-1024	TU55	367.02	16.12	51.00
1023	815-1023	TU56	365.35	184.50	54.00
1105	1023-1105	TU57	365.88	727.16	
1021	808-1021	TU58	371.35	25.41	54.00
1010	1009-1010	TU59	372.83	49.89	55.00

				Turno 2	
ID Nudo	Nin-Nfin	ID Linea	Cota (m)	Longitud (m)	Pmin (mca)
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
			455.00		
800	NU10-80C	TU01	379.55	211.72	
1007	800-1007	TU02	380.18	18.08	
1004	800-1004	TU03	378.57	288.99	
805	1004-805	TU04	378.55	200.29	
1006	805-1006	TU05	380.17	18.94	
1005	805-1005	TU06	378.79	345.60	49.00
801	800-801	TU07	378.07	387.09	
802	801-802	TU08	375.24	261.85	
1008	802-1008	TU09	374.13	55.27	
1009	1008-100	TU10	373.70	21.50	
NU9	802-NU9	TU11	372.00	156.00	
803	NU9-803	TU12	373.65	192.00	
1025	803-1025	TU13	373.71	16.15	
1026	1025-102	TU14	372.26	383.37	
816	1026-816	TU15	370.44	328.14	
1027	816-1027	TU16	369.21	76.53	
1028	816-1028	TU17	371.67	91.00	48.00
N100	803-N100	TU18	365.92	1009.00	
804	N100-804	TU19	358.70	1866.00	
1110	804-1110	TU20	360.23	16.20	69.00
NU8	804-NU8	TU21	371.68	262.50	
1002	NU8-1002	TU22	378.43	279.00	
806	801-806	TU23	379.84	570.23	
812	806-812	TU24	380.87	21.85	
1018	812-1018	TU25	381.16	30.31	67.00
813	812-813	TU26	389.41	157.41	
1019	813-1019	TU27	392.50	44.62	
1017	813-1017	TU28	400.46	461.64	50.00
1011	806-1011	TU29	380.32	161.75	
1101	1011-110	TU30	380.43	136.92	
1012	1101-101	TU31	373.88	544.48	
814	1012-814	TU32	375.03	23.72	
1102	814-1102	TU33	379.12	307.25	62.00
1020	814-1020	TU34	379.28	277.97	
NU1	1012-NU1	TU35	372.11	203.30	
807	NU1-807	TU36	370.71	132.64	
NU2	807-NU2	TU37	372.08	129.92	
1103	NU2-1103	TU38	376.62	94.87	62.00
808	807-808	TU39	370.64	19.32	
1013	808-1013	TU40	366.04	694.68	
809	1013-809	TU41	368.36	223.12	

1022	809-1022	TU42	367.75	18.41	
810	809-810	TU43	368.66	417.22	
811	810-811	TU44	369.66	413.18	
NU3	811-NU3	TU45	372.27	64.96	
1104	NU3-1104	TU46	375.76	89.67	67.00
NU4	811-NU4	TU47	372.14	271.48	
NU5	NU4-NU5	TU48	372.13	180.00	
NU6	NU5-NU6	TU49	372.03	280.00	
1014	NU6-1014	TU50	374.05	234.00	
1015	1014-101	TU51	369.68	238.27	
NU7	1015-NU7	TU52	369.96	75.15	
1016	NU7-1016	TU53	370.27	106.04	57.00
815	810-815	TU54	366.75	18.27	
1024	815-1024	TU55	367.02	16.12	
1023	815-1023	TU56	365.35	184.50	
1105	1023-110	TU57	365.88	727.16	50.00
1021	808-1021	TU58	371.35	25.41	
1010	1009-101	TU59	372.83	49.89	

Tabla H.6. Celdas para configurar la PNL

COSTO TOTAL \$ 955994.90										
Turno 1										
Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
			455.00							
800	-800	TU01	379.55	676.89	211.72	591.63		55834.08	453.44	73.89
1007	800-1007	TU02	380.18	40.00	18.08	67.45	48.00	65.49	428.68	48.50
1004	800-1004	TU03	378.57	32.00	288.99	134.05	48.00	4063.02	444.88	66.31
805	1004-805	TU04	378.55	12.00	200.29	134.12		2818.73	443.89	65.34
1006	805-1006	TU05	380.17	12.00	18.94	53.02	47.00	42.65	435.13	54.96
1005	805-1005	TU06	378.79		345.60	134.08		4860.71	443.89	65.10
801	800-801	TU07	378.07	604.89	387.09	575.19		96557.70	450.79	72.72
802	801-802	TU08	375.24	161.01	261.85	284.10		16222.70	446.87	71.63
1008	802-1008	TU09	374.13	77.01	55.27	129.04	56.00	720.82	436.63	62.50
1009	1008-1009	TU10	373.70	42.00	21.50	111.72	49.00	210.93	434.04	60.34
NU9	802-NU9	TU11	372.00	84.00	156.00	274.20		9011.61	446.04	74.04
803	NU9-803	TU12	373.65	84.00	192.00	274.15		11087.01	445.02	71.37
1025	803-1025	TU13	373.71	54.00	16.15	150.12	51.00	284.01	444.29	70.58
1026	1025-1026	TU14	372.26	32.00	383.37	130.42	55.00	5105.48	431.29	59.03
816	1026-816	TU15	370.44	20.00	328.14	115.31		3426.66	422.76	52.32
1027	816-1027	TU16	369.21	20.00	76.53	114.56	51.00	788.96	420.71	51.50
1028	816-1028	TU17	371.67		91.00	73.61		391.76	422.76	51.09
N100	803-N100	TU18	365.92	30.00	1009.00	255.90		50854.30	443.87	77.95
804	N100-804	TU19	358.70	30.00	1866.00	255.86		94014.32	441.75	83.05
1110	804-1110	TU20	360.23		16.20	255.13		811.73	441.75	81.52
NU8	804-NU8	TU21	371.68	30.00	262.50	141.69		4117.29	436.49	64.81
1002	NU8-1002	TU22	378.43	30.00	279.00	141.89	52.00	4388.27	430.93	52.50
806	801-806	TU23	379.84	443.89	570.23	518.77		116009.06	447.18	67.34
812	806-812	TU24	380.87	80.00	21.85	297.75		1484.90	447.11	66.24



1018	812-1018	TU25	381.16		30.31	110.64		291.73	447.11	65.95
813	812-813	TU26	389.41	80.00	157.41	270.24		8835.30	446.28	56.87
1019	813-1019	TU27	392.50	80.00	44.62	259.44	53.00	2310.59	446.00	53.50
1017	813-1017	TU28	400.46		461.64	220.90		17402.78	446.28	45.82
1011	806-1011	TU29	380.32	363.89	161.75	443.49	51.00	24144.76	445.63	65.31
1101	1011-1101	TU30	380.43	333.89	136.92	438.77	55.00	20011.27	444.46	64.03
1012	1101-1012	TU31	373.88	311.89	544.48	435.53	53.00	78422.61	440.23	66.35
814	1012-814	TU32	375.03	12.00	23.72	136.71		346.67	440.12	65.09
1102	814-1102	TU33	379.12		307.25	135.82		4432.95	440.12	61.00
1020	814-1020	TU34	379.28	12.00	277.97	86.74	49.00	1654.51	428.78	49.50
NU1	1012-NU1	TU35	372.11	259.89	203.30	413.59		26440.91	438.78	66.67
807	NU1-807	TU36	370.71	259.89	132.64	413.58		17249.94	437.84	67.13
NU2	807-NU2	TU37	372.08		129.92	121.15		1495.85	437.84	65.76
1103	NU2-1103	TU38	376.62		94.87	121.15		1092.22	437.84	61.22
808	807-808	TU39	370.64	259.89	19.32	400.32		2355.58	437.68	67.04
1013	808-1013	TU40	366.04	180.00	694.68	383.91	40.00	77991.99	434.15	68.11
809	1013-809	TU41	368.36	150.00	223.12	378.77		24392.52	433.29	64.93
1022	809-1022	TU42	367.75	30.00	18.41	64.61	47.00	61.25	415.25	47.50
810	809-810	TU43	368.66	120.00	417.22	373.98		44479.40	432.18	63.52
811	810-811	TU44	369.66	80.00	413.18	351.74		39025.57	431.49	61.83
NU3	811-NU3	TU45	372.27		64.96	324.10		5220.30	431.49	59.22
1104	NU3-1104	TU46	375.76		89.67	324.94		7242.85	431.49	55.73
NU4	811-NU4	TU47	372.14	80.00	271.48	252.98		13375.93	429.53	57.39
NU5	NU4-NU5	TU48	372.13	80.00	180.00	252.95		8866.53	428.23	56.10
NU6	NU5-NU6	TU49	372.03	80.00	280.00	253.00		13797.81	426.21	54.18
1014	NU6-1014	TU50	374.05	80.00	234.00	252.97	49.00	11528.90	424.52	50.47
1015	1014-1015	TU51	369.68	50.00	238.27	222.90	53.00	9143.75	423.18	53.50
NU7	1015-NU7	TU52	369.96		75.15	74.43		330.60	423.18	53.22
1016	NU7-1016	TU53	370.27		106.04	74.48		467.15	423.18	52.91
815	810-815	TU54	366.75	40.00	18.27	115.65		191.86	430.49	63.74
1024	815-1024	TU55	367.02	18.00	16.12	56.24	51.00	40.77	418.52	51.50
1023	815-1023	TU56	365.35	22.00	184.50	115.52	54.00	1933.52	424.82	59.47
1105	1023-1105	TU57	365.88		727.16	115.50		7619.07	424.82	58.94
1021	808-1021	TU58	371.35	79.89	25.41	108.80	54.00	236.58	425.85	54.50
1010	1009-1010	TU59	372.83	30.00	49.89	99.41	55.00	388.68	428.33	55.50

**Turno 2**

Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
			455.00							
800	NU10-800	TU01	379.55	391.07	211.72				454.46	74.91
1007	800-1007	TU02	380.18		18.08				454.46	74.28
1004	800-1004	TU03	378.57	33.00	288.99				445.39	66.82
805	1004-805	TU04	378.55	33.00	200.29				439.12	60.57
1006	805-1006	TU05	380.17		18.94				439.12	58.95
1005	805-1005	TU06	378.79	33.00	345.60		49.00		428.29	49.50
801	800-801	TU07	378.07	358.06	387.09				453.50	75.43
802	801-802	TU08	375.24	98.00	261.85				451.94	76.70
1008	802-1008	TU09	374.13		55.27				451.94	77.81
1009	1008-1009	TU10	373.70		21.50				451.94	78.24
NU9	802-NU9	TU11	372.00	98.00	156.00				450.84	78.84
803	NU9-803	TU12	373.65	98.00	192.00				449.48	75.83
1025	803-1025	TU13	373.71	18.00	16.15				449.38	75.67
1026	1025-1026	TU14	372.26	18.00	383.37				444.88	72.62
816	1026-816	TU15	370.44	18.00	328.14				437.85	67.41
1027	816-1027	TU16	369.21		76.53				437.85	68.64
1028	816-1028	TU17	371.67	18.00	91.00		48.00		420.17	48.50
N100	803-N100	TU18	365.92	80.00	1009.00				442.59	76.67
804	N100-804	TU19	358.70	80.00	1866.00				429.84	71.14
1110	804-1110	TU20	360.23	80.00	16.20		69.00		429.73	69.50
NU8	804-NU8	TU21	371.68		262.50				429.84	58.16
1002	NU8-1002	TU22	378.43		279.00				429.84	51.41
806	801-806	TU23	379.84	260.06	570.23				452.22	72.38

