



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**Máster en Ingeniería
Hidráulica y Medio
Ambiente**

Título de Trabajo Fin de Máster:

**OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE
LAS REDES DE ABASTECIMIENTO
DE MURCIA**

Intensificación:

HIDRÁULICA URBANA

Autor:

OYARZÚN CONSTABEL, SEBASTIÁN ALONSO

Director/es:

DR. IGLESIAS REY, PEDRO LUÍS

DR. MARTÍNEZ SOLANO, FRANCISCO JAVIER

Fecha: *Octubre, 2011*

Título del trabajo de Fin de Máster
**OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS REDES DE ABASTECIMIENTO
 DE EMUASA**

Autor: OYARZÚN CONSTABEL, SEBASTIÁN ALONSO

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/>		
Director	IGLESIAS REY, PEDRO LUÍS MARTÍNEZ SOLANO, FRANCISCO JAVIER	Lugar de Realización	VALENCIA
Codirector1		Fecha de Lectura	OCT. 2011

Summary

This raises the economic optimization of the supply network of the Campo de Murcia, which is managed and administered by Empresa Municipal de Agua y Saneamiento de Murcia (EMUASA). This requires finding the set of maneuvers that minimize the energy costs associated with the operation of the system. A detailed diagram representative of the network is presented in EPANET, which contains 2363 nodes, 2599 pipes, 9 tanks, 2 water supply points, 28 valves and 9 pumping sets with controls associated to them.

The optimization of the network is divided into two stages; the first of them considers skeletonization techniques to generate a reduced analytical model of the network. As a result of the skeletonization process, it seeks to reduce the network to a size sufficient for the optimization software to be able to operate in an expeditious manner. The reduced analysis model that has been obtained has 65 nodes, 59 pipes and 8 valves, keeping intact the number of tanks and pumping sets on the network. A 98% reduction of the elements is achieved, allowing also maintain a high degree of similarity in the hydraulic behavior of the system and reducing computation times by 92%.

The second stage of the software allows the use of HOLORED, optimization software designed by the Department of Hydraulic Engineering and Environment as part of the collaboration agreement signed between the Polytechnic University of Valencia and EMUASA. HOLORED optimizer uses a base inspired by genetic algorithms, creating solutions from strings that contain the different variables of each network element. During the course of optimization, an evolution of the solutions occurs through processes of crossover and mutation of these chains. These processes allow the generation of new chains offering different solutions in the search for an optimum. Once a point of optimization is reach according to a parameter, the solution is accepted as an optimal solution.

As a result of this optimization process, we present the necessary operating controls in pumping sets, the initial optimal level of deposits, the setting on the valves and the possible maneuvers in pipes; which will ensure an optimal operating cost maintaining a minimum required performance level. In this study, cost reductions close to 8% have been achieved, further improving the functioning of the network.

KEYWORDS:

Skeletonization, Energy Optimization, Genetic Algorithm, HOLORED.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I. INTRODUCCION	1
1.1 Introducción.	1
1.2 Objetivos del Trabajo de Fin de Máster.	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Metodología utilizada	5
CAPITULO II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	7
2.1 Descripción de la red	7
2.1.1 Elementos del modelo de EPANET: características de la red	9
2.1.2 Funcionamiento esquemático de la red.	11
2.2 Escenarios de optimización.	14
2.3 Objetivos de funcionamiento	17
CAPITULO III.- MODELO DE ANALISIS SIMPLIFICADO DE LA RED	19
3.1 Introducción	19
3.1.1 Concepto de Esqueletización	20
3.1.2 Ejemplo de esqueletización	20
3.2 Métodos de Esqueletización	23
3.2.1 Depuración de datos	23
3.2.2 Tramos Ramificados	24
3.2.3 Eliminación de tuberías en serie.	26
3.2.3.1 Unión de dos líneas con propiedades idénticas	26
3.2.3.2 Unión de dos líneas con propiedades diferentes	27
3.2.4 Eliminación de tuberías en paralelo	28
3.2.5 Agrupación de Pseudonodos	29
3.2.6 Otros métodos de esqueletización	30
3.3 Esqueletización realizada en el proyecto	31
3.3.1 Primera etapa: Tramos Ramificados	32

3.3.2	Segunda etapa: Eliminación de tuberías en serie	36
3.3.3	Tercera etapa: Agrupación de Pseudonodos	38
3.3.4	Cuarta etapa: Depuración de datos	39
3.4	Comparación de resultados	41
3.5	Pérdida de datos	47
CAPITULO IV.- MODELOS DE OPTIMIZACION		49
4.1	Introducción.	49
4.2	Modelos heurísticos de optimización basados en evolución.	50
4.2.1	Tipos de modelos	51
4.2.1.1	Algoritmo genético (GA)	51
4.2.1.2	Optimización basada en cúmulos de partículas (PSO)	53
4.2.1.3	Optimización basada en los saltos de ranas (SFL)	54
4.2.1.4	Optimización basada en colonias de hormigas (ACO)	55
4.2.1.5	Optimización basada en la búsqueda de la armonía (HS)	56
4.2.2	Parámetros de calibración de los modelos utilizados	57
4.3	Herramienta HOLORED	58
4.3.1	Funcionamiento general de la herramienta	58
4.3.2	Funcionamiento particular al caso de estudio	62
CAPITULO V.- ANALISIS Y RESULTADOS		65
5.1	Introducción	65
5.2	Simulación de los escenarios.	65
5.3	Optimización de los escenarios.	72
5.4	Comparación de resultados generales	78
CAPITULO VI.- CONCLUSIONES		79
6.1	Conclusiones	79
6.2	Desarrollos futuros.	81
BIBLIOGRAFIA		83
ANEXO 1. CURVAS DE CONSIGNA		87

CAPITULO I. INTRODUCCION

1.1 Introducción.

Optimizar el costo de instalación, operación y mantenimiento asociados a una red de abastecimiento de agua es un ámbito cada vez más importante actualmente. Siendo el objetivo del diseño óptimo, encontrar todas las características de los componentes de un sistema de distribución de agua: tuberías, depósitos, válvulas y equipos de bombeo; que permitan minimizar el costo total del sistema, manteniendo unas condiciones mínimas de servicio.

Sin embargo en la actualidad, las grandes redes de abastecimiento ya se encuentran en su mayoría diseñadas y actualmente en funcionamiento, por lo que gran parte de sus variables de diseño se encuentran previamente definidas: diámetros de tuberías, volumen de los depósitos, equipos de bombeos y válvulas. Es por esto que reducir el consumo energético de las redes de distribución de agua nunca ha tenido más importancia que en la actualidad, siendo esta la variable más factible de optimizar.

El mayor ahorro de energía se puede obtener de una cuidadosa programación de la operación de los equipos de bombeo, pudiendo ser controlados por el nivel de los depósitos o mediante programación horaria de encendido y apagado de estas. Las maniobras de regulación con válvulas y la operación de tuberías que se abren o cierran, son también un factor importante a considerar para una correcta optimización energética de la operación de una red de abastecimiento.

Sin embargo, el crecimiento y complejidad de estas instalaciones hace que el número de combinaciones posibles para optimizar el funcionamiento energético crezca de forma exponencial. Es por esto que es necesaria la utilización de algoritmos de optimización que permitan evaluar de forma automática las diferentes posibilidades de funcionamiento.

Para ello se han desarrollado algoritmos de programación lineal (Jowitt y Germanopoulos, 1992), programación no lineal (Chase y Ormsbee, 1993; Yu *et al*, 1994), programación dinámica (Lansey y Awumah. 1994; Nitivattananon *et al*, 1996), heurísticos (Ormsbee y Reddy, 1995; Leon *et al*, 2000) y meta-heurísticos (Savic *et al*, 1997; Van Zyl *et al*, 2004; Rao *et al*, 2005). Si bien estos algoritmos permiten la

búsqueda de una solución económicamente óptima de costos de bombeo, es posible que ésta se asocie a tiempos de cálculo no compatibles con los tiempos de operación de un sistema de abastecimiento de agua, debido principalmente a los tamaños de las redes y al nivel de detalle que estas poseen. Complementariamente a estas herramientas, es necesaria la creación de modelos de análisis simplificados que sean representativos de las redes originales a optimizar.

Mediante este proyecto se presenta la red de abastecimiento del Campo de Murcia para su optimización energética, el cual se enmarca dentro del convenio de cooperación existente entre el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y la Empresa Municipal de Aguas de Murcia (EMUASA). Esta red al encontrarse actualmente en operación posee unas características físicas definidas: diámetros y longitudes de tuberías, posición y tamaño de depósitos, equipos de bombeo y sus curvas características, válvulas y consignas asociadas. Para lograr la optimización de esta red se analizarán diversos algoritmos de optimización, permitiendo así definir la técnica a utilizar que llevará a determinar las condiciones de operación que minimicen el costo energético de dicha red, manteniendo las condiciones mínimas de servicio.

Para el estudio de esta red, se diseñó un modelo de análisis reducido que es representativo de la misma, ya que ésta al abastecer a grandes cantidades de usuarios poseía un gran número de elementos (tuberías y nodos), dificultando el manejo de su optimización. Para ello se implementaron técnicas de esqueletización en la red, mediante diversos procedimientos que permitieron reducirla a un tamaño suficiente para que los algoritmos de optimización pudieran operar en tiempos mucho menores que los asociados a la optimización de la red original. El modelo simplificado, mantiene todas las características hidráulicas de la red original, así como todos los elementos necesarios para su optimización energética (bombas y depósitos).

La herramienta utilizada para la optimización de la red de abastecimientos del Campo de Murcia fue el software HOLORED, programa de optimización diseñado para trabajar en base a algoritmos evolutivos. Esta herramienta que ha sido diseñada dentro del marco del convenio establecido entre la UPV y EMUASA, permite un trabajo en conjunto con EPANET el cual es utilizado como plataforma de simulación y cálculo hidráulico.

HOLORED permite ingresar como variables de optimización todos los elementos relacionados al costo energético de la red, así como las condiciones que los demás

elementos de la red deben cumplir. Las características de cada elemento a ingresar en el software fueron:

- **Bombas:** El tipo de control que poseen, pudiendo ser mediante el nivel de un depósito, una programación horaria o un control asociado a EPANET.
- **Válvulas:** Se permitía la variación de su consigna. La cual también puede ser controlada por el nivel de un depósito o una programación horaria.
- **Tuberías:** La posibilidad de cambiar su estado (abierto o cerrado), permitiendo simular fallas en la red.
- **Nodos:** La presión mínima requerida.

En conjunto con el ingreso de estas variables, fue necesario para la optimización ingresar los parámetros asociados al algoritmo evolutivo utilizado por el software. Dentro de estas técnicas de optimización, se optó por la utilización de algoritmos genéticos, por lo que fue necesario determinar que valores de: número de población, índice de cruzamiento e índice de mutación; permitirían obtener una solución óptima y eficiente. Para ello varias simulaciones fueron desarrolladas con el objetivo de conocer la capacidad de convergencia del modelo, la calidad de la solución óptima encontrada, medir la velocidad de cálculo de la herramienta HOLORED, y finalmente dar solución al problema de diseño óptimo energético de la red de abastecimiento de aguas del Campo de Murcia.

1.2 Objetivos del Trabajo de Fin de Máster.

1.2.1 Objetivo general

- Minimizar el coste de operación de la red de abastecimiento del Campo de Murcia, mediante la utilización de algoritmos meta-heurísticos para su optimización.

1.2.2 Objetivos específicos

- Conocer y comprender las técnicas de esqueletización más utilizadas.
- Simplificar la red mediante su esqueletización, obteniendo así un modelo de análisis reducido de la red.
- Conocer, analizar y comparar diferentes modelos de optimización meta-heurística utilizados en sistemas de abastecimiento de aguas.
- Mejorar las utilidades y manejar la herramienta HOLORED.
- Determinar las operaciones de bombeo que para cada escenario planteado permiten minimizar los costes de operación.
- Comparar los costos de la red original y simplificada.

1.3 Metodología utilizada

La metodología consistió en una etapa teórica y una etapa práctica del estudio. Para el desarrollo de la parte teórica fue necesario un análisis bibliográfico a modo de conocer las diferentes técnicas de esqueletización que se utilizan hoy en día para la reducción de grandes redes de abastecimiento, permitiendo así obtener el modelo de análisis reducido de la red. A su vez fue necesario el estudio de diversos algoritmos de optimización utilizados para evaluar el rendimiento de modelos de distribución de agua, y así conocer sus características, parámetros asociados a cada uno de estos y la calibración de los mismos para su correcta utilización.