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

812	806-812	TU24	380.87	70.00	21.85		452.16	71.29
1018	812-1018	TU25	381.16	40.00	30.31	67.00	448.66	67.50
813	812-813	TU26	389.41	30.00	157.41		452.03	62.62
1019	813-1019	TU27	392.50		44.62		452.03	59.53
1017	813-1017	TU28	400.46	30.00	461.64	50.00	450.96	50.50
1011	806-1011	TU29	380.32	190.06	161.75		451.78	71.46
1101	1011-1101	TU30	380.43	190.06	136.92		451.39	70.96
1012	1101-1012	TU31	373.88	190.06	544.48		449.76	75.88
814	1012-814	TU32	375.03	30.00	23.72		449.20	74.17
1102	814-1102	TU33	379.12	30.00	307.25	62.00	441.62	62.50
1020	814-1020	TU34	379.28		277.97		449.20	69.92
NU1	1012-NU1	TU35	372.11	160.06	203.30		449.20	77.09
807	NU1-807	TU36	370.71	160.06	132.64		448.83	78.12
NU2	807-NU2	TU37	372.08	30.00	129.92		443.22	71.14
1103	NU2-1103	TU38	376.62	30.00	94.87	62.00	439.12	62.50
808	807-808	TU39	370.64	130.06	19.32		448.79	78.15
1013	808-1013	TU40	366.04	130.06	694.68		446.90	80.86
809	1013-809	TU41	368.36	130.06	223.12		446.25	77.89
1022	809-1022	TU42	367.75		18.41		446.25	78.50
810	809-810	TU43	368.66	130.06	417.22		444.95	76.29
811	810-811	TU44	369.66	108.07	413.18		443.72	74.06
NU3	811-NU3	TU45	372.27	96.07	64.96		443.53	71.26
1104	NU3-1104	TU46	375.76	96.07	89.67	67.00	443.26	67.50
NU4	811-NU4	TU47	372.14	12.00	271.48		443.66	71.52
NU5	NU4-NU5	TU48	372.13	12.00	180.00		443.62	71.49
NU6	NU5-NU6	TU49	372.03	12.00	280.00		443.56	71.53
1014	NU6-1014	TU50	374.05	12.00	234.00		443.50	69.45
1015	1014-1015	TU51	369.68	12.00	238.27		443.40	73.72
NU7	1015-NU7	TU52	369.96	12.00	75.15		436.90	66.94
1016	NU7-1016	TU53	370.27	12.00	106.04	57.00	427.77	57.50
815	810-815	TU54	366.75	22.00	18.27		444.39	77.64
1024	815-1024	TU55	367.02		16.12		444.39	77.37
1023	815-1023	TU56	365.35	22.00	184.50		438.73	73.38
1105	1023-1105	TU57	365.88	22.00	727.16	50.00	416.38	50.50
1021	808-1021	TU58	371.35		25.41		448.79	77.44
1010	1009-1010	TU59	372.83		49.89		451.94	79.11

**Tabla H.7. Diseño hidráulico de la Red Callén Superior, luego de implementar AG-PNL**

ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]
TU01	591.63	TU16	114.56	TU31	435.53	TU46	324.94
TU02	67.45	TU17	73.61	TU32	136.71	TU47	252.98
TU03	134.05	TU18	255.9	TU33	135.82	TU48	252.95
TU4	134.12	TU19	255.86	TU34	86.74	TU49	253
TU5	53.02	TU20	255.13	TU35	413.59	TU50	252.97
TU6	134.08	TU21	141.69	TU36	413.58	TU51	222.9
TU7	575.19	TU22	141.89	TU37	121.15	TU52	74.43
TU8	284.1	TU23	518.77	TU38	121.15	TU53	74.48
TU9	129.04	TU24	297.75	TU39	400.32	TU54	115.65
TU10	111.72	TU25	110.64	TU40	383.91	TU55	56.24
TU11	274.2	TU26	270.24	TU41	378.77	TU56	115.52
TU12	274.15	TU27	259.44	TU42	64.61	TU57	115.5
TU13	150.12	TU28	220.9	TU43	373.98	TU58	108.8
TU14	130.42	TU29	443.49	TU44	351.74	TU59	99.41
TU15	115.31	TU30	438.77	TU45	324.1		

**Tabla H.8. Resultados de asignación de turno con modelo AG-PNL en cada hidrante de la Red de Riego Callén Superior**

Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]
1002	1	30.00	1019	1	80.00
1004	1	20.00	1020	1	12.00
1005	2	33.00	1021	1	79.90
1006	1	12.00	1022	1	30.00
1007	1	40.00	1023	1	22.00
1008	1	35.00	1024	1	18.00
1009	1	12.00	1025	1	22.00
1010	1	30.00	1026	1	12.00
1011	1	30.00	1027	1	20.00
1012	1	40.00	1028	2	18.00
1013	1	30.00	1101	1	22.00
1014	1	30.00	1102	2	30.00
1015	1	50.00	1103	2	30.00
1016	2	12.00	1104	2	96.10
1017	2	30.00	1105	2	22.00
1018	2	40.00	1110	2	80.00

**Tabla H.9. Resultados de cumplimiento de la Fiabilidad de presión por hidrante de la Red de Riego Callén Superior**

Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>	Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>
1	1020	27	1.00	17	1021	95	1.00
2	1006	28	1.00	18	1022	97	1.00
3	1009	87	1.00	19	1024	93	1.00
4	1008	87	1.00	20	1023	61	1.00
5	1027	75	1.00	21	1019	96	0.92
6	1028	38	1.00	22	1014	80	0.83
7	1026	63	1.00	23	1018	106	0.79
8	1005	49	1.00	24	1015	84	0.62
9	1010	100	1.00	25	1110	87	0.54
10	1025	62	1.00	26	1002	85	0.53
11	1004	69	1.00	27	1104	84	0.26
12	1007	84	1.00	28	1016	69	0.23
13	1011	98	1.00	29	1102	98	0.22
14	1101	76	1.00	30	1105	59	0.15
15	1012	93	1.00	31	1017	102	0.12
16	1013	85	1.00	32	1103	95	0.08

$\Sigma$	25.30
IFCT	0.79

**Tabla H.10. Simulación de  $N_T$  y Flexibilidad. Red Callén Superior**

<b><math>N_T</math></b>	<b>Flexibilidad</b>
660	0.79

# I) Ejemplo de implementación San Rafael

## Características topológicas de la red

Tabla I.1. ID Nudos y cotas. Caso RCRP “San Rafael”

ID Nudo	Cota (m)	ID Nudo	Cota (m)	ID Nudo	Cota (m)	ID Nudo	Cota (m)
H01	3052.00	H34	3026.00	54	3026.00	40	3026.00
H02	3027.50	H37	3026.00	55	3026.00	44	3026.00
H03	3026.00	H39	3026.00	59	3026.00	45	3026.00
H04	3026.00	H40	3026.00	61	3026.00	47	3026.00
H05	3026.00	H41	3026.00	63	3026.00	48	3026.00
H06	3026.00	H42	3026.00	64	3026.00	52	3026.00
H07	3026.00	H43	3026.00	66	3026.00	53	3026.00
H08	3026.00	H44	3026.00	70	3026.00	56	3026.00
H09	3026.00	H45	3026.00	71	3026.00	57	3026.00
H10	3026.00	H46	3026.00	72	3026.00	58	3026.00
H11	3026.00	H47	3026.00	73	3026.00	60	3026.00
H12	3026.00	H48	3026.00	77	3026.00	62	3026.00
H13	3026.00	H38	3026.00	80	3026.00	65	3026.00
H14	3026.00	2	3075.00	82	3026.00	67	3026.00
H15	3026.00	4	3028.00	85	3026.00	68	3026.00
H16	3026.00	5	3021.00	3	3052.00	69	3026.00
H17	3026.00	6	3028.00	9	3027.50	74	3026.00
H18	3026.00	7	3043.00	10	3026.00	75	3026.00
H19	3026.00	8	3042.00	11	3026.00	76	3026.00
H20	3026.00	13	3026.00	12	3026.00	78	3026.00
H21	3026.00	15	3026.00	20	3026.00	79	3026.00
H22	3026.00	16	3026.00	22	3026.00	81	3026.00
H23	3026.00	18	3026.00	23	3026.00	83	3026.00
H25	3026.00	19	3026.00	25	3026.00	84	3026.00
H24	3026.00	21	3026.00	26	3026.00	86	3026.00
H26	3026.00	27	3026.00	28	3026.00	87	3026.00
H27	3026.00	30	3026.00	29	3026.00	88	3026.00
H29	3026.00	33	3026.00	31	3026.00	89	3026.00
H28	3026.00	36	3026.00	32	3026.00	111	3050.00
H30	3026.00	37	3026.00	34	3026.00	14	3026.00
H31	3026.00	43	3026.00	35	3026.00	17	3026.00
H32	3026.00	46	3026.00	38	3026.00	24	3026.00
H33	3026.00	49	3026.00	39	3026.00	CAB	3093.00
H36	3026.00	50	3026.00	41	3026.00		
H35	3026.00	51	3026.00	42	3026.00		

**Tabla I.2. Variables de entrada topología. Caso RCRP “San Rafael”**

Nin-Nfin	ID Linea	Longitud (m)	Nin-Nfin	ID Linea	Longitud (m)	Nin-Nfin	ID Linea	Longitud (m)
1-2	1	125.37	32-33	33	164.21	61-62	62	20.24
2-3	2	361.26	33-34	34	155.93	62-H32	TU32	20.00
3-H1	TU1	20.00	34-H15	TU15	20.00	61-63	63	49.30
3-V1	3	246.69	19-35	35	66.67	63-64	64	39.68
V1-4	4	49.80	35-H16	TU16	20.00	64-65	65	57.37
4-5	5	27.44	35-36	36	15.28	65-H33	TU33	20.00
5-6	6	48.22	36-37	37	243.05	64-66	66	85.17
6-7	7	49.65	37-38	38	42.91	66-67	68	11.97
7-8	8	64.66	38-H17	TU17	20.00	67-H34	TU34	20.00
8-9	9	336.55	37-39	39	22.24	67-68	69	42.26
9-H2	TU2	20.00	39-H18	TU18	20.00	68-H35	TU35	20.00
9-10	10	115.03	39-40	40	202.61	66-69	67	82.87
10-H3	TU3	20.00	40-H21	TU21	20.00	69-H36	TU36	20.00
10-11	11	102.64	36-41	41	86.24	63-70	70	48.64
11-H4	TU4	20.00	41-H19	TU19	20.00	70-71	71	120.41
11-12	12	39.43	41-42	42	46.46	71-72	72	14.26
12-H5	TU5	20.00	42-H20	TU20	20.00	72-73	73	119.09
12-13	13	32.39	42-43	43	241.92	73-74	74	55.98
13-14	14	56.50	43-44	44	72.15	74-H37	TU37	20.00
14-15	15	144.20	44-H22	TU22	20.00	73-75	75	136.23
15-16	16	5.07	44-45	45	144.40	75-H38	TU38	20.00
16-17	17	50.63	45-H23	TU23	20.00	75-76	76	262.63
17-18	18	116.70	45-46	46	98.96	76-H39	TU39	20.00
18-19	19	86.35	46-47	47	131.44	72-77	77	218.34
19-21	20	13.35	47-H24	TU24	20.00	77-78	78	5.61
20-H6	TU6	20.00	47-48	48	15.10	78-H40	TU40	20.00
20-21	21	113.96	48-H25	TU25	20.00	78-79	79	69.31
21-22	22	83.30	46-49	49	144.47	79-H1	TU41	20.00
22-H7	TU7	20.00	49-50	50	29.47	77-80	80	27.61
22-23	23	86.48	50-51	51	149.17	80-81	81	23.82
23-H8	TU8	20.00	51-52	52	25.02	81-H42	TU42	20.00
21-24	24	4.72	52-H26	TU26	20.00	80-82	82	207.98
24-25	25	203.57	52-53	53	70.09	82-83	83	28.73
25-H9	TU9	20.00	53-H27	TU27	20.00	83-H43	TU43	20.00
25-26	26	147.41	51-54	54	182.88	83-84	84	116.54
26-H10	TU10	20.00	54-55	55	54.74	84-H44	TU44	20.00
26-27	27	83.27	55-56	56	34.12	82-85	85	27.14
27-28	28	59.64	56-H28	TU28	20.00	85-86	86	87.79
28-H11	TU11	20.00	56-57	57	52.49	86-H45	TU45	20.00
27-29	29	95.13	57-H29	TU29	20.00	85-87	87	95.59
29-H12	TU12	20.00	55-58	58	20.05	87-H46	TU46	20.00
29-30	30	33.83	58-H30	TU30	20.00	87-88	88	212.12
30-31	31	93.16	58-59	59	27.46	88-H47	TU47	20.00
31-H13	TU13	20.00	59-60	60	382.98	88-89	89	17.89
30-32	32	46.94	60-H31	TU31	20.00	89-H48	TU48	20.00
32-H14	TU14	20.00	60-61	61	213.67	271-212	T186	18.44

Tabla I.3. Valores de demanda en hidrantes. Caso RCRP "San Rafael"

ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)	ID Nudo	ID Hidrante	Dot. (L/s)
2		31.05	33			62		
3		31.05	34			H32	32	
H01	1	1.42	H15	15		63		12.84
111		29.63	35		22.08	64		5.44
4		29.63	H16	16		65		
5		29.63	36		22.08	H33	33	
6		29.63	37		3.41	66		5.44
7		29.63	38		1.39	67		5.44
8		29.63	H17	17	1.39	H34	34	4.89
9		29.63	39		2.02	68		0.55
H02	2		H18	18	2.02	H35	35	0.55
10		29.63	40			69		
H03	3		H21	19		H36	36	
11		29.63	41		18.67	70		7.39
H04	4	1.83	H19	20		71		7.39
12		27.79	42		18.67	72		7.39
H05	5		H20	21		73		3.08
13		27.79	43		18.67	74		
14		27.79	44		18.67	H37	37	
15		27.79	H22	22		75		3.08
16		27.79	45		18.67	H38	38	3.08
17		27.79	H23	23		76		
18		27.79	46		18.67	H39	39	
19		27.79	47			77		4.31
20		5.71	H24	24		78		
H06	6		48			H40	40	
21		5.71	H25	25		79		
22			49		18.67	H41	41	
H07	7		50		18.67	80		4.31
23			51		18.67	81		
H08	8		52		3.51	H42	42	
24		5.71	H26	26	3.51	82		4.31
25		5.71	53			83		1.60
H09	9	0.29	H27	27		H43	43	0.98
26		5.42	54		15.16	84		0.62
H10	10		55		15.16	H44	44	0.62
27		5.42	56		0.84	85		2.71
28			H28	28		86		2.71
H11	11		57		0.84	H45	45	2.71
29		5.42	H29	29	0.84	87		
H12	12		58		14.32	H46	46	
30		5.42	H30	30		88		
31		5.42	59		14.32	H47	47	
H13	13	5.42	60		14.32	89		
32			H31	31	1.48	H48	48	
H14	14		61		12.84			

**Tabla I.4. Variables de entrada topología. Caso RCRP “San Rafael”**

ID Nudo [1]	ID Hidrante [2]	ASIG. TURNO [3]	DOTAC. [L/S] [4]	Q TT			SQTT
				31.05	34.93	38.28	104.26
				Q T1	Q T2	Q T3	
3	1	1	1.42	1.42			
9	1	2	1.35		1.35		
10	1	2	1.58		1.58		
11	1	1	1.83	1.83			
12	1	2	1.61		1.61		
20	1	3	2.51			2.51	
22	1	2	1.51		1.51		
23	1	2	2.07		2.07		
25	1	1	0.29	0.29			
26	1	2	1.90		1.90		
28	1	2	4.71		4.71		
29	1	3	0.57			0.57	
31	1	1	5.42	5.42			
32	1	3	3.80			3.80	
34	1	2	1.52		1.52		
35	1	2	1.99		1.99		
38	1	1	1.39	1.39			
39	1	1	2.02	2.02			
41	1	2	5.06		5.06		
42	1	3	2.38			2.38	
40	1	3	1.32			1.32	
44	1	3	2.13			2.13	
45	1	3	8.24			8.24	
47	1	3	3.62			3.62	
48	1	3	2.26			2.26	
52	1	1	3.51	3.51			
53	1	3	1.76			1.76	
56	1	3	2.93			2.93	
57	1	1	0.84	0.84			
58	1	2	2.85		2.85		
60	1	1	1.48	1.48			
62	1	3	1.08			1.08	
65	1	3	1.64			1.64	
67	1	1	4.89	4.89			
68	1	1	0.55	0.55			
69	1	2	1.93		1.93		
74	1	3	0.86			0.86	
75	1	1	3.08	3.08			
76	1	3	1.75			1.75	
78	1	2	1.22		1.22		
79	1	2	0.51		0.51		
81	1	2	0.45		0.45		
83	1	1	0.98	0.98			
84	1	1	0.62	0.62			
86	1	1	2.71	2.71			
87	1	3	1.42			1.42	
88	1	2	2.66		2.66		
89	1	2	2.01		2.01		
<b>Coste 98755.75 USD</b>				0.29			



**Tabla I.5. Variables de entrada topología. Caso RCRP “San Rafael”**

**Datos generales**

Viscosidad cinemática	0,000001 m <sup>2</sup> /s
Rugosidad absoluta	7,00E-03 mm
Curva de costo de la t	
Coficiente A	745
Exponente a	1.975
Viscosidad dinámica	1,00E-03 kg/m.s

<b>Turno 1</b>					
ID Nudo	Nin-Nfin	ID Linea	Cota [m]	Longitud [m]	Pmin [mca]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
1			3093.00		
2	1-2	1	3075.00	125.37	
3	2-3	2	3052.00	361.26	
H01	3-H1	TU1	3052.00	20.00	40.00
111	3-V1	3	3050.00	246.69	
4	V1-4	4	3028.00	49.80	
5	4-5	5	3021.00	27.44	
6	5-6	6	3028.00	48.22	
7	6-7	7	3043.00	49.65	
8	7-8	8	3042.00	64.66	
9	8-9	9	3027.50	336.55	
H02	9-H2	TU2	3027.50	20.00	
10	9-10	10	3026.00	115.03	
H03	10-H3	TU3	3026.00	20.00	
11	10-11	11	3026.00	102.64	
H04	11-H4	TU4	3026.00	20.00	40.00
12	11-12	12	3026.00	39.43	
H05	12-H5	TU5	3026.00	20.00	
13	12-13	13	3026.00	32.39	
14	13-14	14	3026.00	56.50	
15	14-15	15	3026.00	144.20	
16	15-16	16	3026.00	5.07	
17	16-17	17	3026.00	50.63	
18	17-18	18	3026.00	116.70	
19	18-19	19	3026.00	86.35	
20	19-21	20	3026.00	13.35	
H06	20-H6	TU6	3026.00	20.00	
21	20-21	21	3026.00	113.96	
22	21-22	22	3026.00	83.30	
H07	22-H7	TU7	3026.00	20.00	
23	22-23	23	3026.00	86.48	
H08	23-H8	TU8	3026.00	20.00	

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

---

24	21-24	24	3026.00	4.72	
25	24-25	25	3026.00	203.57	
H09	25-H9	TU9	3026.00	20.00	40.00
26	25-26	26	3026.00	147.41	
H10	26-H10	TU10	3026.00	20.00	
27	26-27	27	3026.00	83.27	
28	27-28	28	3026.00	59.64	
H11	28-H11	TU11	3026.00	20.00	
29	27-29	29	3026.00	95.13	
H12	29-H12	TU12	3026.00	20.00	
30	29-30	30	3026.00	33.83	
31	30-31	31	3026.00	93.16	
H13	31-H13	TU13	3026.00	20.00	40.00
32	30-32	32	3026.00	46.94	
H14	32-H14	TU14	3026.00	20.00	
33	32-33	33	3026.00	164.21	
34	33-34	34	3026.00	155.93	
H15	34-H15	TU15	3026.00	20.00	
35	19-35	35	3026.00	66.67	
H16	35-H16	TU16	3026.00	20.00	
36	35-36	36	3026.00	15.28	
37	36-37	37	3026.00	243.05	
38	37-38	38	3026.00	42.91	
H17	38-H17	TU17	3026.00	20.00	40.00
39	37-39	39	3026.00	22.24	
H18	39-H18	TU18	3026.00	20.00	40.00
40	39-40	40	3026.00	202.61	
H21	40-H21	TU21	3026.00	20.00	
41	36-41	41	3026.00	86.24	
H19	41-H19	TU19	3026.00	20.00	
42	41-42	42	3026.00	46.46	
H20	42-H20	TU20	3026.00	20.00	
43	42-43	43	3026.00	241.92	
44	43-44	44	3026.00	72.15	
H22	44-H22	TU22	3026.00	20.00	
45	44-45	45	3026.00	144.40	
H23	45-H23	TU23	3026.00	20.00	
46	45-46	46	3026.00	98.96	
47	46-47	47	3026.00	131.44	
H24	47-H24	TU24	3026.00	20.00	
48	47-48	48	3026.00	15.10	
H25	48-H25	TU25	3026.00	20.00	
49	46-49	49	3026.00	144.47	
50	49-50	50	3026.00	29.47	
51	50-51	51	3026.00	149.17	

---

52	51-52	52	3026.00	25.02	
H26	52-H26	TU26	3026.00	20.00	40.00
53	52-53	53	3026.00	70.09	
H27	53-H27	TU27	3026.00	20.00	
54	51-54	54	3026.00	182.88	
55	54-55	55	3026.00	54.74	
56	55-56	56	3026.00	34.12	
H28	56-H28	TU28	3026.00	20.00	
57	56-57	57	3026.00	52.49	
H29	57-H29	TU29	3026.00	20.00	40.00
58	55-58	58	3026.00	20.05	
H30	58-H30	TU30	3026.00	20.00	
59	58-59	59	3026.00	27.46	
60	59-60	60	3026.00	382.98	
H31	60-H31	TU31	3026.00	20.00	40.00
61	60-61	61	3026.00	213.67	
62	61-62	62	3026.00	20.24	
H32	62-H32	TU32	3026.00	20.00	
63	61-63	63	3026.00	49.30	
64	63-64	64	3026.00	39.68	
65	64-65	65	3026.00	57.37	
H33	65-H33	TU33	3026.00	20.00	
66	64-66	66	3026.00	85.17	
67	66-67	68	3026.00	11.97	
H34	67-H34	TU34	3026.00	20.00	40.00
68	67-68	69	3026.00	42.26	
H35	68-H35	TU35	3026.00	20.00	40.00
69	66-69	67	3026.00	82.87	
H36	69-H36	TU36	3026.00	20.00	
70	63-70	70	3026.00	48.64	
71	70-71	71	3026.00	120.41	
72	71-72	72	3026.00	14.26	
73	72-73	73	3026.00	119.09	
74	73-74	74	3026.00	55.98	
H37	74-H37	TU37	3026.00	20.00	
75	73-75	75	3026.00	136.23	
H38	75-H38	TU38	3026.00	20.00	40.00
76	75-76	76	3026.00	262.63	
H39	76-H39	TU39	3026.00	20.00	
77	72-77	77	3026.00	218.34	
78	77-78	78	3026.00	5.61	
H40	78-H40	TU40	3026.00	20.00	
79	78-79	79	3026.00	69.31	
H41	79-H41	TU41	3026.00	20.00	
80	77-80	80	3026.00	27.61	

---

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

81	80-81	81	3026.00	23.82	
H42	81-H42	TU42	3026.00	20.00	
82	80-82	82	3026.00	207.98	
83	82-83	83	3026.00	28.73	
H43	83-H43	TU43	3026.00	20.00	40.00
84	83-84	84	3026.00	116.54	
H44	84-H44	TU44	3026.00	20.00	40.00
85	82-85	85	3026.00	27.14	
86	85-86	86	3026.00	87.79	
H45	86-H45	TU45	3026.00	20.00	40.00
87	85-87	87	3026.00	95.59	
H46	87-H46	TU46	3026.00	20.00	
88	87-88	88	3026.00	212.12	
H47	88-H47	TU47	3026.00	20.00	
89	88-89	89	3026.00	17.89	
H48	89-H48	TU48	3026.00	20.00	