Una vez analizada esta información, fue necesario aplicar estos conocimientos a la red estudiada. Para ello se dividió el trabajo en varias etapas consecutivas, las cuales fueron:

- Conocer el funcionamiento completo de la red a optimizar.
- Aplicar los métodos de esqueletización conocidos a la red estudiada, con el fin de obtener un modelo de análisis reducido de la misma.
- Ejecutar varias simulaciones con modelos de optimización meta -heurísticos, utilizando para esto el modelo de análisis reducido de la red.
- Analizar los resultados obtenidos de los modelos de optimización y calibrar sus parámetros.
- Obtener los resultados finales, con el modelo de optimización ya seleccionado y calibrado.
- Comparar y analizar los resultados obtenidos.

Finalmente al comparar y analizar los resultados obtenidos se desarrollaron conclusiones asociadas a las diferentes etapas de este proyecto.

La red de abastecimiento de aguas comprende aproximadamente un área de 200Km^2 y posee una longitud aproximada de 90Km de tuberías instaladas. Las cotas de los elementos de la red varían desde los 80m hasta los 350m de altura, lo que presenta una red con desniveles significativos, por lo que condiciona la necesidad de utilizar equipos de bombeo. Está dividida en 20 distritos o área de medición (DMA) y cada uno de ellos posee un patrón de consumo asociado; siendo el consumo total de la red por día de 6155m^3 aproximadamente.

Tabla 1: DMA y sus patrones de consumo.

Nombre del DMA	Patrón de Consumo
Aeropuerto	GENERAL
Avilese	Avilese
Baños y Mendigo	GENERAL
Cabecico del Rey	GENERAL
Corvera Alto	Corvera Alto
Corvera Bajo	Corvera Bajo
Corvera Golf	GENERAL
El Escobar	GENERAL
El Valle Golf	El Valle Golf
Hacienda Riquelme	GENERAL
La Murta	La Murta
La Peraleja	La Peraleja
La Tercia	La Tercia
Los Bronchos	Los Bronchos
Los Martínez	Los Martínez
Mosa	Mosa
Sucina	Sucina
Trampolín	Trampolín
Valladolises	Valladolises
Venta Manolita	Venta Manolita

Para encontrar el punto de funcionamiento óptimo económico de la red, se consideraron los arranques y paradas de equipos de bombeo, así como los niveles en los depósitos al principio y final del día. Un nivel mínimo de presiones debe ser mantenido para permitir el funcionamiento de la red y garantizar a los abonados un servicio de calidad.

Para el análisis de la red, fue facilitado por la empresa EMUASA un modelo básico de la red en EPANET, obtenido a partir de los datos de un SIG y del telecontrol que esta empresa posee. Este modelo contempla en detalle todos los elementos existentes en

la red de abastecimiento: nodos de consumo, líneas, depósitos, válvulas, equipos de bombeo, entre otros.

2.1.1 Elementos del modelo de EPANET: características de la red

El modelo en EPANET representativo de la red real, cuenta con 2363 nodos de consumo y 2599 líneas que representan a las tuberías presentes en el sistema, cuyos diámetros varían desde los 18mm hasta 400mm. Cuenta además con 9 depósitos que en conjunto poseen capacidad para almacenar más de $26000m^3$, 2 puntos de alimentación que corresponden a MCT-AVILESES (H=85.4m) y MCT-ROLDAN (H=80m) y está sectorizada en 20 DMA cada uno con su correspondiente patrón de consumo discretizado en forma diez minutas.

Posee 9 bombas cada una con su respectiva curva de bombeo asociada (una de ellas fuera de funcionamiento). Dado que el presente estudio se desarrolló en una fase inicial del convenio de colaboración entre la UPV y EMUASA, no se entró en detalle en el estudio del rendimiento de cada uno de los grupos de bombeo. Se admitió por tanto que dicho rendimiento era constante e igual al 75%.

Posee 28 válvulas como elementos controladores de la presión en la red:

- 20 Válvulas Reductoras de Presión.
- 3 Válvulas Sostenedoras de Presión.
- 3 Válvulas de Rotura de Carga.
- 1 Válvula Limitadora de Caudal.
- 1 Válvula de Regulación.

El modelo suministrado por EMUASA posee además controles simples que regulan el arranque y paro de los equipos de bombeo, los cuales son controlados ya sea por el nivel de los depósitos o mediante opciones temporales. Estos controles pretenden simular el funcionamiento y modo de operación del sistema.

Para el cálculo de las pérdidas de carga en el modelo se han utilizado las ecuaciones de Darcy- Weisbach. La simulación se realizará durante un periodo de 24 horas con un intervalo de análisis de 10 minutos, tiempo suficiente para comprender el comportamiento del sistema y evaluar la variación de los niveles en los depósitos, los caudales bombeados por los equipos de bombeo y la variación de la presión en los nodos.

Para que el modelo de distribución de agua represente correctamente la red en la realidad es necesario calibrarlo, para ello es muy importante la toma de datos en el estudio de campo que permitan asociar a los elementos sus respectivas características de forma inequívoca. En el presente proyecto y puesto que el modelo original en EPANET es suministrado por EMUASA, se asumió que todos los valores asociados a las diversas variables del mismo son correctos y representan verazmente la realidad de la red de abastecimiento.

Las tarifas eléctricas utilizadas en el modelo fueron extraídas del plan tarifario del año 2011 de la empresa IBERDROLA (<http://www.iberdrola.es>), coste fijo de la energía se asumió solo para fines de cálculo en 0.1 €/Kw hora. La discriminación horaria que se utilizó es la presentada por dicha empresa y se puede apreciar en la siguiente figura:

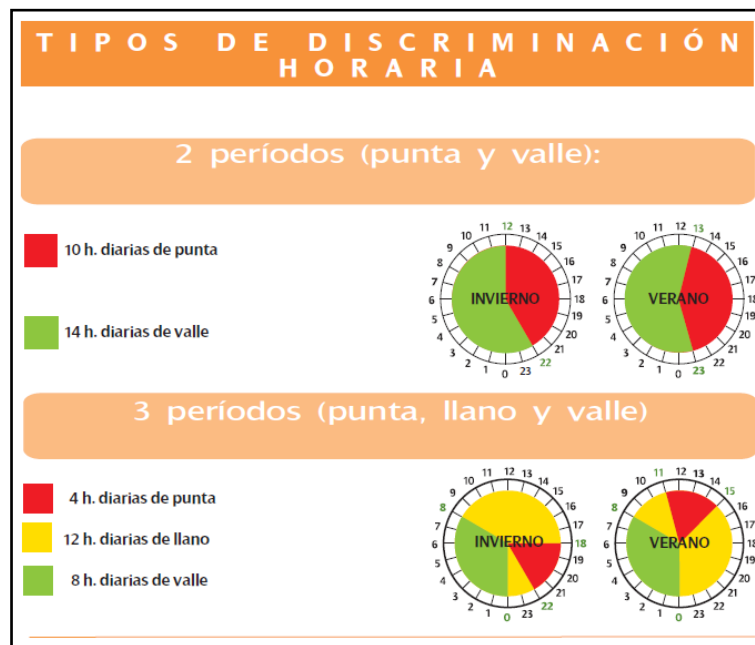


Figura 2: Periodos tarifarios (<http://www.iberdrola.es>).

La discriminación horaria que se ha utilizado es la compuesta por tres periodos (punta, llano y valle) utilizando la distribución correspondiente al periodo de verano.

El segundo sector (ubicado a la izquierda y centro del esquema) está alimentado por la toma de MCT-ROLDAN. Al pie de esta toma existe un equipo de bombeo BROLDAN, que funciona contra el depósito DMOSA el cual alimenta a los DMA de “Mosa” y “El Valle Golf”.

De este mismo depósito (DMOSA) además sale una línea de DN300 que se bifurca en el punto PCC1531, a partir de esta bifurcación podemos observar dos ramificaciones. La primera de ellas después de pasar por el nodo PCC1375, alimenta los DMA de “Trampolín” y “Venta Manolita”, para posteriormente encontrarse con el depósito DMARTINEZ, este a sus pies conecta con el equipo de bombeo BMARTINEZ el cual suministra presión al DMA de “Los Martínez”.

La segunda ramificación continúa hasta encontrar una nueva bifurcación en el nodo PCC1117. A partir de esta bifurcación dos nuevos ramales son identificados; el primero de ellos coge caudal del equipo de bombeo BnBYM que entrega presión al DMA “Baños y Mendigos” y además alimenta el depósito DBYM que regula el mismo DMA.

Del segundo ramal que sale del nodo PCC1117 continúa una tubería de DN300 que llega a un nuevo punto de bifurcación en PCC3036. De este punto salen tres ramales. Los dos primeros de ellos se extienden hasta llegar a dos equipos de bombeo respectivos BGOLFLAMURTA que funciona contra el depósito DLAMURTA que alimenta al DMA de “La Murta”; y BGOLFCORVERA que funciona contra el depósito DCORVERAGOLF el cual alimenta los DMA de “Corvera Golf”, “Corvera Alto” y “Corvera Bajo”.

El tercer ramal que sale del nodo PCC3036 continúa en tubería de DN300 hasta una nueva bifurcación en PCC3009, de esta bifurcación salen dos ramales. El primero de ellos llena el depósito DAEROPUERTO que alimenta el DMA “Aeropuerto”, el segundo ramal alimenta el DMA de “Cabecico del Rey” y posteriormente llena el depósito DVALLADOLISES el que alimenta al DMA de “Valladolises”.

Los arranques y paros de los equipos de bombeo están controlados ya sea por los niveles de ciertos depósitos, mediante temporización o bien se encuentran en funcionamiento continuo las 24 horas del día. Una tabla resumen del sistema de control que actualmente presenta cada equipo de bombeo es el que se presenta a continuación:

Tabla 2: Control de cada equipo de bombeo

Estación de bombeo	Elemento de control	Observaciones
BINFIERNOS	Depósito DAVILESES	
BMARTINEZ	Ninguno	Funciona 24hr.
BAVILESES	Ninguno	Funciona 24hr.
BROLDAN	Depósito DMOSA	
BGOLFCORVERA	Depósito DCORVERAGOLF	
BINIFERNOS2	Depósito DLATERCIA	
BnBYM	Deposito DBYM	
BSUCINA	Ninguno	Fuera de servicio
BGOLFLAMURTA	Depósito DLAMURTA	

De la tabla resumen podemos observar que los equipos de bombeo sujetos a optimización son solo seis.

En conjunto las válvulas más importantes del sistema servirán como elementos optimizadores de coste energético. Para este propósito, algunas de las válvulas originales se mantuvieron en el modelo reducido, de estas solo algunas serán manipuladas. Tanto las que serán maniobradas y sus consignas, como las que no, son presentadas a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 3: Válvulas del modelo reducido.

Nombre de Válvula	Tipo de Válvula	Consigna	Observación
VR38	Reductora	25	Maniobrable
VR70	Sostenedora	29	Maniobrable
VR89	Reductora	35	Maniobrable
VR98	Reductora	50	Maniobrable
VBOYALOSMARTINEZ	Reductora	2.6	No Maniobrable
VBOYAMOSA	Sostenedora	0	No Maniobrable
VBOYAAEROPUERTO	Limitadora de Caudal	120	No Maniobrable
V1	Limitadora de Caudal	4.005	No Maniobrable
V2AEROPUERTO	Rotura de Carga	20	Maniobrable
V4AEROPUERTO	Sostenedora	19	No Maniobrable

La válvula V1 fue introducida en los escenarios para simular de forma correcta el comportamiento de la red del Campo de Murcia.

Con la maniobra de las 5 válvulas que consideraremos como posibles elementos optimizadores será posible dar solución a diversos escenarios de consumo.

Además para estudiar como la red funcionaria frente a posibles fallas del sistema, se implementó la posibilidad de que algunas de las líneas del modelo de simulación

cambiaran su estado de abierto a cerrado durante el día, permitiendo así simular maniobras de operación relacionadas a fallos en el sistema por corte de tuberías.

2.2 Escenarios de optimización.

Una vez conocida la amplitud del problema y la complejidad del modelo completo de la red en detalle, fue necesario plantear la realización de un modelo de análisis reducido de la red. Este modelo de análisis se consiguió aplicando técnicas de esqueletización, permitiendo así generar un escenario representativo y reducido del problema.

Este escenario reducido contempla tan solo 59 líneas y 65 nodos (reducción del 98%), por lo que el entendimiento de la red a través de este es mucho más sencillo, permitiendo así que su optimización de costes sea mucho más eficiente y eficaz. El modelo reducido mantuvo en todo momento las características hidráulicas del sistema original.

Durante el proceso de esqueletización, se origino la necesidad de generar curvas de consigna en determinados tramos de la red que fueron eliminados, de esta forma se pudo relacionar los datos de los elementos eliminados con los que permanecieron en la red reducida.

De esta forma, además de la optimización económica de la red de distribución en su funcionamiento normal de abastecimiento, se planteó la optimización económica de posibles escenarios futuros, de fallo o de funcionamiento singular. Para ello fue necesario definir dichos escenarios y generar para todos ellos un modelo de análisis reducido de la red.