<b>Turno 2</b>					
ID Nudo	Nin-Nfin	ID Linea	Cota [m]	Longitud [m]	Pmin [mca]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
1			4083.70		
2	1-2	1	3075.00	125.37	
3	2-3	2	3052.00	361.26	
H01	3-H1	TU1	3052.00	20.00	
111	3-V1	3	3050.00	246.69	
4	V1-4	4	3028.00	49.80	
5	4-5	5	3021.00	27.44	
6	5-6	6	3028.00	48.22	
7	6-7	7	3043.00	49.65	
8	7-8	8	3042.00	64.66	
9	8-9	9	3027.50	336.55	
H02	9-H2	TU2	3027.50	20.00	40.00
10	9-10	10	3026.00	115.03	
H03	10-H3	TU3	3026.00	20.00	40.00
11	10-11	11	3026.00	102.64	
H04	11-H4	TU4	3026.00	20.00	
12	11-12	12	3026.00	39.43	
H05	12-H5	TU5	3026.00	20.00	40.00
13	12-13	13	3026.00	32.39	
14	13-14	14	3026.00	56.50	
15	14-15	15	3026.00	144.20	
16	15-16	16	3026.00	5.07	
17	16-17	17	3026.00	50.63	
18	17-18	18	3026.00	116.70	
19	18-19	19	3026.00	86.35	

---

20	19-21	20	3026.00	13.35	
H06	20-H6	TU6	3026.00	20.00	
21	20-21	21	3026.00	113.96	
22	21-22	22	3026.00	83.30	
H07	22-H7	TU7	3026.00	20.00	40.00
23	22-23	23	3026.00	86.48	
H08	23-H8	TU8	3026.00	20.00	40.00
24	21-24	24	3026.00	4.72	
25	24-25	25	3026.00	203.57	
H09	25-H9	TU9	3026.00	20.00	
26	25-26	26	3026.00	147.41	
H10	26-H10	TU10	3026.00	20.00	40.00
27	26-27	27	3026.00	83.27	
28	27-28	28	3026.00	59.64	
H11	28-H11	TU11	3026.00	20.00	40.00
29	27-29	29	3026.00	95.13	
H12	29-H12	TU12	3026.00	20.00	
30	29-30	30	3026.00	33.83	
31	30-31	31	3026.00	93.16	
H13	31-H13	TU13	3026.00	20.00	
32	30-32	32	3026.00	46.94	
H14	32-H14	TU14	3026.00	20.00	
33	32-33	33	3026.00	164.21	
34	33-34	34	3026.00	155.93	
H15	34-H15	TU15	3026.00	20.00	40.00
35	19-35	35	3026.00	66.67	
H16	35-H16	TU16	3026.00	20.00	40.00
36	35-36	36	3026.00	15.28	
37	36-37	37	3026.00	243.05	
38	37-38	38	3026.00	42.91	
H17	38-H17	TU17	3026.00	20.00	
39	37-39	39	3026.00	22.24	
H18	39-H18	TU18	3026.00	20.00	
40	39-40	40	3026.00	202.61	
H21	40-H21	TU21	3026.00	20.00	
41	36-41	41	3026.00	86.24	
H19	41-H19	TU19	3026.00	20.00	40.00
42	41-42	42	3026.00	46.46	
H20	42-H20	TU20	3026.00	20.00	
43	42-43	43	3026.00	241.92	
44	43-44	44	3026.00	72.15	
H22	44-H22	TU22	3026.00	20.00	
45	44-45	45	3026.00	144.40	
H23	45-H23	TU23	3026.00	20.00	
46	45-46	46	3026.00	98.96	

---

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

---

47	46-47	47	3026.00	131.44	
H24	47-H24	TU24	3026.00	20.00	
48	47-48	48	3026.00	15.10	
H25	48-H25	TU25	3026.00	20.00	
49	46-49	49	3026.00	144.47	
50	49-50	50	3026.00	29.47	
51	50-51	51	3026.00	149.17	
52	51-52	52	3026.00	25.02	
H26	52-H26	TU26	3026.00	20.00	
53	52-53	53	3026.00	70.09	
H27	53-H27	TU27	3026.00	20.00	
54	51-54	54	3026.00	182.88	
55	54-55	55	3026.00	54.74	
56	55-56	56	3026.00	34.12	
H28	56-H28	TU28	3026.00	20.00	
57	56-57	57	3026.00	52.49	
H29	57-H29	TU29	3026.00	20.00	
58	55-58	58	3026.00	20.05	
H30	58-H30	TU30	3026.00	20.00	40.00
59	58-59	59	3026.00	27.46	
60	59-60	60	3026.00	382.98	
H31	60-H31	TU31	3026.00	20.00	
61	60-61	61	3026.00	213.67	
62	61-62	62	3026.00	20.24	
H32	62-H32	TU32	3026.00	20.00	
63	61-63	63	3026.00	49.30	
64	63-64	64	3026.00	39.68	
65	64-65	65	3026.00	57.37	
H33	65-H33	TU33	3026.00	20.00	
66	64-66	66	3026.00	85.17	
67	66-67	68	3026.00	11.97	
H34	67-H34	TU34	3026.00	20.00	
68	67-68	69	3026.00	42.26	
H35	68-H35	TU35	3026.00	20.00	
69	66-69	67	3026.00	82.87	
H36	69-H36	TU36	3026.00	20.00	40.00
70	63-70	70	3026.00	48.64	
71	70-71	71	3026.00	120.41	
72	71-72	72	3026.00	14.26	
73	72-73	73	3026.00	119.09	
74	73-74	74	3026.00	55.98	
H37	74-H37	TU37	3026.00	20.00	
75	73-75	75	3026.00	136.23	
H38	75-H38	TU38	3026.00	20.00	
76	75-76	76	3026.00	262.63	

H39	76-H39	TU39	3026.00	20.00	
77	72-77	77	3026.00	218.34	
78	77-78	78	3026.00	5.61	
H40	78-H40	TU40	3026.00	20.00	40.00
79	78-79	79	3026.00	69.31	
H41	79-H1	TU41	3026.00	20.00	40.00
80	77-80	80	3026.00	27.61	
81	80-81	81	3026.00	23.82	
H42	81-H42	TU42	3026.00	20.00	40.00
82	80-82	82	3026.00	207.98	
83	82-83	83	3026.00	28.73	
H43	83-H43	TU43	3026.00	20.00	
84	83-84	84	3026.00	116.54	
H44	84-H44	TU44	3026.00	20.00	
85	82-85	85	3026.00	27.14	
86	85-86	86	3026.00	87.79	
H45	86-H45	TU45	3026.00	20.00	
87	85-87	87	3026.00	95.59	
H46	87-H46	TU46	3026.00	20.00	
88	87-88	88	3026.00	212.12	
H47	88-H47	TU47	3026.00	20.00	40.00
89	88-89	89	3026.00	17.89	
H48	89-H48	TU48	3026.00	20.00	40.00

<b>Turno 3</b>					
ID Nudo	Nin-Nfin	ID Linea	Cota [m]	Longitud [m]	Pmin [mca]
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
1			4083.70		
2	1-2	1	3075.00	125.37	
3	2-3	2	3052.00	361.26	
H01	3-H1	TU1	3052.00	20.00	
111	3-V1	3	3050.00	246.69	
4	V1-4	4	3028.00	49.80	
5	4-5	5	3021.00	27.44	
6	5-6	6	3028.00	48.22	
7	6-7	7	3043.00	49.65	
8	7-8	8	3042.00	64.66	
9	8-9	9	3027.50	336.55	
H02	9-H2	TU2	3027.50	20.00	
10	9-10	10	3026.00	115.03	
H03	10-H3	TU3	3026.00	20.00	
11	10-11	11	3026.00	102.64	
H04	11-H4	TU4	3026.00	20.00	
12	11-12	12	3026.00	39.43	

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

---

H05	12-H5	TU5	3026.00	20.00	
13	12-13	13	3026.00	32.39	
14	13-14	14	3026.00	56.50	
15	14-15	15	3026.00	144.20	
16	15-16	16	3026.00	5.07	
17	16-17	17	3026.00	50.63	
18	17-18	18	3026.00	116.70	
19	18-19	19	3026.00	86.35	
20	19-21	20	3026.00	13.35	
H06	20-H6	TU6	3026.00	20.00	40.00
21	20-21	21	3026.00	113.96	
22	21-22	22	3026.00	83.30	
H07	22-H7	TU7	3026.00	20.00	
23	22-23	23	3026.00	86.48	
H08	23-H8	TU8	3026.00	20.00	
24	21-24	24	3026.00	4.72	
25	24-25	25	3026.00	203.57	
H09	25-H9	TU9	3026.00	20.00	
26	25-26	26	3026.00	147.41	
H10	26-H10	TU10	3026.00	20.00	
27	26-27	27	3026.00	83.27	
28	27-28	28	3026.00	59.64	
H11	28-H11	TU11	3026.00	20.00	
29	27-29	29	3026.00	95.13	
H12	29-H12	TU12	3026.00	20.00	40.00
30	29-30	30	3026.00	33.83	
31	30-31	31	3026.00	93.16	
H13	31-H13	TU13	3026.00	20.00	
32	30-32	32	3026.00	46.94	
H14	32-H14	TU14	3026.00	20.00	40.00
33	32-33	33	3026.00	164.21	
34	33-34	34	3026.00	155.93	
H15	34-H15	TU15	3026.00	20.00	
35	19-35	35	3026.00	66.67	
H16	35-H16	TU16	3026.00	20.00	
36	35-36	36	3026.00	15.28	
37	36-37	37	3026.00	243.05	
38	37-38	38	3026.00	42.91	
H17	38-H17	TU17	3026.00	20.00	
39	37-39	39	3026.00	22.24	
H18	39-H18	TU18	3026.00	20.00	
40	39-40	40	3026.00	202.61	
H21	40-H21	TU21	3026.00	20.00	40.00
41	36-41	41	3026.00	86.24	
H19	41-H19	TU19	3026.00	20.00	



---

42	41-42	42	3026.00	46.46	
H20	42-H20	TU20	3026.00	20.00	40.00
43	42-43	43	3026.00	241.92	
44	43-44	44	3026.00	72.15	
H22	44-H22	TU22	3026.00	20.00	40.00
45	44-45	45	3026.00	144.40	
H23	45-H23	TU23	3026.00	20.00	40.00
46	45-46	46	3026.00	98.96	
47	46-47	47	3026.00	131.44	
H24	47-H24	TU24	3026.00	20.00	40.00
48	47-48	48	3026.00	15.10	
H25	48-H25	TU25	3026.00	20.00	40.00
49	46-49	49	3026.00	144.47	
50	49-50	50	3026.00	29.47	
51	50-51	51	3026.00	149.17	
52	51-52	52	3026.00	25.02	
H26	52-H26	TU26	3026.00	20.00	
53	52-53	53	3026.00	70.09	
H27	53-H27	TU27	3026.00	20.00	40.00
54	51-54	54	3026.00	182.88	
55	54-55	55	3026.00	54.74	
56	55-56	56	3026.00	34.12	
H28	56-H28	TU28	3026.00	20.00	40.00
57	56-57	57	3026.00	52.49	
H29	57-H29	TU29	3026.00	20.00	
58	55-58	58	3026.00	20.05	
H30	58-H30	TU30	3026.00	20.00	
59	58-59	59	3026.00	27.46	
60	59-60	60	3026.00	382.98	
H31	60-H31	TU31	3026.00	20.00	
61	60-61	61	3026.00	213.67	
62	61-62	62	3026.00	20.24	
H32	62-H32	TU32	3026.00	20.00	40.00
63	61-63	63	3026.00	49.30	
64	63-64	64	3026.00	39.68	
65	64-65	65	3026.00	57.37	
H33	65-H33	TU33	3026.00	20.00	40.00
66	64-66	66	3026.00	85.17	
67	66-67	68	3026.00	11.97	
H34	67-H34	TU34	3026.00	20.00	
68	67-68	69	3026.00	42.26	
H35	68-H35	TU35	3026.00	20.00	
69	66-69	67	3026.00	82.87	
H36	69-H36	TU36	3026.00	20.00	
70	63-70	70	3026.00	48.64	