Tras diversas conversaciones con los responsables de la empresa EMUASA, se seleccionaron una serie de escenarios de funcionamiento. Estos escenarios fueron:

- Escenario 0. Funcionamiento normal.
- Escenario 1. Funcionamiento normal teniendo en cuenta que la impulsión de Roldán, actualmente en lámina libre podrá tomar de una conducción en carga, con lo que la nueva altura piezométrica de la misma pasa a 130 m.c.a.
- Escenario 2. Funcionamiento con demandas aumentadas en un 50%.
- Escenario 3. Funcionamiento con posibles fallos de tuberías.
- Escenario 4. Funcionamiento normal, considerando una representación alternativa de las fugas mediante emisores en EPANET.

Para todos estos escenarios los equipos de bombeo que serán optimizados seguirán siendo los mismos, pero además será necesario en algunos casos optimizar el funcionamiento de válvulas o líneas. Fue necesario en algunos casos adaptar la red original de forma que se comportara como estaba previsto en la realidad, para ello algunos controles, válvulas y curvas de bombas fueron modificados.

La confección del escenario 4 y el procedimiento por el cual se calcularon los coeficientes emisores en cada nudo fue:

1º Se representó el volumen de fugas como un valor fijo, considerándolo un porcentaje del volumen total de la demanda que se extrae en cada nodo. En el caso estudiado y dado que se desconoce el porcentaje exacto de fugas en la red, se ha fijado como el 20% del volumen total, por lo que el caudal consumido será el 80% del volumen total extraído en cada nodo.

2º Mediante equilibrio de caudales se puede expresar el consumo total de un nodo como:

$$Q_{Total} = Q_{Consumido} + Q_{fugado} \quad (1)$$

Si se considera que el caudal total puede modelarse como un consumo promedio multiplicado por una curva de modulación de los consumos, que el caudal consumido se puede expresar de la misma forma considerando solo lo que consumen realmente los abonados y que el caudal fugado es dependiente de la raíz de la presión en cada nodo multiplicada por un coeficiente emisor, se puede expresar la ecuación para cada instante del tiempo de la simulación, de la siguiente forma:

$$C_M * Q_m = C_C * Q_C + C_e * \sqrt{P_i} \quad (2)$$

Donde C_M es el coeficiente de modulación, Q_m el caudal medio, C_C y Q_C el coeficiente y caudal de consumo, C_e el coeficiente del emisor y P_i la presión del nodo en cada instante.

3º Calcular el coeficiente emisor mediante el volumen de fugas estimado, el cual se puede extraer de la igualdad parcial de las ecuaciones (1) y (2), en donde se ocuparan las partes relativas al caudal de fuga.

$$Vol_{fugado} = Q_{fugado} * \Delta_t = \sum_{i=1}^T C_e * \sqrt{P_i} * \Delta_t \quad (3)$$

Si despejamos esta ecuación para encontrar el coeficiente emisor en cada nodo, queda la siguiente expresión:

$$C_e = \frac{Vol_{fugado}}{\sum_{i=1}^T \sqrt{P_i} * \Delta t} \quad (4)$$

4º Conocido el coeficiente emisor de cada nodo se despeja la ecuación (2) para conocer los coeficientes de consumo de los mismos en cada instante de la simulación.

$$C_c = \frac{C_M * Q_m - C_c * \sqrt{P_t}}{Q_c} \quad (5)$$

Mediante este procedimiento es posible determinar los coeficientes emisores de cada nodo y los coeficientes de consumo en los mismos para cada instante los cuales pasaran a ser los nuevos coeficientes de modulación en el escenario generado. Con esto se puede asegurar que el volumen total de fugas en la red es el deseado y que los consumos en cada nodo varían de la misma forma en que variaban en la red original sin emisores.

Con este procedimiento los coeficientes emisores que se obtuvieron para la red reducida presente en el escenario 4 fueron:

Tabla 4: Coeficientes Emisores.

Nodo	Coeficiente Emisor
154	1.226
157	0.078
161	0.007
166	0.313
388	0.501
538	0.555
544	0.224
682	2.020
p158	0.397
p161	0.366
PCC0483	0.044
PCC0883	0.003
PCC1050	0.168
PCC2152	2.208
PCC2240	0.052
PCC3171	0.013
PCC3184	0.462
PCC3205	0.233
PAER0018	2.747
PAER0169	0.008

La presencia de coeficientes emisores en la red permitió la optimización de esta mediante la manipulación de válvulas, puesto que al disminuir la presión en los nodos se disminuye el caudal bombeado a cada uno de ellos.

2.3 Objetivos de funcionamiento

Se busca optimizar económicamente el funcionamiento energético de la red de abastecimientos, tanto para su estado de funcionamiento actual como para los escenarios planteados anteriormente.

Para ello el software de optimización se ha diseñado con la finalidad de encontrar la solución óptima de un plan de operación de los equipos de bombeo para un periodo de 24 horas de funcionamiento. Determinando las condiciones propicias de arranque y paro de las bombas, ya sea mediante los niveles de los depósitos o por temporización diaria.

Durante el proceso de optimización es necesario tener en cuenta que las presiones en los nodos deben cumplir un nivel mínimo en todo momento, objetivo que fue logrado mediante la utilización de curvas de consigna. Además es importante considerar, que los niveles de los depósitos al final del día sean iguales a los que había a comienzos de este, puesto que una mejora en la optimización del sistema no puede hacerse a costa de la capacidad de almacenamiento del mismo. Para considerar ambas variables se implementaron sistemas de penalización de costes asociados a cada variable.

Otro aspecto importante para la optimización de costes es la variación diaria de las tarifas eléctricas, teniendo en cuenta que siempre será esperado bombear lo más posible en las horas de menor coste eléctrico. Para ello se consideró una discriminación horaria como la recogida en la figura 2.

De esta manera la función objetivo a optimizar posee la siguiente forma:

$$\sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^{NB} \frac{\gamma * Q_{ij} * H_{ij}}{\eta} * \Delta t_i * C_i + \lambda_1 * \sum_{i=1}^{Ndep} (Z_{ini_i} - Z_{fin_i}) + \sum_{i=1}^{Nnod} \sum_{j=1}^T \lambda_{ij} * (P_{ij_{min}} - P_{ij})$$

Donde T es el tiempo final de la simulación, NB es el número de bombas del sistema, C_i es el coste de la tarifa eléctrica en cada periodo, Ndep es el número de depósitos, Nnod es el número de nodos del sistema, λ_1 es un factor de penalización asociado a niveles en los depósitos y λ_{ij} es un factor de penalización asociado a las presiones mínimas requeridas en los nodos.

CAPITULO III.- MODELO DE ANALISIS SIMPLIFICADO DE LA RED

3.1 Introducción

La simplificación de una red de abastecimiento de agua, como paso intermedio entre el planteamiento del problema y la optimización de este, es una herramienta necesaria debido al tamaño de detalle presente en estas redes. Por lo tanto, una red que contempla todos los elementos de servicio, conexiones, válvulas y todos los demás elementos que hacen funcionar a la red es un gran desafío y puede prestar gran información a las grandes redes de abastecimiento, pero muchas veces toda esta información no es necesaria para evaluar los objetivos buscados.

Un modelo que contemple absolutamente todos los componentes puede ser muy laborioso de interpretar, operar u optimizar. Un modelo completo de una red de abastecimiento puede ser una enorme y compleja red consistente en cientos o miles de elementos discretos, y no todos estos elementos son necesarios para cada aplicación del modelo. Cuando elementos que son ajenos al propósito evaluado están presentes en el modelo; la eficiencia, eficacia, utilidad y enfoque del modelo puede verse seriamente alterado, y el tiempo de cálculo puede ser seriamente incrementado.

En estos casos la red original puede ser aproximada utilizando una red mucho menos detallada, que manteniendo los elementos principales y agrupando los consumos en nodos representativos, pueda permitir una reducción en el número de variables y al mismo tiempo logre mantener las características hidráulicas del modelo, permitiendo así que herramientas de optimización puedan buscar una solución óptima a velocidades más elevadas.

Para ello han sido implementadas técnicas de esqueletización durante los últimos años, buscando un método estandarizado de reducción de la red, lo que permitiría presentar un esquema reducido pero que asemeje en un alto grado de confianza lo que ocurre en el sistema original. Además en muchos casos un alto nivel de detalle de

una red no aporta casi ninguna diferencia en los resultados que se podrían obtener con una red reducida.

3.1.1 Concepto de Esqueletización

Entendemos por esqueletización a una transformación que busca reducir la cantidad de datos o simplificar la forma de un objeto. En sistemas de abastecimiento de agua, se aplica el término al proceso de selección para incluir en un modelo de distribución de agua solamente los elementos o partes del esquema que tengan un impacto significativo en el comportamiento del sistema (Haestad Methods INC, 2002). La parte de la red que no es modelada no es ignorada, por el contrario los efectos que estos elementos contribuyen a la red son considerados mediante las partes del sistema que aún permanecen en la red reducida.

Diferentes grados de esqueletización pueden ser aplicados dependiendo del uso que se le quiera dar al modelo. Para un análisis de costes de energía, un alto grado de esqueletización es preferible (Haestad Methods INC, 2002), para análisis de calidad del agua sin embargo una esqueletización mínima es requerida, puesto que las características relacionadas con tiempos de viaje y “edad” del agua en la red se ven altamente alteradas. Debido a esto es necesario definir varias técnicas automáticas de esqueletización, las cuales han sido desarrolladas para un proceso más estandarizado de esqueletización.

Un ejemplo de la aplicación de estos diferentes niveles puede ser observado en la evolución del ejemplo presentado a continuación.

3.1.2 Ejemplo de esqueletización

La siguiente secuencia de figuras, muestra varios niveles posibles de esqueletización que pueden ser aplicados. La figura 4, muestra la red original existente en un sector del proyecto analizado sin esqueletización previa.

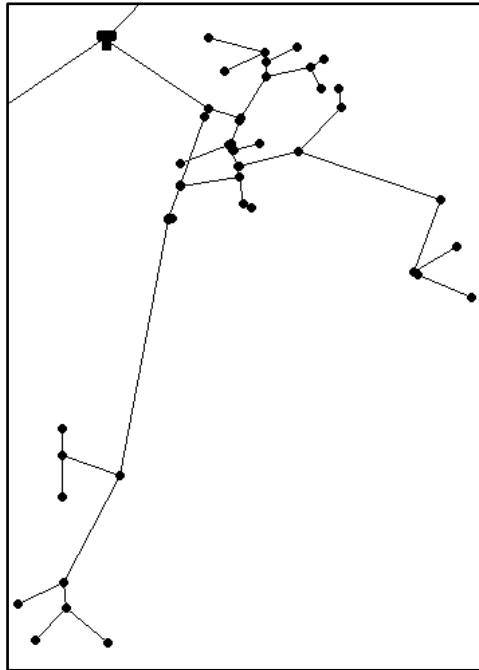


Figura 4: Trazado original de una parte de la red del Campo de Murcia

En este sector de la red, existen 48 nodos y 48 líneas. Cada nodo alimenta una demanda en particular.

El nivel de esqueletización más bajo, consiste en aquel en que todos los nodos finales de tramo son eliminados y cargadas sus demandas a los nodos superiores. Quedando como resultado la red presentada en la figura 5.

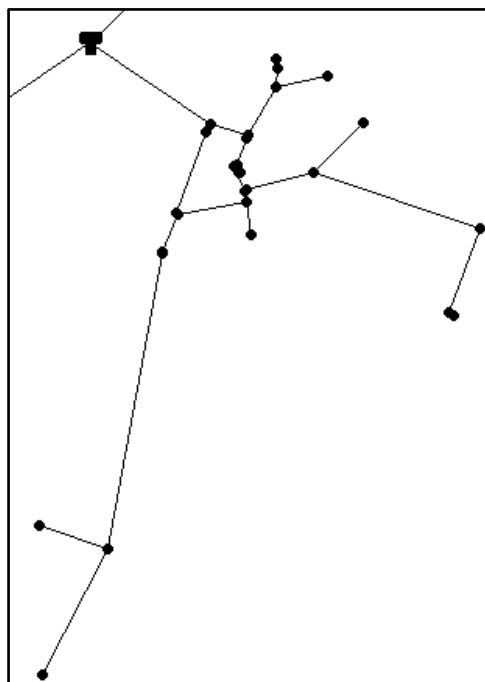


Figura 5: Red resultante del primer proceso de esqueletización.

De esta manera la red quedaria reducida a tan solo 31 nodos y 31 lineas. La unica informacion que se ha perdido es la correspondiente a los nodos finales de tramo.