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

---

71	70-71	71	3026.00	120.41	
72	71-72	72	3026.00	14.26	
73	72-73	73	3026.00	119.09	
74	73-74	74	3026.00	55.98	
H37	74-H37	TU37	3026.00	20.00	40.00
75	73-75	75	3026.00	136.23	
H38	75-H38	TU38	3026.00	20.00	
76	75-76	76	3026.00	262.63	
H39	76-H39	TU39	3026.00	20.00	40.00
77	72-77	77	3026.00	218.34	
78	77-78	78	3026.00	5.61	
H40	78-H40	TU40	3026.00	20.00	
79	78-79	79	3026.00	69.31	
H41	79-H1	TU41	3026.00	20.00	
80	77-80	80	3026.00	27.61	
81	80-81	81	3026.00	23.82	
H42	81-H42	TU42	3026.00	20.00	
82	80-82	82	3026.00	207.98	
83	82-83	83	3026.00	28.73	
H43	83-H43	TU43	3026.00	20.00	
84	83-84	84	3026.00	116.54	
H44	84-H44	TU44	3026.00	20.00	
85	82-85	85	3026.00	27.14	
86	85-86	86	3026.00	87.79	
H45	86-H45	TU45	3026.00	20.00	
87	85-87	87	3026.00	95.59	
H46	87-H46	TU46	3026.00	20.00	40.00
88	87-88	88	3026.00	212.12	
H47	88-H47	TU47	3026.00	20.00	
89	88-89	89	3026.00	17.89	
H48	89-H48	TU48	3026.00	20.00	

Tabla I.6. Celdas para configurar la PNL

COSTO TOTAL \$ 98755,7

Turno 1											
Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]	
1			3093.00								
2	1-2	1	3075.00	31.05	125.37	229.43		5093.22	3092.75	17.75	
3	2-3	2	3052.00	31.05	361.26	229.43		14676.36	3092.01	40.01	
H01	3-H1	TU1	3052.00	1.42	20.00	98.65	40.00	153.47	3092.00	40.00	
111	3-V1	3	3050.00	29.63	246.69	177.90		6064.39	3090.43	40.43	
4	V1-4	4	3028.00	29.63	49.80	177.85		1223.61	3090.11	62.11	
5	4-5	5	3021.00	29.63	27.44	177.83		674.05	3089.94	68.94	
6	5-6	6	3028.00	29.63	48.22	177.78		1183.93	3089.63	61.63	
7	6-7	7	3043.00	29.63	49.65	177.85		1219.93	3089.31	46.31	
8	7-8	8	3042.00	29.63	64.66	177.84		1588.60	3088.89	46.89	
9	8-9	9	3027.50	29.63	336.55	177.71		8256.38	3086.73	59.23	
H02	9-H2	TU2	3027.50		20.00	20.43		6.85	3086.73	59.23	
10	9-10	10	3026.00	29.63	115.03	177.56		2817.16	3085.99	59.99	
H03	10-H3	TU3	3026.00		20.00	21.53		7.60	3085.99	59.99	
11	10-11	11	3026.00	29.63	102.64	177.23		2504.51	3085.32	59.32	
H04	11-H4	TU4	3026.00	1.83	20.00	31.54	40.00	16.15	3081.74	55.74	
12	11-12	12	3026.00	27.79	39.43	176.88		958.39	3085.09	59.09	
H05	12-H5	TU5	3026.00		20.00	59.72		56.97	3085.09	59.09	
13	12-13	13	3026.00	27.79	32.39	176.54		784.31	3084.89	58.89	
14	13-14	14	3026.00	27.79	56.50	176.55		1368.29	3084.56	58.56	
15	14-15	15	3026.00	27.79	144.20	176.55		3492.08	3083.71	57.71	
16	15-16	16	3026.00	27.79	5.07	179.22		126.48	3083.68	57.68	
17	16-17	17	3026.00	27.79	50.63	176.55		1226.18	3083.38	57.38	
18	17-18	18	3026.00	27.79	116.70	176.54		2825.97	3082.69	56.69	
19	18-19	19	3026.00	27.79	86.35	176.54		2090.97	3082.18	56.18	
20	19-21	20	3026.00	5.71	13.35	99.99		105.21	3082.11	56.11	
H06	20-H6	TU6	3026.00		20.00	29.30		13.97	3082.11	56.11	
21	20-21	21	3026.00	5.71	113.96	98.39		869.93	3081.46	55.46	
22	21-22	22	3026.00		83.30	50.33		169.24	3081.46	55.46	
H07	22-H7	TU7	3026.00		20.00	27.07		11.94	3081.46	55.46	
23	22-23	23	3026.00		86.48	43.04		129.00	3081.46	55.46	
H08	23-H8	TU8	3026.00		20.00	42.96		29.73	3081.46	55.46	
24	21-24	24	3026.00	5.71	4.72	95.38		33.89	3081.43	55.43	
25	24-25	25	3026.00	5.71	203.57	88.91		1272.19	3079.55	53.55	
H09	25-H9	TU9	3026.00	0.29	20.00	20.00	40.00	6.57	3078.36	52.36	
26	25-26	26	3026.00	5.42	147.41	88.92		921.54	3078.31	52.31	
H10	26-H10	TU10	3026.00		20.00	30.85		15.46	3078.31	52.31	
27	26-27	27	3026.00	5.42	83.27	83.68		461.70	3077.37	51.37	
28	27-28	28	3026.00		59.64	61.62		180.74	3077.37	51.37	
H11	28-H11	TU11	3026.00		20.00	61.61		60.58	3077.37	51.37	
29	27-29	29	3026.00	5.42	95.13	68.35		353.75	3074.52	48.52	
H12	29-H12	TU12	3026.00		20.00	20.00		11.11	3074.52	48.52	
30	29-30	30	3026.00	5.42	33.83	57.68		247.72	3072.20	46.20	
31	30-31	31	3026.00	5.42	93.16	68.02		73.67	3069.34	43.34	
H13	31-H13	TU13	3026.00	5.42	20.00	48.05	40.00	87.04	3066.00	40.00	
32	30-32	32	3026.00		46.94	57.68		53.18	3072.20	46.20	
H14	32-H14	TU14	3026.00		20.00	45.09		268.51	3072.20	46.20	
33	32-33	33	3026.00		164.21	53.74		360.61	3072.20	46.20	
34	33-34	34	3026.00		155.93	53.74		46.25	3072.20	46.20	

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

H15	34-H15	TU15	3026.00		20.00	44.61		106.75	3072.20	46.20
35	19-35	35	3026.00	22.08	66.67	176.54		484.30	3081.92	55.92
H16	35-H16	TU16	3026.00		20.00	25.00		7.80	3081.92	55.92
36	35-36	36	3026.00	22.08	15.28	176.54		5885.48	3081.86	55.86
37	36-37	37	3026.00	3.41	243.05	60.02		123.46	3075.95	49.95
38	37-38	38	3026.00	1.39	42.91	30.94		15.54	3070.85	44.85
H17	38-H17	TU17	3026.00	1.39	20.00	27.27	40.00	13.48	3066.47	40.47
39	37-39	39	3026.00	2.02	22.24	41.60		27.90	3074.71	48.71
H18	39-H18	TU18	3026.00	2.02	20.00	27.59	40.00	125.62	3066.47	40.47
40	39-40	40	3026.00		202.61	41.60		27.90	3074.71	48.71
H21	40-H21	TU21	3026.00		20.00	27.90		54.67	3074.71	48.71
41	36-41	41	3026.00	18.67	86.24	176.54		484.30	3081.61	55.61
H19	41-H19	TU19	3026.00		20.00	35.81		48.21	3081.61	55.61
42	41-42	42	3026.00	18.67	46.46	180.74		507.32	3081.50	55.50
H20	42-H20	TU20	3026.00		20.00	30.24		179.82	3081.50	55.50
43	42-43	43	3026.00	18.67	241.92	180.74		1830.15	3080.88	54.88
44	43-44	44	3026.00	18.67	72.15	180.74		507.32	3080.69	54.69
H22	44-H22	TU22	3026.00		20.00	30.32		107.85	3080.69	54.69
45	44-45	45	3026.00	18.67	144.40	180.74		507.32	3080.32	54.32
H23	45-H23	TU23	3026.00		20.00	51.11		207.24	3080.32	54.32
46	45-46	46	3026.00	18.67	98.96	180.74		3334.09	3080.07	54.07
47	46-47	47	3026.00		131.44	85.53		115.79	3080.07	54.07
H24	47-H24	TU24	3026.00		20.00	42.48		21.94	3080.07	54.07
48	47-48	48	3026.00		15.10	47.57		36.35	3080.07	54.07
H25	48-H25	TU25	3026.00		20.00	37.14		161.08	3080.07	54.07
49	46-49	49	3026.00	18.67	144.47	164.26		618.94	3079.48	53.48
50	49-50	50	3026.00	18.67	29.47	169.05		3315.66	3079.38	53.38
51	50-51	51	3026.00	18.67	149.17	169.05		556.13	3078.85	52.85
52	51-52	52	3026.00	3.51	25.02	50.77		41.34	3077.41	51.41
H26	52-H26	TU26	3026.00	3.51	20.00	32.97	40.00	61.78	3067.93	41.93
53	52-53	53	3026.00		70.09	56.09		50.33	3077.41	51.41
H27	53-H27	TU27	3026.00		20.00	33.85		169.75	3077.41	51.41
54	51-54	54	3026.00	15.16	182.88	147.40		928.26	3077.99	51.99
55	54-55	55	3026.00	15.16	54.74	147.40		578.59	3077.73	51.73
56	55-56	56	3026.00	0.84	34.12	53.68		46.16	3077.61	51.61
H28	56-H28	TU28	3026.00		20.00	43.08		78.46	3077.61	51.61
57	56-57	57	3026.00	0.84	52.49	26.45		11.41	3072.19	46.19
H29	57-H29	TU29	3026.00	0.84	20.00	22.98	40.00	8.66	3068.10	42.10
58	55-58	58	3026.00	14.32	20.05	132.37		274.28	3077.59	51.59
H30	58-H30	TU30	3026.00		20.00	30.39		20.61	3077.59	51.59
59	58-59	59	3026.00	14.32	27.46	132.37		5252.17	3077.39	51.39
60	59-60	60	3026.00	14.32	382.98	132.37		274.28	3074.66	48.66
H31	60-H31	TU31	3026.00	1.48	20.00	25.91	40.00	117.03	3068.33	42.33
61	60-61	61	3026.00	12.84	213.67	117.20		218.26	3072.41	46.41
62	61-62	62	3026.00		20.24	36.69		21.77	3072.41	46.41
H32	62-H32	TU32	3026.00		20.00	32.13		41.29	3072.41	46.41
63	61-63	63	3026.00	12.84	49.30	115.30		414.30	3071.85	45.85
64	63-64	64	3026.00	5.44	39.68	115.30		599.00	3071.75	45.75
65	64-65	65	3026.00		57.37	56.13		50.40	3071.75	45.75
H33	65-H33	TU33	3026.00		20.00	38.88		103.95	3071.75	45.75
66	64-66	66	3026.00	5.44	85.17	95.30		85.79	3071.24	45.24
67	66-67	68	3026.00	5.44	11.97	59.33		56.23	3070.52	44.52