Un nivel más elevado de esqueletización seria dividir la red en sectores, cada sector posee un nodo de cabecera al cual seran cargadas todas las demandas de los nodos que se ubiquen aguas abajo, estos nodos de cabecera se ubicaran en las intersecciones de tuberias principales. Quedando la red de la siguiente manera (figura 6)

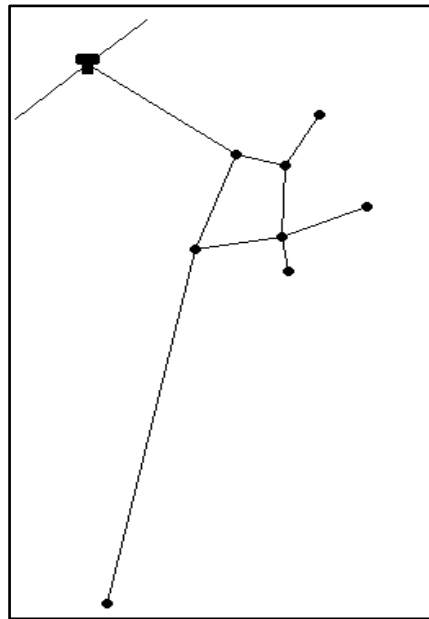


Figura 6: Red resultante de un segundo proceso de esqueletización.

Finalmente para un nivel de esqueletización completa, podremos cargar todas las demandas de los nodos de la red a un unico punto cabecera, el cual contemplará la demanda completa del sistema. Además sera necesario configurar una curva de consigna, la cual permitira “guardar” la información relativa a las presiones minimas necesarias en los nodos que ya no existen en la red.

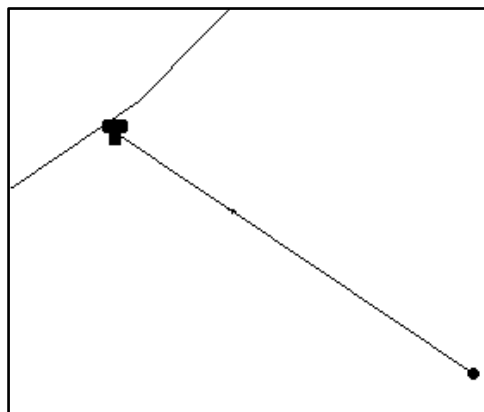


Figura 7: Red con un grado de esqueletización total.

Como se aprecia en este ejemplo, varios niveles de esqueletización pueden ser alcanzados, determinar el nivel de esqueletización deseado depende directamente de las necesidades del modelo reducido. A cada nivel más elementos son removidos por lo que la cantidad de información se va reduciendo.

3.2 Métodos de Esqueletización

Ulanicki *et al* (1996), utiliza un algoritmo para crear modelos reducidos vía esqueletización. El algoritmo procede paso a paso eliminando líneas y nodos, reubicando la demanda del nodo eliminado en el nodo vecino. Obviamente todas las bombas, válvulas y depósitos se mantienen en el modelo reducido, ya que las válvulas y bombas son las variables de decisión en el algoritmo de optimización y el nivel de los depósitos son el resultado de las variables estáticas. La validación del modelo reducido es medida mediante la variación temporal de los niveles en los depósitos, en comparación con la variación de estos calculada con el modelo completo. Una vez que los controles óptimos son encontrados, son utilizados en el modelo completo y la presión en los nodos debe ser cercana a la calculada mediante la red completa.

Debido a que el coste de la energía depende exclusivamente de la operación de los equipos de bombeo y del nivel en los depósitos, está garantizado que el coste total energético de la red reducida será igual al que se obtendría con la red completa.

Las siguientes son descripciones de técnicas de esqueletización que han sido empleadas para alcanzar un nivel de reducción suficiente como para abordar proyectos tales como el realizado en la red de Haifa (Shamir y Salomons, 2008). Generalmente una combinación de estas técnicas es más eficiente que la utilización de solo una de ellas; un proceso que las incluya a todas sería lo ideal.

3.2.1 Depuración de datos

La depuración de datos es el más simple y generalmente el primer paso en la esqueletización. En muchos casos es el único método utilizado, permitiendo reducir en gran medida la red. Este proceso consiste en eliminar todos los elementos que cumplan con una o varias condiciones, como por ejemplo: diámetro, longitud, rugosidad, etc. El criterio puede ser similar a *“eliminar todas las tuberías con longitudes menores a 10m”* o *“eliminar todas las tuberías con diámetros menores a 50mm si el caudal circulante por ellas es menor a 1 l/s”*.

Este método de esqueletización es muy utilizado especialmente en modelos que han sido creados a partir de datos GIS, ya que los mapas de GIS generalmente contienen

mucha información que no es necesaria para un modelo hidráulico. (Haestad Methods INC, 2002)

Un problema con este método es que no hay ninguna consideración con la red asociada. No se considera los efectos de desconectividad que este método podría crear en la red, por lo que existe un gran potencial de error en el proceso de eliminación de nodos o líneas.

Una manera de solucionar este problema consiste en identificar todas las tuberías que no pueden ser eliminadas de la red, a fin de mantener una conectividad. De esta manera se marcan todas las líneas que no pueden ser removidas por condiciones de conectividad o por que invalide la red. Así, para que una línea pueda ser removida, debe considerar dos criterios:

- Poseer el criterio de eliminación.
- No estar marcada como elemento “no removible”

Finalizado el proceso de esqueletización se debe verificar que la conectividad de la red no ha sido alterada.

3.2.2 Tramos Ramificados

Es el proceso mediante el cual se eliminan todos los elementos que están al final de un tramo ramificado. Dado que líneas y nodos son eliminados en este proceso, una parte importante de este método de esqueletización es la reubicación de la demanda de los nodos eliminados, la cual se traspa al nodo que esta al comienzo del tramo ramificado. De esta misma forma una curva de consigna debe ser asociada al nodo en cuestión de modo de no perder la información relacionada a la presión mínima requerida en nodos eliminados del sistema.

Este método se aplica de forma recursiva, ya que al remover las líneas y nodos finales de un tramo ramificado, otros nodos pasaran a ser los nuevos nodos “finales” de la ramificación. Es por esto que los “nuevos nodos finales” pasaran también a ser removidos y el proceso continuara hasta que se encuentre un punto en donde ya no existan nodos o líneas finales de tramos ramificados. Siempre será necesario ir reubicando las demandas hacia aguas arriba del tramo y además las curvas de consigna deberán ir siendo actualizadas a las nuevas condiciones de la red reducida. Este proceso también se puede terminar de forma arbitraria cuando un cierto grado de reducción deseado se halla alcanzado.

Dado que en este método, los nodos finales de tramo que no posean carga no afectan en nada al modelo, y que todos los nodos que si presenten demanda son considerados por los nodos aguas arriba puesto que el agua deberá pasar por ellos de todas formas (incluso sin esqueletización) el comportamiento hidráulico del sistema es inafectado.

Es por esto que este método puede ser muy efectivo en el proceso de esqueletización, en particular en redes que cuenten con un gran número de tramos ramificados.

El único problema que puede presentar este tipo de esqueletización obviamente es que la información y resultados asociados a nodos eliminados del sistema no estarán presentes en el modelo reducido. Solamente una referencia a las presiones mínimas requeridas en cada nodo estaría representada mediante la curva de consigna asociada a cada nodo cabecera que contemple las demandas de los nodos eliminados aguas debajo de él.

Todas estas características hacen de este método parte fundamental en el proceso de esqueletización, ya que las mejoras en cuanto a flexibilidad, eficiencia y la facilidad de uso del modelo reducido en algoritmos de optimización, son significativas.

La figura siguiente muestra el resultado que se puede obtener con la utilización de este método de esqueletización.

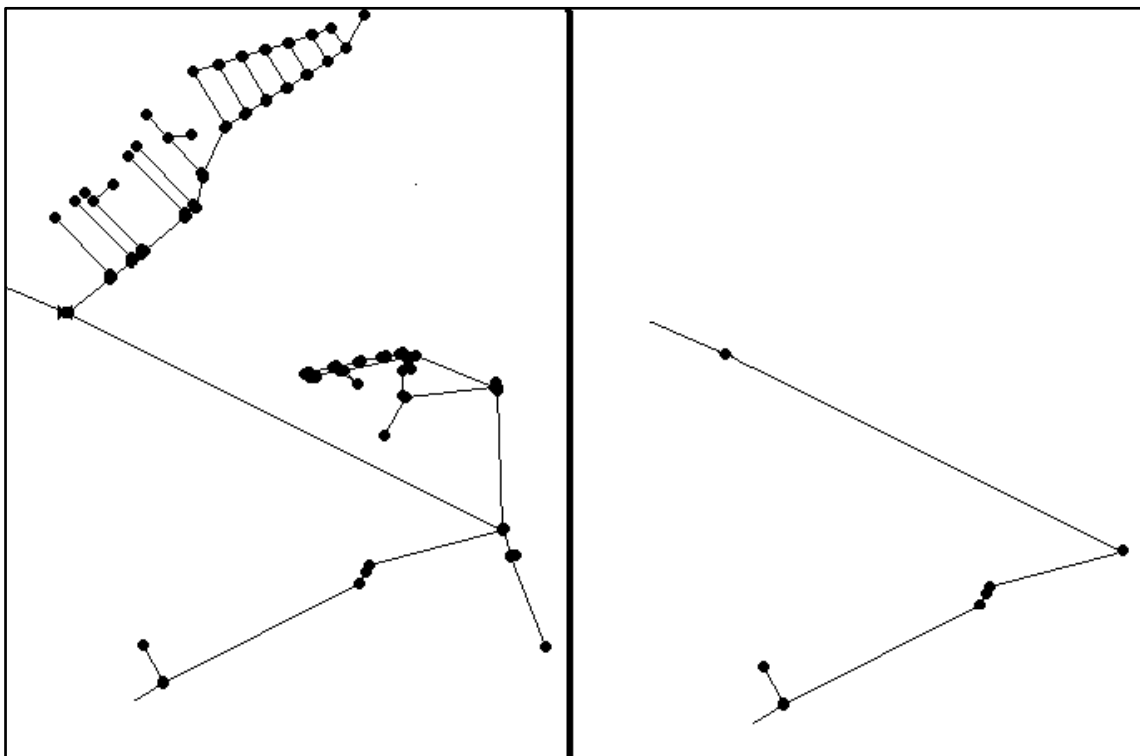


Figura 8: A la izquierda la red sin esqueletización, a la derecha la red tras el proceso de esqueletización de tramos ramificados.

3.2.3 Eliminación de tuberías en serie.

Consiste en la eliminación de nodos que poseen solo dos líneas adyacentes, uniendo estas dos líneas en una sola con nuevas propiedades. Las demandas asociadas a nodos eliminados deben ser reubicadas hacia los nodos vecinos. Para ello diferentes estrategia de repartición de la demanda son presentadas. Algunas de las técnicas más utilizadas son:

- Distribución equitativa de la demanda en los dos nodos vecinos, es decir se carga la mitad de la demanda del nodo eliminado en cada uno de sus vecinos.
- Una distribución asociada a pesos relativos a la distancia que existe con los nodos vecinos.

Es importante sin embargo tener en consideración otros aspectos del nodo eliminado, como la cota a la que este se encuentra en relación con los nodos vecinos.

Para la unión de tuberías es muy importante considerar todos los atributos de estas (diámetro, longitud y rugosidad) ya que la unión de dos líneas debe dar como resultado una línea que al poseer propiedades diferentes represente la existencia de las dos líneas preexistentes.

Para ello existen dos criterios diferentes para unir líneas, uno relativo a líneas con propiedades iguales y otro para líneas con propiedades diferentes. Ya que si bien se desea que las líneas a ser unidas posean propiedades similares, la búsqueda de tuberías que únicamente compartan características similares haría mucho más complejo y menos efectivo este método de esqueletización.

El proceso es muy eficiente cuando se desea eliminar nodos sin demandas y que poseen dos líneas adyacentes con propiedades idénticas, ya que el remover estos nodos sin demanda y unir estas tuberías de propiedades iguales no tiene ningún efecto sobre las características hidráulicas del sistema.

3.2.3.1 Unión de dos líneas con propiedades idénticas

Si dos líneas poseen propiedades idénticas de diámetro y rugosidad, bastara con sumar la longitud de cada una de ellas para poder determinar el largo total de la nueva tubería. Las propiedades de diámetro y rugosidad se mantendrán en la línea resultante. De la misma manera si varias líneas de propiedades idénticas se encuentran segmentadas por nodos sin demanda, todos estos podrán ser eliminados del sistema

en un solo paso y la longitud de la tubería resultante será la suma de todos los segmentos de tubería existentes.

3.2.3.2 Unión de dos líneas con propiedades diferentes

Al igual que en el proceso anterior, si varias líneas aunque de propiedades diferentes posean nodos intermedios que no posean demanda, se podrá realizar la unión de estas de forma simultánea. Sin embargo será necesario considerar las diferentes propiedades de cada tubería, de modo que la tubería resultante sea representativa de todas las que se encontraban previamente, permitiendo mantener las características hidráulicas del sistema original. Para ello es importante considerar las propiedades de diámetro, longitud y rugosidad de cada tramo.

Se debe entonces considerar que la sumatoria de las pérdidas provocadas por cada tramo de tubería, debe ser igual a la pérdida generada en la tubería final. Llevando esto a la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^n \frac{8 * f_i * L_i * Q_i^2}{g * \pi^2 * D_i^5} = \frac{8 * f_{eq} * L_{eq} * Q_T^2}{g * \pi^2 * D_{eq}^5} \quad (6)$$

En donde n son los tramos a unir, $f_i; L_i; Q_i$ y D_i son las propiedades el i-esimo elemento y $f_{eq}; L_{eq}; Q_T$ y D_{eq} son las propiedades del elemento resultante.

Si consideramos el caso en que todos los nodos no presenten demanda, por lo que el caudal circulante por todas las líneas es el mismo, y además consideramos que el factor de fricción es el mismo (o lo suficientemente similar) para todas las líneas, lo que significa que las tuberías son similares o que el margen de diferencia entre ellas es muy pequeño. Podemos llegar a la siguiente expresión reducida del problema:

$$\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{D_i^5} = \frac{L_{eq}}{D_{eq}^5} \quad (7)$$

De esta manera, tenemos una expresión que nos permite calcular la longitud equivalente de la nueva tubería utilizando un diámetro definido, el cual puede ser la moda de los diámetros a unir, aquel que mantenga la longitud equivalente lo más cercana a la suma de las longitudes del tramo original (para mantener la simetría del sistema), o el diámetro de la tubería de mayor longitud.

Si por otra parte, si existiese demanda en los nodos intermedios, este proceso deberá realizarse paso a paso, uniendo un máximo de dos tuberías cada vez y reubicando las

demandas en los nodos mediante algún criterio. Para encontrar la longitud equivalente de la tubería resultante, es importante considerar la ecuación (6) que contempla todas las variables asociadas a las tuberías.

La reducción que se puede lograr con este método, se puede observar en la siguiente figura donde se muestran los diámetros (arriba en mm) y longitudes (abajo en m) de las tuberías.

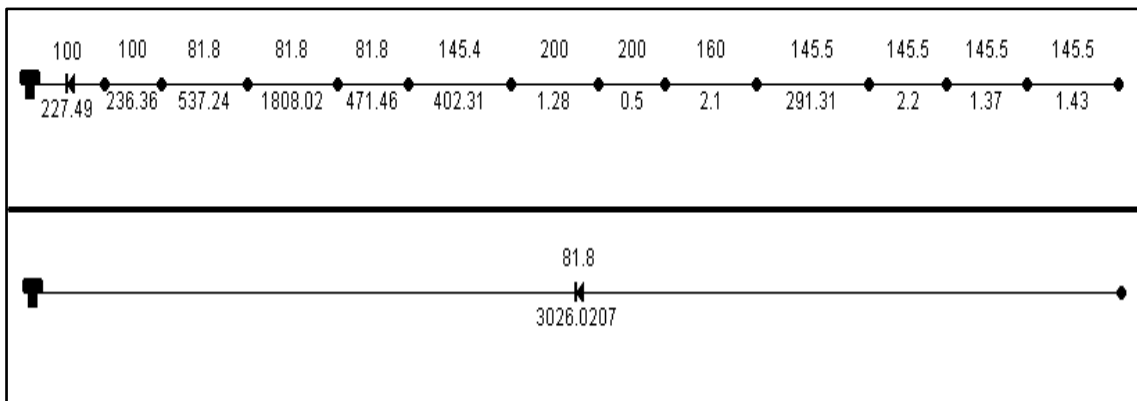


Figura 9: Ejemplo de una esquelización mediante eliminación de líneas con propiedades idénticas. Arriba: red original, abajo: red tras esquelización.

En el ejemplo de la figura, se procedió a mantener el diámetro de tubería que representa a la línea más larga del sistema, diámetro que además daba como resultado el valor más cercano a la suma de las longitudes de todas las líneas.

3.2.4 Eliminación de tuberías en paralelo

Esta técnica se basa en la combinación de tuberías que comparten el mismo par de nodos inicial y final. Haestand Methods INC (2002) presenta un proceso estandarizado para la remoción de tuberías en paralelo que consiste en seleccionar cual será la tubería “dominante”. La longitud de ésta será la longitud de la tubería resultante, así como también el diámetro o la rugosidad de la misma. El usuario debe definir cuál de estos dos parámetros transferir hacia la tubería resultante, si el diámetro o la rugosidad. El valor del otro parámetro se determina utilizando las propiedades de ambas tuberías a fusionar de tal modo que las condiciones hidráulicas del sistema se mantengan como el original.

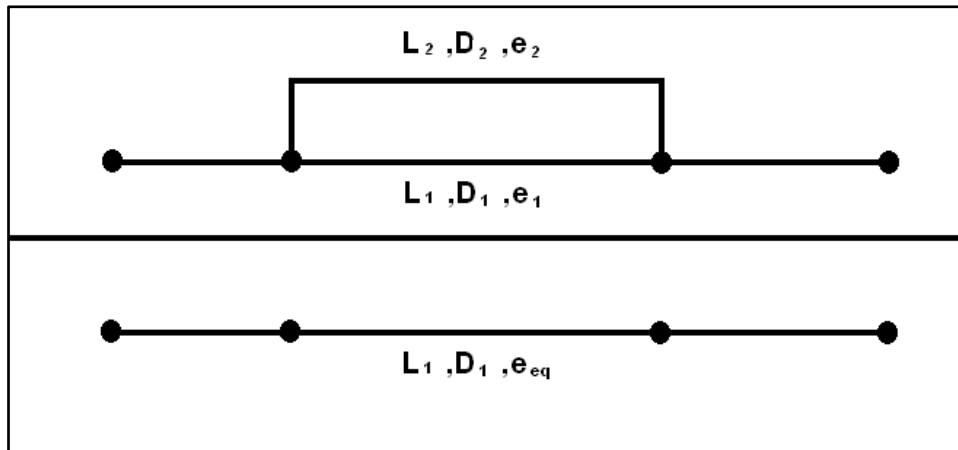


Figura 10: Ejemplo de esqueletización por remoción de tuberías en paralelo. Arriba: red original, abajo: red tras esqueletización.

Debido a que este método de esqueletización solo elimina tuberías (y no nodos), y tiene en consideración las propiedades de las tuberías eliminadas, las características hidráulicas de la red permanecen intactas aumentando así el grado potencial de reducción de la misma.

3.2.5 Agrupación de Pseudonodos

Este método de esqueletización consiste en la agrupación de nodos que se encuentren unidos por tuberías de pequeñas longitudes, tal condición hace que esta agrupación de nodos pueda ser considerada como un solo nodo que demanda la suma de las demandas de cada uno de sus integrantes, permitiendo además la eliminación de una gran cantidad de tuberías. Para la agrupación de dichos nodos es importante que compartan ciertas características similares: cota y patrón de consumo.

Dado que las longitudes de las tuberías son significativamente pequeñas, simplemente se eliminarán puesto que las pérdidas que se puedan generar en ellas prácticamente no afectarían las propiedades hidráulicas del sistema general.

Se observa en la siguiente figura las características de los elementos eliminados: longitud en tuberías y caudal en los nodos; así como el resultado obtenido con este método.

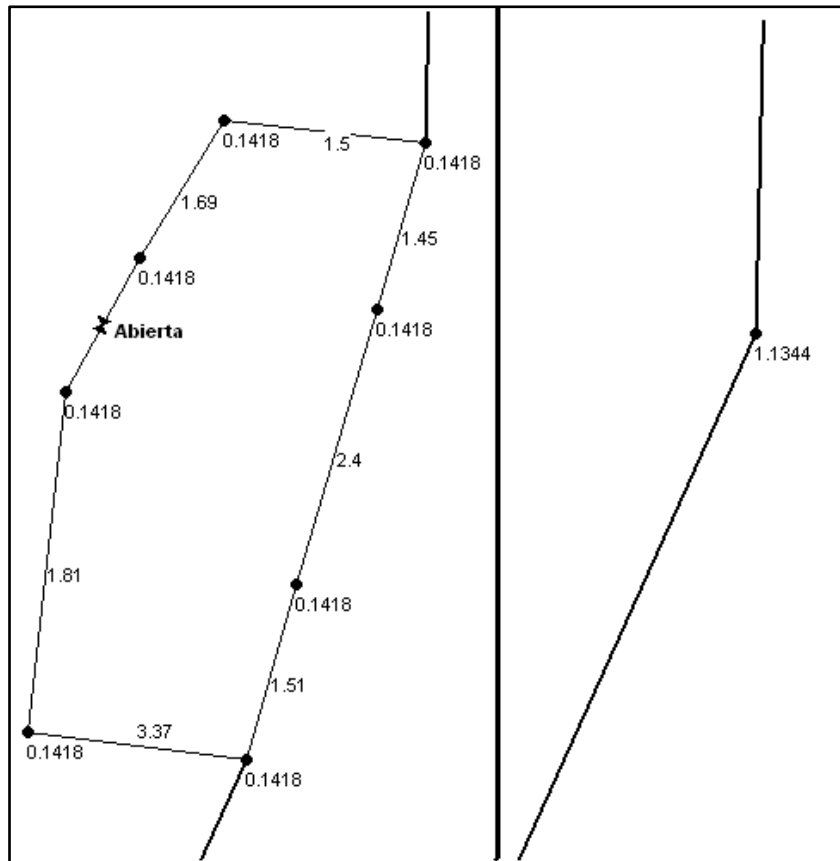


Figura 11: Ejemplo de esqueletización con método de pseudonodos. A la izquierda la red original y a la derecha la red tras esqueletización.

3.2.6 Otros métodos de esqueletización

Adicionalmente a los métodos mencionados anteriormente, existen otras posibilidades aun en estudio, que se pueden utilizar para reducir el número de elementos de una red. Un método a destacar es aquel que podría presentar significativas reducciones en grandes redes de abastecimiento de grandes ciudades.

Debido a que en las grandes ciudades, las zonas donde se concentra la población pueden presentar un alto grado de complejidad en las redes de abastecimiento. Es posible que los métodos que son muy efectivos en redes con un alto grado de ramificación, no sean muy efectivos en redes altamente malladas y con redundancia de tuberías.

Una posibilidad para reducir dichos sectores sería la aplicación de un método consistente en reducir DMA completos a un solo nodo de consumo. Para ello es necesario identificar todos los nodos que pertenecen a dicho sector (que comparten el mismo patrón de consumos) y además identificar todas las tuberías que alimentan y

salen de dicho sector. En conjunto será necesario que en los DMA a reducir se mida en forma continua los caudales y presiones en las líneas de entrada.

Una vez identificados todos estos elementos se procedería a eliminar todos los nodos del sector y cargar todas las demandas en un único nodo central representativo del sector, el cual estaría conectado con todas las salidas y entradas del sistema. Además sería necesario configurar nuevas propiedades para cada una de estas entradas y salidas del sector, de modo que las presiones en cada uno de los puntos de entrada y salida sean idénticas a las que existen en el modelo original (para todos los instantes del día). De esta manera, se podría asegurar que las características hidráulicas de la red original se mantienen.

Un esquema de cómo funcionaría este método es presentado en las siguientes figuras:

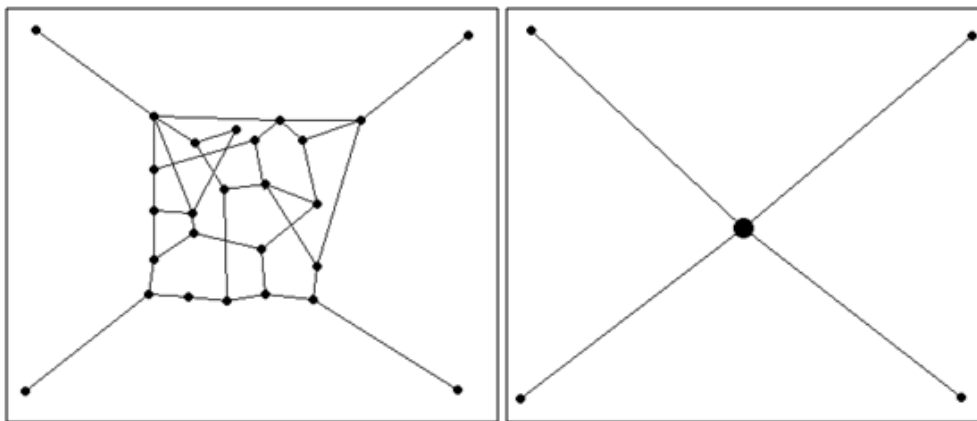


Figura 12: Ejemplo de esqueletización por sectores mallados. A la izquierda sector original, a la derecha red tras esqueletización.