Turno 2										
Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
1			4083.70							
2	1-2	1	3075.00	34.93	125.37				3092.68	17.68
3	2-3	2	3052.00	34.93	361.26				3091.77	39.77
H01	3-H1	TU1	3052.00		20.00				3091.77	39.77
111	3-V1	3	3050.00	34.93	246.69				3089.64	39.64
4	V1-4	4	3028.00	34.93	49.80				3089.21	61.21
5	4-5	5	3021.00	34.93	27.44				3088.97	67.97
6	5-6	6	3028.00	34.93	48.22				3088.55	60.55
7	6-7	7	3043.00	34.93	49.65				3088.12	45.12
8	7-8	8	3042.00	34.93	64.66				3087.56	45.56
9	8-9	9	3027.50	34.93	336.55				3084.64	57.14
H02	9-H2	TU2	3027.50	1.35	20.00		40.00		3067.50	40.00
10	9-10	10	3026.00	33.58	115.03				3083.70	57.70
H03	10-H3	TU3	3026.00	1.58	20.00		40.00		3066.00	40.00
11	10-11	11	3026.00	32.00	102.64				3082.93	56.93
H04	11-H4	TU4	3026.00		20.00				3082.93	56.93
12	11-12	12	3026.00	32.00	39.43				3082.64	56.64
H05	12-H5	TU5	3026.00	1.61	20.00		40.00		3082.51	56.51
13	12-13	13	3026.00	30.38	32.39				3082.28	56.28
14	13-14	14	3026.00	30.38	56.50				3081.89	55.89
15	14-15	15	3026.00	30.38	144.20				3080.88	54.88
16	15-16	16	3026.00	30.38	5.07				3080.85	54.85
17	16-17	17	3026.00	30.38	50.63				3080.50	54.50
18	17-18	18	3026.00	30.38	116.70				3079.69	53.69
19	18-19	19	3026.00	30.38	86.35				3079.09	53.09
20	19-21	20	3026.00	11.70	13.35				3078.83	52.83
H06	20-H6	TU6	3026.00		20.00				3078.83	52.83
21	20-21	21	3026.00	11.70	113.96				3076.46	50.46
22	21-22	22	3026.00	3.58	83.30				3071.27	45.27
H07	22-H7	TU7	3026.00	1.51	20.00		40.00		3066.00	40.00
23	22-23	23	3026.00	2.07	86.48				3067.00	41.00
H08	23-H8	TU8	3026.00	2.07	20.00		40.00		3066.00	40.00
24	21-24	24	3026.00	8.13	4.72				3076.40	50.40
25	24-25	25	3026.00	8.13	203.57				3072.84	46.84
H09	25-H9	TU9	3026.00		20.00				3072.84	46.84
26	25-26	26	3026.00	8.13	147.41				3070.26	44.26
H10	26-H10	TU10	3026.00	1.90	20.00		40.00		3066.00	40.00
27	26-27	27	3026.00	6.22	83.27				3069.06	43.06
28	27-28	28	3026.00	4.71	59.64				3066.77	40.77
H11	28-H11	TU11	3026.00	4.71	20.00		40.00		3066.00	40.00
29	27-29	29	3026.00	1.52	95.13				3068.77	42.77
H12	29-H12	TU12	3026.00		20.00				3068.77	42.77
30	29-30	30	3026.00	1.52	33.83				3068.53	42.53
31	30-31	31	3026.00		93.16				3068.53	42.53
H13	31-H13	TU13	3026.00		20.00				3068.53	42.53
32	30-32	32	3026.00	1.52	46.94				3068.21	42.21
H14	32-H14	TU14	3026.00		20.00				3068.21	42.21
33	32-33	33	3026.00	1.52	164.21				3066.62	40.62
34	33-34	34	3026.00	1.52	155.93				3065.11	39.11
H15	34-H15	TU15	3026.00	1.52	20.00		40.00		3064.64	38.64
35	19-35	35	3026.00	18.68	66.67				3078.90	52.90
H16	35-H16	TU16	3026.00	1.99	20.00		40.00		3065.93	39.93
36	35-36	36	3026.00	16.69	15.28				3078.86	52.86
37	36-37	37	3026.00		243.05				3078.86	52.86
38	37-38	38	3026.00		42.91				3078.86	52.86
H17	38-H17	TU17	3026.00		20.00				3078.86	52.86
39	37-39	39	3026.00		22.24				3078.86	52.86
H18	39-H18	TU18	3026.00		20.00				3078.86	52.86

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

40	39-40	40	3026.00			202.61				3078.86	52.86
H21	40-H21	TU21	3026.00			20.00				3078.86	52.86
41	36-41	41	3026.00	16.69		86.24				3078.66	52.66
H19	41-H19	TU19	3026.00	5.06		20.00		40.00		3066.18	40.18
42	41-42	42	3026.00	11.63		46.46				3078.61	52.61
H20	42-H20	TU20	3026.00			20.00				3078.61	52.61
43	42-43	43	3026.00	11.63		241.92				3078.34	52.34
44	43-44	44	3026.00	11.63		72.15				3078.26	52.26
H22	44-H22	TU22	3026.00			20.00				3078.26	52.26
45	44-45	45	3026.00	11.63		144.40				3078.11	52.11
H23	45-H23	TU23	3026.00			20.00				3078.11	52.11
46	45-46	46	3026.00	11.63		98.96				3078.00	52.00
47	46-47	47	3026.00			131.44				3078.00	52.00
H24	47-H24	TU24	3026.00			20.00				3078.00	52.00
48	47-48	48	3026.00			15.10				3078.00	52.00
H25	48-H25	TU25	3026.00			20.00				3078.00	52.00
49	46-49	49	3026.00	11.63		144.47				3077.75	51.75
50	49-50	50	3026.00	11.63		29.47				3077.71	51.71
51	50-51	51	3026.00	11.63		149.17				3077.48	51.48
52	51-52	52	3026.00			25.02				3077.48	51.48
H26	52-H26	TU26	3026.00			20.00				3077.48	51.48
53	52-53	53	3026.00			70.09				3077.48	51.48
H27	53-H27	TU27	3026.00			20.00				3077.48	51.48
54	51-54	54	3026.00	11.63		182.88				3076.95	50.95
55	54-55	55	3026.00	11.63		54.74				3076.79	50.79
56	55-56	56	3026.00			34.12				3076.79	50.79
H28	56-H28	TU28	3026.00			20.00				3076.79	50.79
57	56-57	57	3026.00			52.49				3076.79	50.79
H29	57-H29	TU29	3026.00			20.00				3076.79	50.79
58	55-58	58	3026.00	11.63		20.05				3076.69	50.69
H30	58-H30	TU30	3026.00	2.85		20.00		40.00		3067.03	41.03
59	58-59	59	3026.00	8.78		27.46				3076.61	50.61
60	59-60	60	3026.00	8.78		382.98				3075.48	49.48
H31	60-H31	TU31	3026.00			20.00				3075.48	49.48
61	60-61	61	3026.00	8.78		213.67				3074.35	48.35
62	61-62	62	3026.00			20.24				3074.35	48.35
H32	62-H32	TU32	3026.00			20.00				3074.35	48.35
63	61-63	63	3026.00	8.78		49.30				3074.07	48.07
64	63-64	64	3026.00	1.93		39.68				3074.05	48.05
65	64-65	65	3026.00			57.37				3074.05	48.05
H33	65-H33	TU33	3026.00			20.00				3074.05	48.05
66	64-66	66	3026.00	1.93		85.17				3073.97	47.97
67	66-67	68	3026.00			11.97				3073.97	47.97

**Turno 3**

Nudo [1]	Nin-Nfin [2]	ID Linea [3]	Cota [m] [4]	Caudal lin. [L/s] [5]	Longitud [m] [6]	Diam. [mm] [7]	Pmin [mca] [8]	Costo tub [\$] [9]	Alt. Piez [m] [10]	Presión [m] [11]
1			4083.70							
2	1-2	1	3075.00	38.28	125.37				3092.63	17.63
3	2-3	2	3052.00	38.28	361.26				3091.55	39.55
H01	3-H1	TU1	3052.00		20.00				3091.55	39.55
111	3-V1	3	3050.00	38.28	246.69				3089.03	39.03
4	V1-4	4	3028.00	38.28	49.80				3088.52	60.52
5	4-5	5	3021.00	38.28	27.44				3088.24	67.24
6	5-6	6	3028.00	38.28	48.22				3087.74	59.74
7	6-7	7	3043.00	38.28	49.65				3087.23	44.23
8	7-8	8	3042.00	38.28	64.66				3086.57	44.57
9	8-9	9	3027.50	38.28	336.55				3083.11	55.61
H02	9-H2	TU2	3027.50		20.00				3083.11	55.61
10	9-10	10	3026.00	38.28	115.03				3081.93	55.93

H03	10-H3	TU3	3026.00		20.00		3081.93	55.93
11	10-11	11	3026.00	38.28	102.64		3080.86	54.86
H04	11-H4	TU4	3026.00		20.00		3080.86	54.86
12	11-12	12	3026.00	38.28	39.43		3080.44	54.44
H05	12-H5	TU5	3026.00		20.00		3080.44	54.44
13	12-13	13	3026.00	38.28	32.39		3080.10	54.10
14	13-14	14	3026.00	38.28	56.50		3079.50	53.50
15	14-15	15	3026.00	38.28	144.20		3077.97	51.97
16	15-16	16	3026.00	38.28	5.07		3077.92	51.92
17	16-17	17	3026.00	38.28	50.63		3077.38	51.38
18	17-18	18	3026.00	38.28	116.70		3076.14	50.14
19	18-19	19	3026.00	38.28	86.35		3075.23	49.23
20	19-21	20	3026.00	6.88	13.35		3075.13	49.13
H06	20-H6	TU6	3026.00	2.51	20.00	40.00	3066.00	40.00
21	20-21	21	3026.00	4.37	113.96		3074.73	48.73
22	21-22	22	3026.00		83.30		3074.73	48.73
H07	22-H7	TU7	3026.00		20.00		3074.73	48.73
23	22-23	23	3026.00		86.48		3074.73	48.73
H08	23-H8	TU8	3026.00		20.00		3074.73	48.73
24	21-24	24	3026.00	4.37	4.72		3074.71	48.71
25	24-25	25	3026.00	4.37	203.57		3073.54	47.54
H09	25-H9	TU9	3026.00		20.00		3073.54	47.54
26	25-26	26	3026.00	4.37	147.41		3072.70	46.70
H10	26-H10	TU10	3026.00		20.00		3072.70	46.70
27	26-27	27	3026.00	4.37	83.27		3072.07	46.07
28	27-28	28	3026.00		59.64		3072.07	46.07
H11	28-H11	TU11	3026.00		20.00		3072.07	46.07
29	27-29	29	3026.00	4.37	95.13		3070.13	44.13
H12	29-H12	TU12	3026.00	0.57	20.00	40.00	3066.22	40.22
30	29-30	30	3026.00	3.80	33.83		3068.92	42.92
31	30-31	31	3026.00		93.16		3068.92	42.92
H13	31-H13	TU13	3026.00		20.00		3068.92	42.92
32	30-32	32	3026.00	3.80	46.94		3067.23	41.23
H14	32-H14	TU14	3026.00	3.80	20.00	40.00	3064.85	38.85
33	32-33	33	3026.00		164.21		3067.23	41.23
34	33-34	34	3026.00		155.93		3067.23	41.23
H15	34-H15	TU15	3026.00		20.00		3067.23	41.23
35	19-35	35	3026.00	31.40	66.67		3074.73	48.73
H16	35-H16	TU16	3026.00		20.00		3074.73	48.73
36	35-36	36	3026.00	31.40	15.28		3074.62	48.62
37	36-37	37	3026.00	1.32	243.05		3073.54	47.54
38	37-38	38	3026.00		42.91		3073.54	47.54
H17	38-H17	TU17	3026.00		20.00		3073.54	47.54
39	37-39	39	3026.00	1.32	22.24		3072.97	46.97
H18	39-H18	TU18	3026.00		20.00		3072.97	46.97
40	39-40	40	3026.00	1.32	202.61		3067.73	41.73
H21	40-H21	TU21	3026.00	1.32	20.00	40.00	3064.16	38.16
41	36-41	41	3026.00	30.08	86.24		3074.03	48.03
H19	41-H19	TU19	3026.00		20.00		3074.03	48.03
42	41-42	42	3026.00	30.08	46.46		3073.75	47.75
H20	42-H20	TU20	3026.00	2.38	20.00	40.00	3066.65	40.65
43	42-43	43	3026.00	27.70	241.92		3072.48	46.48
44	43-44	44	3026.00	27.70	72.15		3072.10	46.10
H22	44-H22	TU22	3026.00	2.13	20.00	40.00	3066.39	40.39
45	44-45	45	3026.00	25.57	144.40		3071.45	45.45
H23	45-H23	TU23	3026.00	8.24	20.00	40.00	3066.10	40.10
46	45-46	46	3026.00	17.32	98.96		3071.23	45.23
47	46-47	47	3026.00	5.87	131.44		3069.69	43.69
H24	47-H24	TU24	3026.00	3.62	20.00	40.00	3066.79	40.79
48	47-48	48	3026.00	2.26	15.10		3069.15	43.15