Si esta herramienta fuera diseñada de forma automática, múltiples nodos podrían ser eliminados permitiendo así una esqueletización mucho más efectiva.

Varios software han sido diseñados con el objetivo de llevar a cabo estos métodos de esqueletización de forma automática y más eficiente. El software SKELEBRATOR (Haestad Methods INC, 2002) es uno de ellos. En el presente trabajo no se han considerado esta técnica de esqueletización.

3.3 Esqueletización realizada en el proyecto

En la red analizada en este proyecto, se han aplicado las técnicas de esqueletización antes mencionadas, a fin de poder obtener una simplificación de la misma con un nivel de detalle lo suficientemente simple, de modo que los modelos de optimización pudieran tomar tiempos de cálculo considerablemente menores que los obtenidos con

la red original. Para ello los métodos de esqueletización que se emplearon y el orden de aplicación de estos en la red analizada fueron:

- Tramos ramificados.
- Eliminación de tuberías en serie
 - De propiedades iguales
 - De propiedades diferentes
- Agrupación de pseudonodos
- Depuración de datos (eliminar tuberías cerradas que no interactúan en el sistema)

La aplicación de cada una de estas técnicas fue arrojando un avance en la etapa de esqueletización de la red original. El resultado final de estos métodos dio como resultado la obtención de un modelo simplificado que consta de 65 nodos y 59 líneas, lo que implica que la red reducida es aproximadamente el 2% de la red original.

A continuación se describirá el proceso de esqueletización aplicada a la red estudiada y las diferentes etapas que se fueron alcanzando durante este proceso. Se presentaran además los niveles de reducción que cada etapa fue arrojando al final de cada proceso.

3.3.1 Primera etapa: Tramos Ramificados

Dada las características de la red estudiada, este método fue el primero que se aplicó y fue el que generó un mayor nivel de esqueletización.

La aplicación de éste fue a un nivel de esqueletización completa, es decir para cada sector que compartía un mismo patrón de consumos, se busco un nodo “cabecera” por el cual circulara todo el caudal que alimentara a dicho sector. Al nodo cabecera en cuestión fueron cargadas todas las demandas de los nodos aguas abajo (que conforman al sector). En forma conjunta, para cada uno de estos sectores fue necesaria la creación de una curva de consigna, ésta permitió transmitir a la red reducida la información de presiones mínimas asociadas a los nodos que desaparecieron del sistema.

Se puede observar en la siguiente figura la forma de las curvas de consigna construidas para esta etapa de esqueletización:

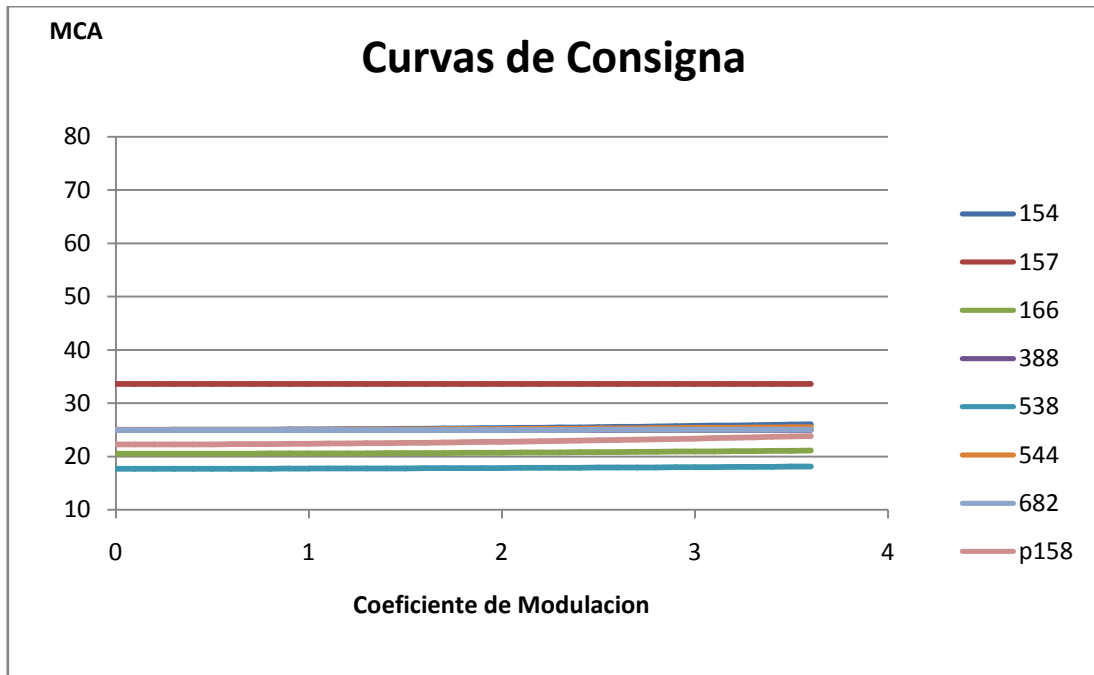


Figura 13: Curvas de consigna.

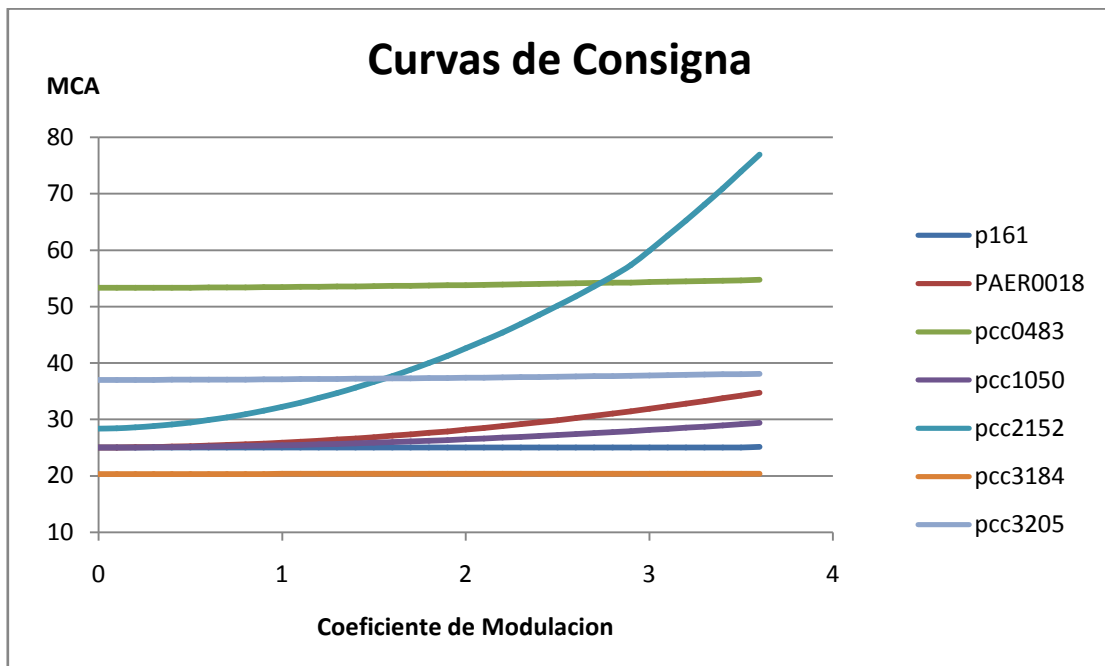


Figura 14: Curvas de consigna

Un detalle de estas curvas de consigna y el procedimiento de obtención se pueden ver en el ANEXO 1.

Los nodos “cabecera”, los sectores que abarcaron y la correspondiente demanda que pasaron a tomar en la red reducida se presentan a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 5: Nodos cabecera de cada sector.

Nodo Cabecera	Sector Reducido	Nodos eliminados	Patrón de consumo	Demanda Total (m³/hr)
154	Baños y Mendigo	97	GENERAL	11.06
682	Corvera	343	MIXTO_1	45.30
388	Mosa	144	Mosa	7.77
538	El Valle Golf	121	ElValleGolf	11.55
P158	Los Martínez	141	LosMartinez	9.36
PCC1050	Venta Manolita	59	VentaManolita	6.78
544	Trampolín	59	Trampolin	5.24
P161	Avileses	157	Avileses	9.84
166	La tercia	125	LaTercia	7.22
157	La Murta	45	LaMurta	1.72
PCC0483	Cabecico del Rey	37	GENERAL	1.80
PCC3184	Valladolises	93	Valadolises	4.00
PAER0018	Aeropuerto	166	GENERAL	70.30
PCC2152	Sucina y La Peraleja	464	MIXTO_2	52.64
PCC3205	Los Bronchos	81	LosBronchos	7.41
OTROS		7		

Como se observa en la tabla, fue necesaria la creación de unos nuevos patrones de consumo denominados como MIXTO_1 Y MIXTO_2. Estos nuevos patrones de consumo son la mezcla de varios patrones de consumo, los cuales estaban presentes en nodos que compartían un mismo sector y que por ende dependían del mismo mudo cabecera. Para la determinación de estos patrones de consumo fue necesario realizar un balance de consumos horario en el sector de todos los nodos y sus respectivos patrones de consumo originales.

La forma del patrón de consumo MIXTO_2, así como las curvas a partir de las cuales fuer construido se aprecia en la figura a continuación:

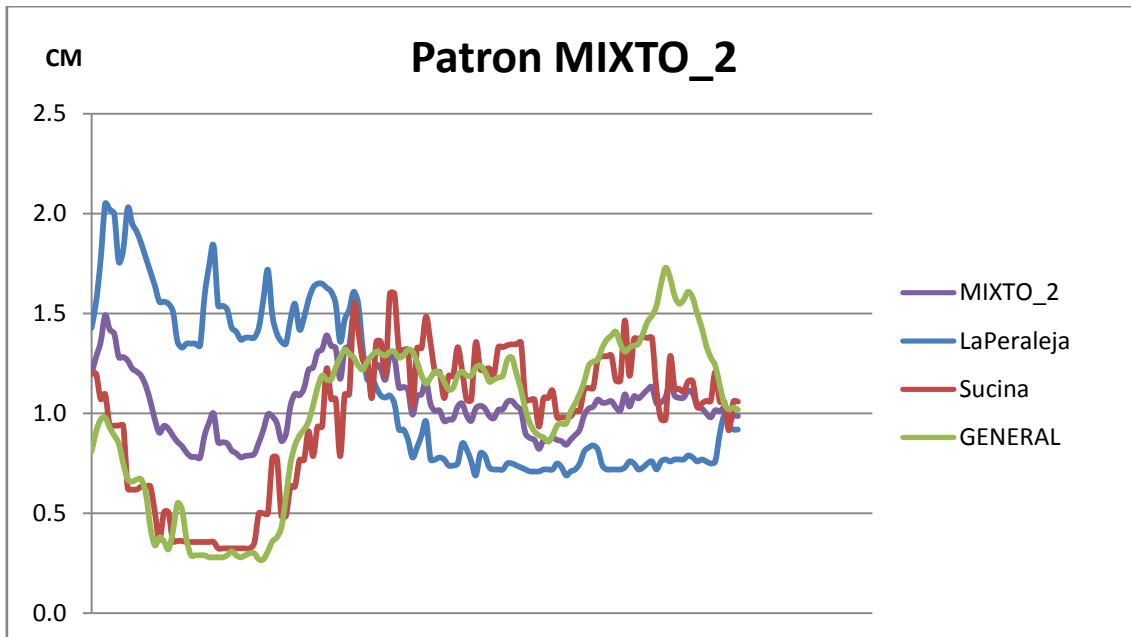


Figura 15: Patrón de consumo MIXTO_2

El resultado de este primer método de esqueletización en la red se presenta en la tabla a continuación:

Tabla 6: Resumen de la red antes y después de la primera etapa de esqueletización.

Datos de la red original		Datos de la red reducida 1ª etapa	
Nº Líneas	2599	Nº Líneas	230
Nº Nodos	2363	Nº Nodos	224
Nº Válvulas	28	Nº Válvulas	14

Se puede observar que tan solo con este primer método fue posible alcanzar un nivel de reducción del 93% respecto de la esqueletización final (2139 nodos de 2298 totales eliminados). Este alto porcentaje de reducción se debe principalmente a la forma tan ramificada que presenta la red.

La reducción se puede observar al comparar gráficamente los dos modelos de EPANET asociados a la red original y la red reducida.

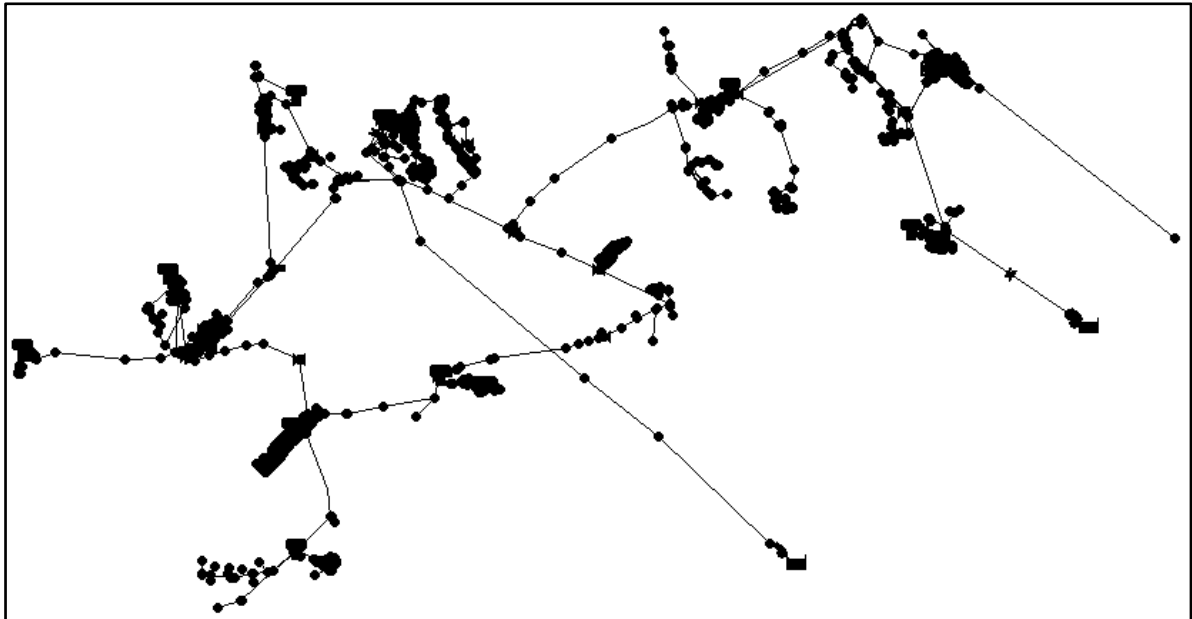


Figura 16: Esquema de la red original del Campo de Murcia.

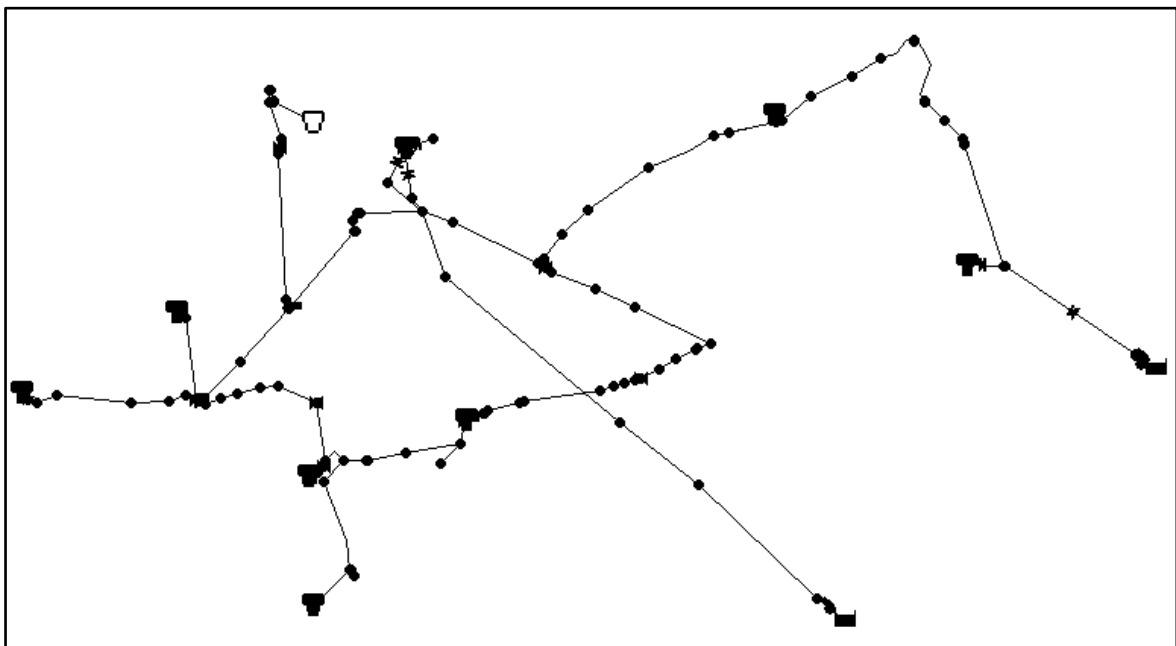


Figura 17: Esquema reducido tras la primera etapa de esqueletización.

3.3.2 Segunda etapa: Eliminación de tuberías en serie

Como segundo paso en la esqueletización, se aplicó el método de eliminar tuberías en serie y los nodos correspondientes a estas. Para la aplicación de éste método se debió dividir en dos etapas la esqueletización.

En una primera instancia se procedió a unir todas las tuberías cuyos nodos asociados no demandaban caudal. Y en una segunda etapa se unieron todas las tuberías cuyos nodos asociados sí presentaban demanda de caudal.

La ecuación que se utilizó en la unión de tuberías sin nodos con demanda asociada fue la ecuación simplificada (ecuación 7). Se presenta a continuación la configuración de un tramo reducido por este método, enunciando las características de los elementos eliminados, se muestra también una figura descriptiva de este ejemplo de reducción.

Tabla 7: Ejemplo de una esquetización mediante eliminación de tuberías en serie.

Líneas originales	Diámetro (mm)	Longitud (m)	Rugosidad (mm)	Nodos eliminados
N21884	81.8	537.24	0.1	650
N22296	100	227.49	0.1	PCC0677
N22299	100	236.36	0.1	PCC0680
N41069	81.8	471.46	0.1	PCC0687
N41070	145.4	402.31	0.1	PCC0693
N42409	81.8	1808.02	0.1	PCC0717
N42603	160	2.10	0.1	PCC3044
N42654	200	0.50	0.1	PCC3054
N42655	200	1.28	0.1	PCC3055
N42656	200	1.03	0.1	PCC3057
N43552	145.4	291.31	0.1	PCC3058
N48140	145.4	2.20	0.1	PCC3059
N48144	145.4	1.37	0.1	PCC3154
N48147	145.4	1.43	0.1	Total eliminados
RESULTANTE	81.8	3026.02	0.1	13

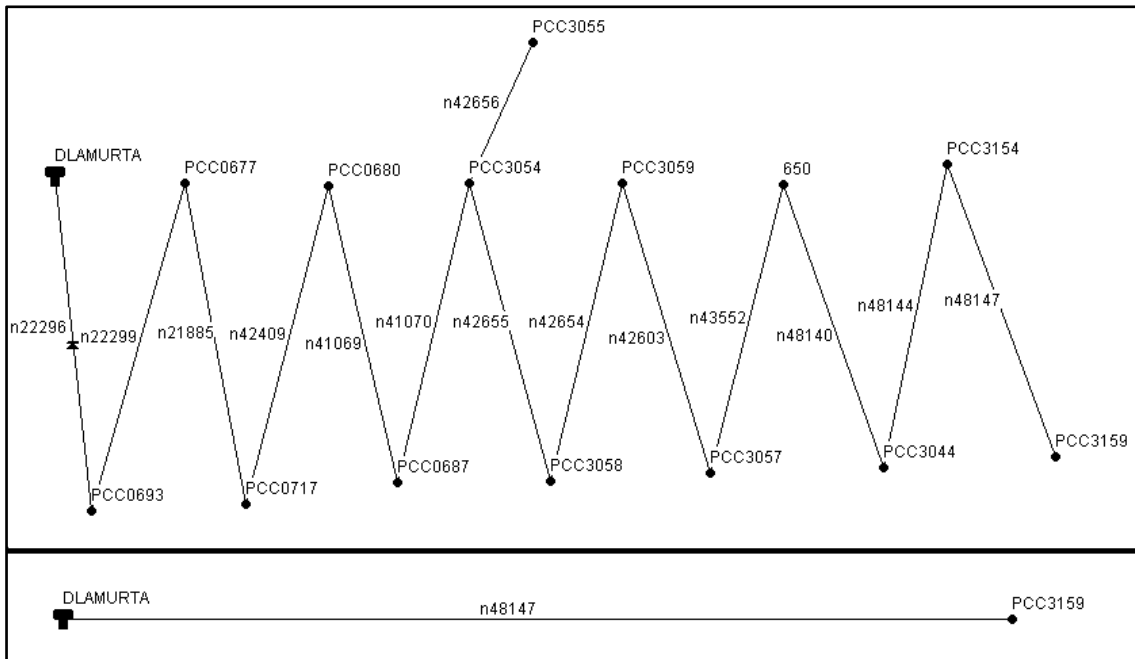


Figura 18: Ejemplo de una esqueletización mediante eliminación de tuberías en serie.

De la misma forma se procedió con todas las líneas que cumplían las condiciones anteriormente mencionadas.

Para las tuberías que si poseían nodos con demanda asociada, la aplicación del método de esqueletización fue línea a línea utilizando la ecuación (6).

Finalmente el nivel de esqueletización asociado a éste método (líneas con y sin nodos con demandas asociadas), se presenta en la tabla a continuación:

Tabla 8: Resumen de la red antes y después de la segunda etapa de esqueletización.

Datos de la red reducida 1ª etapa		Datos de la red reducida 2ª etapa	
Nº Líneas	230	Nº Líneas	92
Nº Nodos	224	Nº Nodos	94
Nº Válvulas	14	Nº Válvulas	14

3.3.3 Tercera etapa: Agrupación de Pseudonodos

En una tercera etapa y como último método de esqueletización aplicado a esta red, se procedió a eliminar todos los pseudonodos aun presentes en el sistema. Estos pseudonodos se encuentran en agrupaciones de nodos, cuyas líneas que los unen no superan una distancia de 50m, pudiendo así unirlos en un solo nodo.

El objetivo de este método es por lo tanto cargar todas las demandas de estos nodos en un único punto, ya que al encontrarse estos tan cerca unos de otros (en

comparación con los demás nodos del sistema); como si un único punto estuviera demandando en este sector.

Las propiedades de los nodos presentes en un pseudonodo del sistema, así como las longitudes de tuberías eliminadas para este caso, se presentan a continuación para ejemplificar este proceso:

Tabla 9: Nodos pertenecientes a un pseudonodo.

Nodo Perteneciente	Cota (m)	Demanda (m ³ /hr)	Patrón de consumo	Longitud de líneas eliminadas (m)
PCC1921	345.54	0.1418	GENERAL	1.50
PCC1923	345.45	0.1418	GENERAL	1.45
PCC1924	345.58	0.1418	GENERAL	1.69
PCC1925	345.51	0.1418	GENERAL	1.81
PCC1926	345.65	0.1418	GENERAL	3.37
PCC1927	345.63	0.1418	GENERAL	2.40
PCC1928	345.69	0.1418	GENERAL	1.51
PCC3164	345.25	0.1418	GENERAL	
RESULTANTE	345.54	1.1344	GENERAL	13.73

Un esquema de estos elementos es el presentado en la figura 11, al ejemplificar la forma de reducción asociada a esta técnica.

La reducción total obtenida mediante este método fue de:

Tabla 10: Propiedades de la red antes y después de la tercera etapa de esqueletización.

Datos de la red reducida 2ª etapa		Datos de la red reducida 3ª etapa	
Nº Líneas	92	Nº Líneas	59
Nº Nodos	94	Nº Nodos	65
Nº Válvulas	14	Nº Válvulas	10

3.3.4 Cuarta etapa: Depuración de datos

Consistió únicamente en la eliminación de tuberías que se encontraran **cerradas** y que no participaran de ningún control simple o programado que cambiara su estado a **abierto** por alguna condición del sistema.

Este método de esqueletización no fue aplicado en una única etapa, sino durante el desarrollo de las demás etapas de la esqueletización. Algunos ejemplos de su aplicación fueron:

- Para determinar cuál sería el nodo cabecera de un sector con dos entradas de las cuales una se encontraba cerrada, dejando así como resultado un único punto cabecera.
- Para aislar sectores con pseudonodos, de modo que el nodo resultante fuera más claro de conectar al sistema.
- Para aclarar el funcionamiento de la red, permitiendo una visualización más simple del problema.

La reducción final en comparación con los datos originales del sistema, se presenta a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 11: Datos de la red antes y después de la esqueletización total.