*Diseño óptimo de sistemas de riego a presión para su explotación a turnos*

H25	48-H25	TU25	3026.00	2.26	20.00	40.00	3066.79	40.79
49	46-49	49	3026.00	11.45	144.47		3070.98	44.98
50	49-50	50	3026.00	11.45	29.47		3070.94	44.94
51	50-51	51	3026.00	11.45	149.17		3070.72	44.72
52	51-52	52	3026.00	1.76	25.02		3070.31	44.31
H26	52-H26	TU26	3026.00		20.00		3070.31	44.31
53	52-53	53	3026.00	1.76	70.09		3069.58	43.58
H27	53-H27	TU27	3026.00	1.76	20.00	40.00	3067.22	41.22
54	51-54	54	3026.00	9.68	182.88		3070.34	44.34
55	54-55	55	3026.00	9.68	54.74		3070.23	44.23
56	55-56	56	3026.00	2.93	34.12		3069.14	43.14
H28	56-H28	TU28	3026.00	2.93	20.00	40.00	3067.30	41.30
57	56-57	57	3026.00		52.49		3069.14	43.14
H29	57-H29	TU29	3026.00		20.00		3069.14	43.14
58	55-58	58	3026.00	6.75	20.05		3070.19	44.19
H30	58-H30	TU30	3026.00		20.00		3070.19	44.19
59	58-59	59	3026.00	6.75	27.46		3070.14	44.14
60	59-60	60	3026.00	6.75	382.98		3069.43	43.43
H31	60-H31	TU31	3026.00		20.00		3069.43	43.43
61	60-61	61	3026.00	6.75	213.67		3068.73	42.73
62	61-62	62	3026.00	1.08	20.24		3068.05	42.05
H32	62-H32	TU32	3026.00	1.08	20.00	40.00	3066.79	40.79
63	61-63	63	3026.00	5.67	49.30		3068.60	42.60
64	63-64	64	3026.00	1.64	39.68		3068.59	42.59
65	64-65	65	3026.00	1.64	57.37		3068.07	42.07
H33	65-H33	TU33	3026.00	1.64	20.00	40.00	3067.01	41.01
66	64-66	66	3026.00		85.17		3068.59	42.59
67	66-67	68	3026.00		11.97		3068.59	42.59

**Tabla I.7. Diseño hidráulico de la red San Rafael, luego de implementar AG-PNL**

ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]	ID tub	Diam [mm]
1	229.43	TU10	30.85	TU24	42.48	70	95.30
2	229.43	27	83.68	48	47.57	71	101.60
TU1	98.65	28	61.62	TU25	37.14	72	91.59
3	177.90	TU11	61.61	49	164.26	73	91.59
4	177.85	29	68.35	50	169.05	74	51.92
5	177.83	TU12	20.00	51	169.05	TU37	33.58
6	177.78	30	57.68	52	50.77	75	91.59
7	177.85	31	68.02	TU26	32.97	TU38	40.41
8	177.84	TU13	48.05	53	56.09	76	94.95
9	177.71	32	57.68	TU27	33.85	TU39	45.59
TU2	20.43	TU14	45.09	54	147.40	77	99.59
10	177.56	33	53.74	55	147.40	78	28.84
TU3	21.53	34	53.74	56	53.68	TU40	25.67
11	177.23	TU15	44.61	TU28	43.08	79	27.49



TU4	31.54	35	176.54	57	26.45	TU41	21.44
12	176.88	TU16	25.00	TU29	22.98	80	86.23
TU5	59.72	36	176.54	58	132.37	81	21.70
13	176.54	37	60.02	TU30	30.39	TU42	20.00
14	176.55	38	30.94	59	132.37	82	79.12
15	176.55	TU17	27.27	60	132.37	83	57.46
16	179.22	39	41.60	TU31	25.91	TU43	28.65
17	176.55	TU18	27.59	61	117.20	84	49.19
18	176.54	40	41.60	62	36.69	TU44	28.80
19	176.54	TU21	27.90	TU32	32.13	85	97.50
20	99.99	41	176.54	63	115.30	86	57.50
TU6	29.30	TU19	35.81	64	115.30	TU45	45.49
21	98.39	42	180.74	65	56.13	87	97.50
22	50.33	TU20	30.24	TU33	38.88	TU46	39.24
TU7	27.07	43	180.74	66	95.30	88	57.50
23	43.04	44	180.74	68	59.33	TU47	48.69
TU8	42.96	TU22	30.32	TU34	52.03	89	42.84
24	95.38	45	180.74	69	34.01	<u>TU48</u>	<u>42.00</u>
25	88.91	TU23	51.11	TU35	34.01		
TU9	20.00	46	180.74	67	59.33		
26	88.92	47	85.53	TU36	31.20		

**Tabla I.8. Resultados de asignación de turno con modelo AG-PNL en cada hidrante de la Red de Riego San Rafael**

Nudo	Turno	Q [L/s]	Nudo	Turno	Q [L/s]
3	1	1.42	48	3	2.26
9	2	1.35	52	1	3.51
10	2	1.58	53	3	1.76
11	1	1.83	56	3	2.93
12	2	1.61	57	1	0.84
20	3	2.51	58	2	2.85
22	2	1.51	60	1	1.48
23	2	2.07	62	3	1.08
25	1	0.29	65	3	1.64
26	2	1.90	67	1	4.89
28	2	4.71	68	1	0.55
29	3	0.57	69	2	1.93
31	1	5.42	74	3	0.86
32	3	3.80	75	1	3.08
34	2	1.52	76	3	1.75
35	2	1.99	78	2	1.22
38	1	1.39	79	2	0.51
39	1	2.02	81	2	0.45
41	2	5.06	83	1	0.98
42	3	2.38	84	1	0.62
40	3	1.32	86	1	2.71
44	3	2.13	87	3	1.42
45	3	8.24	88	2	2.66
47	3	3.62	89	2	2.01

**Tabla I.9. Resultados de cumplimiento de la Fiabilidad de presión por hidrante de la Red de Riego San Rafael**

Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>	Nro. Hid.	ID NUDO	N <sub>E</sub>	FP <sub>n</sub>
1	H02	312	1.00	25	H37	285	0.95
2	H03	250	1.00	26	H12	254	0.94
3	H04	273	1.00	27	H39	270	0.94
4	H05	264	1.00	28	H33	274	0.93
5	H06	251	1.00	29	H35	272	0.93
6	H16	297	1.00	30	H42	269	0.93
7	H19	292	1.00	31	H40	339	0.91
8	H20	355	1.00	32	H41	321	0.91
9	H22	250	1.00	33	H36	273	0.89
10	H23	277	1.00	34	H38	290	0.89
11	H25	308	1.00	35	H11	271	0.87
12	H09	284	1.00	36	H43	271	0.87
13	H08	274	1.00	37	H44	280	0.86
14	H24	248	1.00	38	H46	290	0.86
15	H07	216	1.00	39	H17	367	0.82
16	H32	293	0.99	40	H34	243	0.77
17	H27	287	0.99	41	H15	179	0.74
18	H31	400	0.98	42	H21	361	0.70
19	H28	284	0.98	43	H45	261	0.67
20	H30	278	0.98	44	H48	257	0.65
21	H26	275	0.98	45	H47	220	0.63
22	H10	268	0.97	46	H14	223	0.61
23	H18	304	0.97	47	H13	294	0.51
24	H29	290	0.95	48	H01	261	0.50

$\Sigma$	43.03
<i>IFCT</i>	0.90

**Tabla I.10. Simulación de N<sub>T</sub> y Flexibilidad. Red San Rafael**

NT	Flexibilidad
960	0.90

# ÍNDICES

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Evolución de la tierra bajo cultivos de regadío y de secano .....	2
Figura 1.2. Superficie y Producción Agropecuaria .....	4
Figura 1.3. Distribucion de fuentes para riego en Ecuador .....	6
Figura 1.4. Esquema general de los capítulos .....	13
Figura 3.1. Área equipada para riego en el mundo.....	30
Figura 3.2. Esquema red ramificada con un único nudo de altura piezométrica conocida .....	32
Figura 3.3. Circulación de flujo de una línea .....	34
Figura 3.4. Esquema de componentes de una RCRP .....	36
Figura 3.5. Esquema de un sistema básico de comunicación remota en hidrantes y concentrador en un telecontrol.....	47
Figura 3.6. Costos que se generan en una red de distribución .....	50
Figura 4.1. Red ramificada, estructura y forma arborescente .....	56
Figura 4.2 Variación de costos anuales con el diámetro .....	58
Figura 4.3. Frontera de Pareto de costos de construcción frente a los costos de operación.....	59
Figura 4.4. Taxonomía de métodos de optimización de redes de agua.....	61
Figura 4.5. Gráficas de funciones cóncavas y convexas de una dimensión.....	63
Figura 4.6. Línea formada por varios tramos de diversos diámetros .....	68
Figura 4.7. Mínimos locales y globales .....	69
Figura 4.8. Red ejemplo para aplicar PNL .....	73
Figura 4.9. Diversos valores de la Función Objetivo .....	75
Figura 4.10. Punto inicial, restricción y espacio de búsqueda .....	76
Figura 4.11. Violación de las restricciones impuestas .....	78
Figura 4.12. Función objetivo no excede el valor adoptado como umbral .....	79
Figura 4.13. Serie de tuberías alimentada desde depósito de nivel fijo .....	81
Figura 4.14. Red con 8 hidrantes usada para ilustrar el ejemplo de uso del MSE-M en el diseño racional de una red a turnos .....	88
Figura 4.15. Secuencia de dimensionado por el MSE-M para una red a turnos	89
Figura 4.16. Representación de gen y cadena de un AG.....	92
Figura 4.17. Operación de reproducción en AG.....	94

Figura 4.18. Operación de cruzamiento en AG .....	96
Figura 4.19. Proceso de mutación de un AG .....	97
Figura 4.20. Operación de mutación en AG .....	98
Figura 5.1. Diagrama de flujo de método de optimización AG-PNL .....	106
Figura 5.2. Topología de red 4 líneas, T1, T2 y T3 .....	111
Figura 5.3. Topología de red 4 líneas con demandas en el Turno 1 .....	112
Figura 5.4. Topología de red 4 líneas con demandas en Turno 2 .....	113
Figura 5.5. Topología de red 4 líneas con demandas en Turno 3 .....	114
Figura 5.6. Esquema de la secuencia de implementación de AG-PNL .....	118
Figura 5.7. Topología de la Comunidad de Regantes Cariyacu .....	121
Figura 6.1 Correlación superficie de riego y su Nro. Hidrantes .....	138
Figura 6.2. Correlación: Caudal requerido y Superficie regada en casos de estudio .....	141
Figura 6.3. Topología Red Callén Inferior .....	143
Figura 6.4. Topología Red Tuncarta .....	145
Figura 6.5. Topología Red Cariyacu .....	147
Figura 6.6. Topología Red Valcuerna .....	149
Figura 6.7. Topología Red Cenicero .....	151
Figura 6.8. Topología Red Molinar I .....	153
Figura 6.9. Topología Red Navarra .....	155
Figura 6.10. Topología Red Callén Superior .....	157
Figura 6.11. Topología Red San Rafael .....	159
Figura 6.12. Variación real de los costos de tuberías empleadas .....	162
Figura 6.13. Red Tuncarta, evolución del AG .....	165
Figura 6.14. Relación Número de escenarios - Flexibilidad .....	170
Figura 6.15. Asimetría de valores del parámetro Flexibilidad en Presiones de cada hidrante ( $FP_n$ ) y costo de redes de estudio .....	171
Figura 7.1. Caudales de diseño redes a la demanda y turnos en un ramal con hidrantes de muy diferente tiempo de apertura .....	183
Figura 7.2. Resultados de diseño con métodos 2, 3,4,5 red Callén Inferior ....	185
Figura 7.3. Resultados de diseño con métodos 2,3,4,5 red Tuncarta .....	186
Figura 7.4. Resultados de diseño con métodos 2,3,4,5 red Cariyacu .....	187
Figura 7.5. Resultados de diseño con métodos 2, 3,4,5 red Valcuerna .....	189
Figura 7.6. Resultados de diseño con métodos 2,3,4,5 red Cenicero .....	190
Figura 7.7. Resultados de diseño con métodos 2,3,4,5 red Navarra .....	192

---

Figura 7.8. Resultados de diseño con métodos 2,3,4,5 red Callén Superior ....	193
Figura 7.9. Resultados de diseño con métodos 2,3,4,5 red San Rafael.....	194
Figura 7.10. Resultados de diseño con métodos 2,3,4,5 red Molinar I.....	196
Figura 7.11. Relación de incremento de costo vs incremento de IFCT, M3/M2 .....	201
Figura 7.12. Relación de incremento de costo vs incremento de IFCT, M4/M2 .....	202
Figura 7.13. Relación de incremento de costo vs incremento de IFCT, M5/M2 .....	203
Figura 7.14. Criterio para definir Modalidad de riego conveniente Casos de Estudio.....	205

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1.1. Síntesis de problemáticas detectadas en la gestión del riego .....	5
Tabla 3.1. Ventajas e inconvenientes del riego en lámina libre .....	28
Tabla 3.2. Ventajas e inconvenientes del riego presurizado .....	29
Tabla 3.3. Costos invertidos por sistema de riego .....	29
Tabla 3.4. Ventajas de operación a la demanda y turnos .....	45
Tabla 4.1. Aplicación de la ecuación de Mougny para diversos diámetros de tubería.....	55
Tabla 4.2. Cruzamiento simple (punto aleatorio de cruce) .....	96
Tabla 4.3. Cruzamiento doble (punto aleatorio de cruce) .....	97
Tabla 5.1. Términos equivalentes de la evolución natural y AG .....	107
Tabla 5.2. Parámetros de entrada del AG en el método híbrido .....	110
Tabla 5.3. ID Nudos y cotas. Caso RCRP “Cariyacu”.....	122
Tabla 5.4. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Cariyacu” .....	123
Tabla 5.5. Valores de demanda en hidrantes. Caso RCRP “Cariyacu” .....	124
Tabla 5.6. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Cariyacu” .....	125
Tabla 5.7. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Cariyacu” .....	126
Tabla 5.8. Variables de entrada topología. Caso RCRP “Cariyacu” .....	127
Tabla 5.9. Celdas para configurar la PNL .....	129
Tabla 5.10. Diseño hidráulico de la red Cariyacu, luego de implementar AG-PNL .....	131
Tabla 5.11. Resultados de asignación de turno con modelo AG-PNL en cada hidrante de la red de riego Cariyacu .....	132
Tabla 6.1. Área de riego, número de hidrantes de redes de estudio.....	137
Tabla 6.2. Cota de embalse y presión de consigna redes de estudio.....	139
Tabla 6.3. Número de turno y tiempos de riego de redes de estudio .....	140
Tabla 6.4. Datos agronómicos e hidráulicos Red Callén Inferior .....	142
Tabla 6.5. Datos agronómicos e hidráulicos Red Tuncarta.....	144
Tabla 6.6. Datos agronómicos e hidráulicos Red Cariyacu .....	146
Tabla 6.7. Datos agronómicos e hidráulicos Red Valcuerna .....	148
Tabla 6.8. Datos agronómicos e hidráulicos Red Cenicero .....	150
Tabla 6.9. Datos agronómicos e hidráulicos Red Molinar I.....	152
Tabla 6.10. Datos agronómicos e hidráulicos Red Navarra.....	154
Tabla 6.11. Datos agronómicos e hidráulicos Red Callén Superior .....	156

---

Tabla 6.12. Datos agronómicos e hidráulicos Red San Rafael .....	158
Tabla 6.13. Datos y criterios para diseño de las redes .....	160
Tabla 6.14. Gama de tuberías empleada en diseño de redes de riego .....	161
Tabla 6.15. Resultados de análisis de ajuste de $P_c$ y $P_m$ del AG .....	164
Tabla 6.16. Resultados Fiabilidad de presión por hidrante red Cariyacu .....	169
Tabla 6.17. Resultados de Costo y Flexibilidad con asignaciones heurísticas de turnos, Red Callén Inferior .....	174
Tabla 6.18. Resultados de Costo y Flexibilidad con asignaciones heurísticas de turnos, Red Valcuerna.....	174
Tabla 6.19. Resultados de Costo y Flexibilidad con asignaciones heurísticas de turnos, Red Cenicero.....	175
Tabla 6.20. Resultados de Costo y Flexibilidad con asignaciones heurísticas de turnos, Red Molinar I.....	175
Tabla 6.21. Garantías de suministro utilizadas.....	176
Tabla 6.22. Características generales de redes de estudio.....	177
Tabla 6.23. Tiempos de riego en el Turno 1, y Turno 2.....	178
Tabla 7.1. Costos de diseño de redes seleccionadas con M1, M2, M3, M4 y M5 .....	180
Tabla 7.2. Valores de IFCT obtenidos por los métodos: M1, M2, M3, M4 y M5 .....	181
Tabla 7.3. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red Callén Inferior .....	184
Tabla 7.4. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red Tuncarta .....	185
Tabla 7.5. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red Cariyacu .....	187
Tabla 7.6. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red Valcuerna .....	188
Tabla 7.7. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red Cenicero .....	190
Tabla 7.8. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red Navarra.....	191
Tabla 7.9. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red Callén Superior .....	193

Tabla 7.10. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red San Rafael .....	194
Tabla 7.11. Distribución de caudales de cabecera por turno y caudal de diseño a la demanda, Red Molinar I .....	195
Tabla 7.12. Resultados de costos y de IFCT para los Casos de Estudio .....	197
Tabla 7.13. Valores de $\Delta$ costos y de $\Delta$ IFCT para Redes de Estudio .....	200



---

**ÍNDICE DE ECUACIONES**

Ecuación 3.1.....	31
Ecuación 3.2.....	32
Ecuación 3.3.....	32
Ecuación 3.4.....	33
Ecuación 3.5.....	33
Ecuación 3.6.....	34
Ecuación 3.7.....	34
Ecuación 3.8.....	35
Ecuación 3.9.....	35
Ecuación 3.10.....	38
Ecuación 3.11.....	39
Ecuación 3.12.....	39
Ecuación 3.13.....	40
Ecuación 3.14.....	40
Ecuación 3.15.....	40
Ecuación 3.16.....	41
Ecuación 3.17.....	42
Ecuación 3.18.....	42
Ecuación 3.19.....	43
Ecuación 3.20.....	43
Ecuación 3.21.....	43
Ecuación 3.22.....	43
Ecuación 3.23.....	51
Ecuación 4.1.....	54
Ecuación 4.2.....	54
Ecuación 4.3.....	55
Ecuación 4.4.....	55
Ecuación 4.5.....	56
Ecuación 4.6.....	56
Ecuación 4.7.....	56
Ecuación 4.8.....	56
Ecuación 4.9.....	57
Ecuación 4.10.....	57

Ecuación 4.11.....	58
Ecuación 4.12.....	63
Ecuación 4.13.....	63
Ecuación 4.14.....	63
Ecuación 4.15.....	63
Ecuación 4.16.....	65
Ecuación 4.17.....	67
Ecuación 4.18.....	67
Ecuación 4.19.....	68
Ecuación 4.20.....	68
Ecuación 4.21.....	69
Ecuación 4.22.....	70
Ecuación 4.23.....	70
Ecuación 4.24.....	71
Ecuación 4.25.....	71
Ecuación 4.26.....	71
Ecuación 4.27.....	71
Ecuación 4.28.....	73
Ecuación 4.29.....	74
Ecuación 4.30.....	74
Ecuación 4.31.....	74
Ecuación 4.32.....	74
Ecuación 4.33.....	74
Ecuación 4.34.....	75
Ecuación 4.35.....	75
Ecuación 4.36.....	75
Ecuación 4.37.....	75
Ecuación 4.38.....	76
Ecuación 4.39.....	76
Ecuación 4.40.....	76
Ecuación 4.41.....	77
Ecuación 4.42.....	77
Ecuación 4.43.....	77
Ecuación 4.44.....	78
Ecuación 4.45.....	78

---

Ecuación 4.46.....	78
Ecuación 4.47.....	78
Ecuación 4.48.....	78
Ecuación 4.49.....	79
Ecuación 4.50.....	79
Ecuación 4.51.....	79
Ecuación 4.52.....	79
Ecuación 4.53.....	81
Ecuación 4.54.....	81
Ecuación 4.55.....	82
Ecuación 4.56.....	82
Ecuación 4.57.....	82
Ecuación 4.58.....	82
Ecuación 4.59.....	83
Ecuación 4.60.....	83
Ecuación 4.61.....	83
Ecuación 4.62.....	83
Ecuación 4.63.....	84
Ecuación 4.64.....	84
Ecuación 4.65.....	84
Ecuación 4.66.....	85
Ecuación 4.67.....	85
Ecuación 4.68.....	94
Ecuación 4.69.....	95
Ecuación 4.70.....	95
Ecuación 5.1.....	106
Ecuación 5.2.....	110
Ecuación 5.3.....	112
Ecuación 5.4.....	112
Ecuación 5.5.....	112
Ecuación 5.6.....	112
Ecuación 5.7.....	112
Ecuación 5.8.....	112
Ecuación 5.9.....	113
Ecuación 5.10.....	113

---

Ecuación 5.11.....	113
Ecuación 5.12.....	113
Ecuación 5.13.....	113
Ecuación 5.14.....	113
Ecuación 5.15.....	114
Ecuación 5.16.....	114
Ecuación 5.17.....	114
Ecuación 5.18.....	114
Ecuación 5.19.....	114
Ecuación 5.20.....	115
Ecuación 5.21.....	115
Ecuación 5.22.....	115
Ecuación 5.23.....	115
Ecuación 5.24.....	115
Ecuación 5.25.....	115
Ecuación 5.26.....	115
Ecuación 5.27.....	115
Ecuación 5.28.....	116
Ecuación 5.29.....	116
Ecuación 5.30.....	116
Ecuación 5.31.....	116
Ecuación 5.32.....	116
Ecuación 5.33.....	116
Ecuación 5.34.....	116
Ecuación 5.35.....	116
Ecuación 5.36.....	116
Ecuación 5.37.....	116
Ecuación 5.38.....	116
Ecuación 6.1.....	161
Ecuación 6.2.....	166
Ecuación 6.3.....	167
Ecuación 6.4.....	167
Ecuación 6.5.....	170
Ecuación 7.1.....	204