Datos de la red original		Datos de la red reducida final		Nivel de reducción
Nº Líneas	2599	Nº Líneas	59	97.7 %
Nº Nodos	2363	Nº Nodos	65	97.2 %
Nº Válvulas	28	Nº Válvulas	10	64.3 %
Nº de depósito	9	Nº de depósito	9	0.0 %
Nº de bombas	9	Nº de bombas	8	11.1 %

Quedando su esquema de EPANET como lo muestra la figura siguiente:

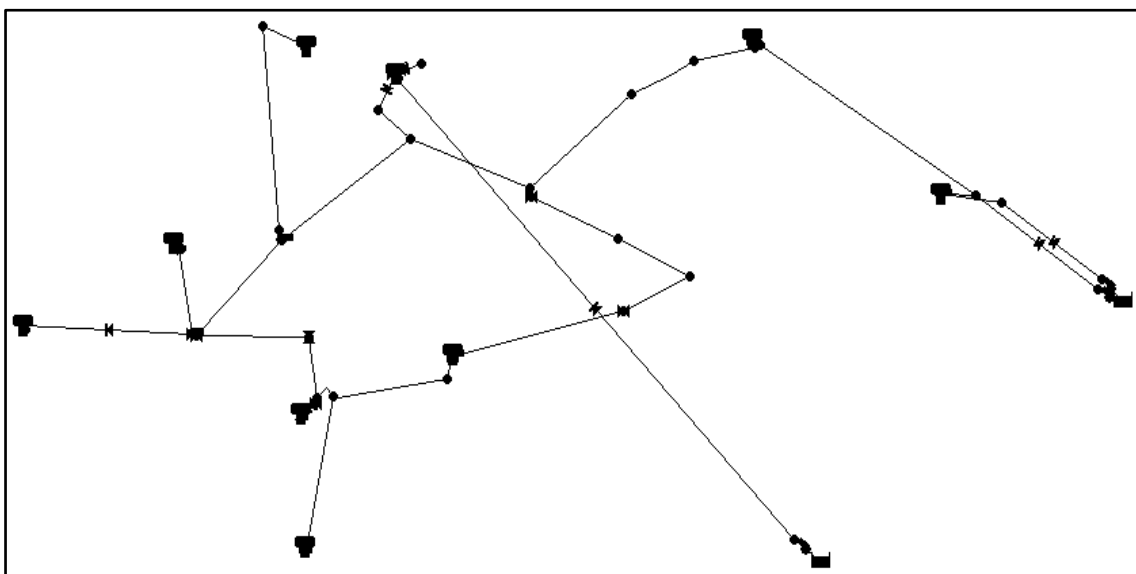


Figura 19: Modelo de análisis reducido final de la red.

La simple visualización de este esquema, permite comprender la simplicidad del funcionamiento general de la red, esto gracias a la esqueletización realizada.

3.4 Comparación de resultados

Para saber si la red reducida refleja realmente el comportamiento hidráulico de la red original, fue necesario analizar algunas de las variables que se mantuvieron de un sistema a otro. Si consideramos que esta reducción fue realizada con la finalidad de optimizar el costo asociado a los bombeos, es importante analizar si los niveles en los depósitos se comportan de forma similar de una red a otra, ya que son estos los que controlan el arranque y paro de las bombas.

Se presenta a continuación la variación en los niveles de algunos depósitos del esquema original versus el esquema reducido, en todos los casos se presenta la variación de los niveles en un espacio temporal de 24 horas.

Se observa en la figura 20, que la diferencia entre el comportamiento del depósito DAEROPUERTO de un esquema a otro es inexistente, existiendo además un coeficiente de determinación $R^2 = 1$ entre estos niveles.

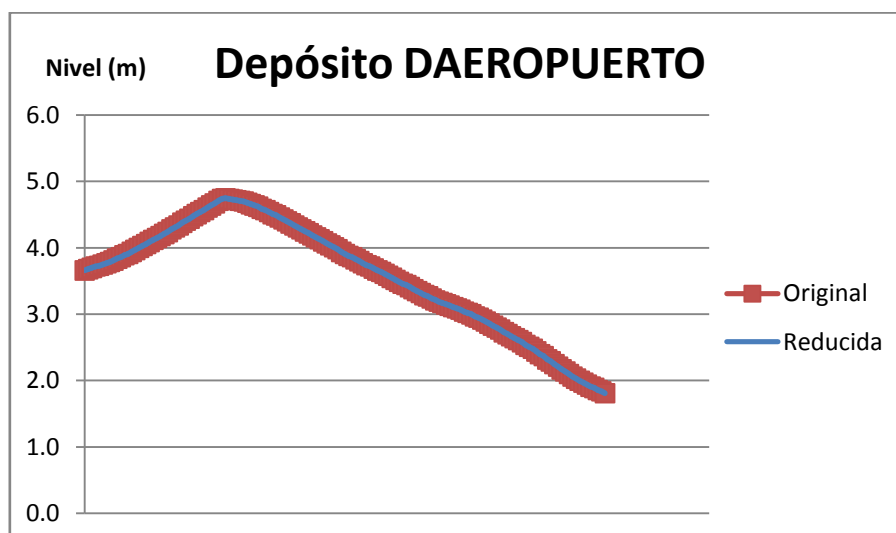


Figura 20: Variación del nivel del depósito DAEROPUERTO durante 24 horas.

Se observa en la figura 21, que la variación del nivel en el depósito DGOLFCORVERA de un esquema a otro es muy pequeña y que la tendencia de este a disminuir con el paso de las horas es similar. Existiendo entre ellos un coeficiente de determinación $R^2 = 1$

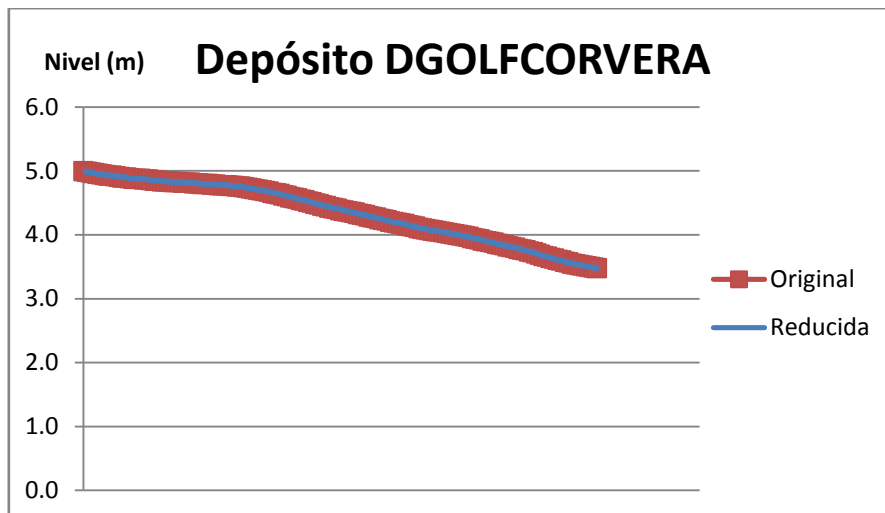


Figura 21: Variación del nivel del depósito DGOLFCORVERA a lo largo de 24 horas.

Es en los depósitos DAVILESES y DBYM donde se puede apreciar la mayor diferencia en la variación de los niveles dentro de los depósitos entre el esquema original y el reducido. Esta variación en ambos casos es prácticamente nula y existe entre estos niveles un coeficiente de determinación $R^2 = 0.991$ y $R^2 = 0.995$ respectivamente. La variación de estos niveles a lo largo del día se aprecia en las figuras 22 y 23 respectivamente.

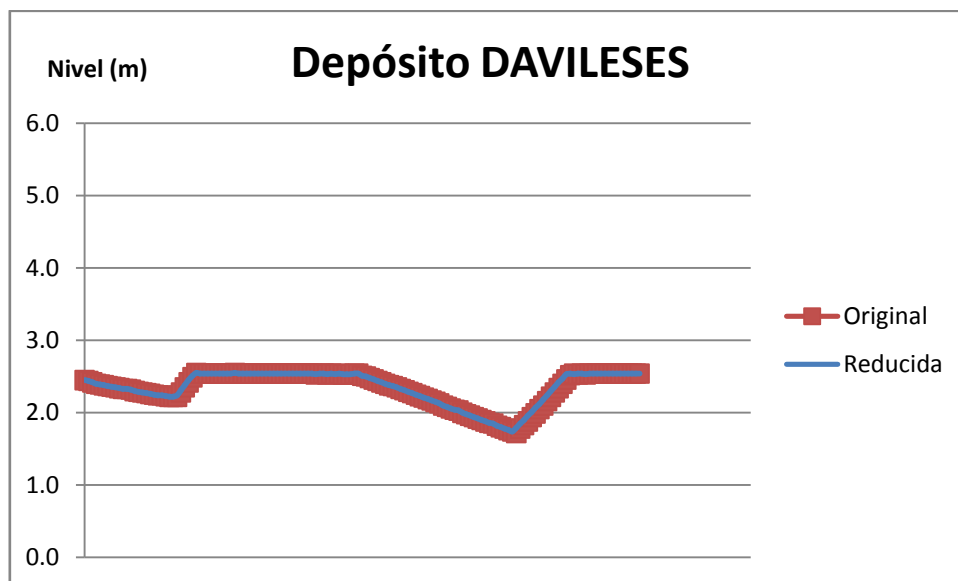


Figura 22: Variación del nivel del depósito DAVILESES a lo largo de 24 horas.

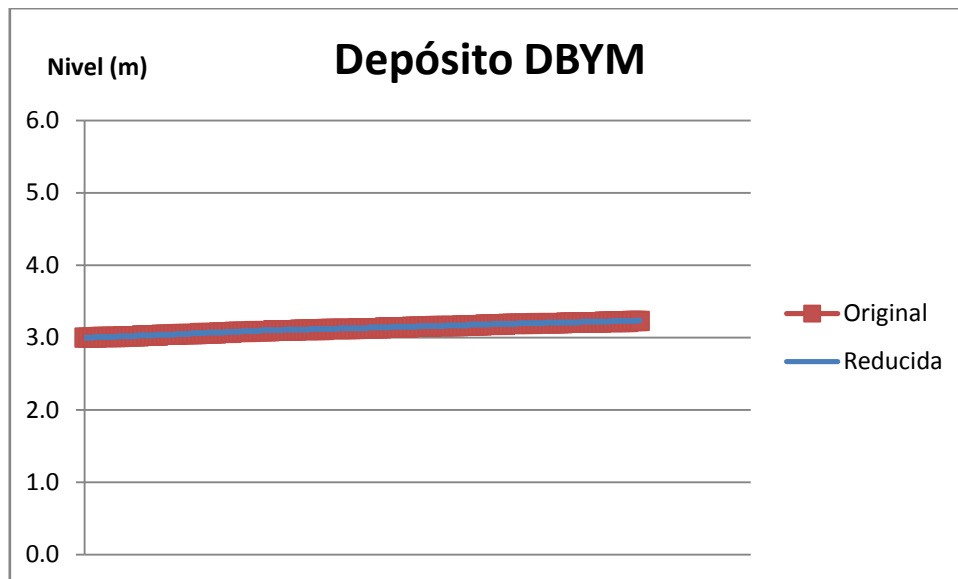


Figura 23: Variación del nivel del depósito DBYM a lo largo de 24 horas.

En general todos los depósitos del sistema tienen un comportamiento muy similar a la hora de evaluar la variación de los niveles de estos entre el esquema original y el esquema reducido. Los coeficientes de determinación que hay entre estos niveles, para cada depósito del sistema se presentan a continuación:

Tabla 12: Coeficientes de determinación entre la variación del nivel de cada depósito en la red original y reducida.

DEPÓSITO	COEFICIENTE R^2
DAEROPUERTO	1.0000
DLAMURTA	0.9995
DGOLFCORVERA	1.0000
DVALLADOLISES	1.0000
DBYM	0.9950
DMOSA	0.9999
DMARTINEZ	1.0000
DAVILESES	0.9916
DLATERCIA	0.9978

Que los valores del coeficiente de determinación se encuentren en su mayoría todos sobre 0.990 implica que el comportamiento de los niveles en los depósitos prácticamente es el mismo en la red reducida que en la red original. Considerando que el objetivo de esta esqueletización es la optimización económica del bombeo y que estos son directamente controlados por el nivel de los depósitos, podemos aseverar que el objetivo del esquema reducido se cumple a cabalidad, el cual es mantener las propiedades hidráulicas necesarias para la optimización energética.

Otra variable muy importante de comparar es el volumen total de consumos diario, ya que es primordial para un buen esquema reducido mantener un balance de caudales con la red original. El valor de la demanda total para un ciclo de 24 horas es idéntico entre los modelos originales y reducidos, manteniendo así el balance de caudales del sistema. Para constatar estos valores se realizó la comparación de los caudales bombeados por algunos de los equipos de bombeo del sistema.

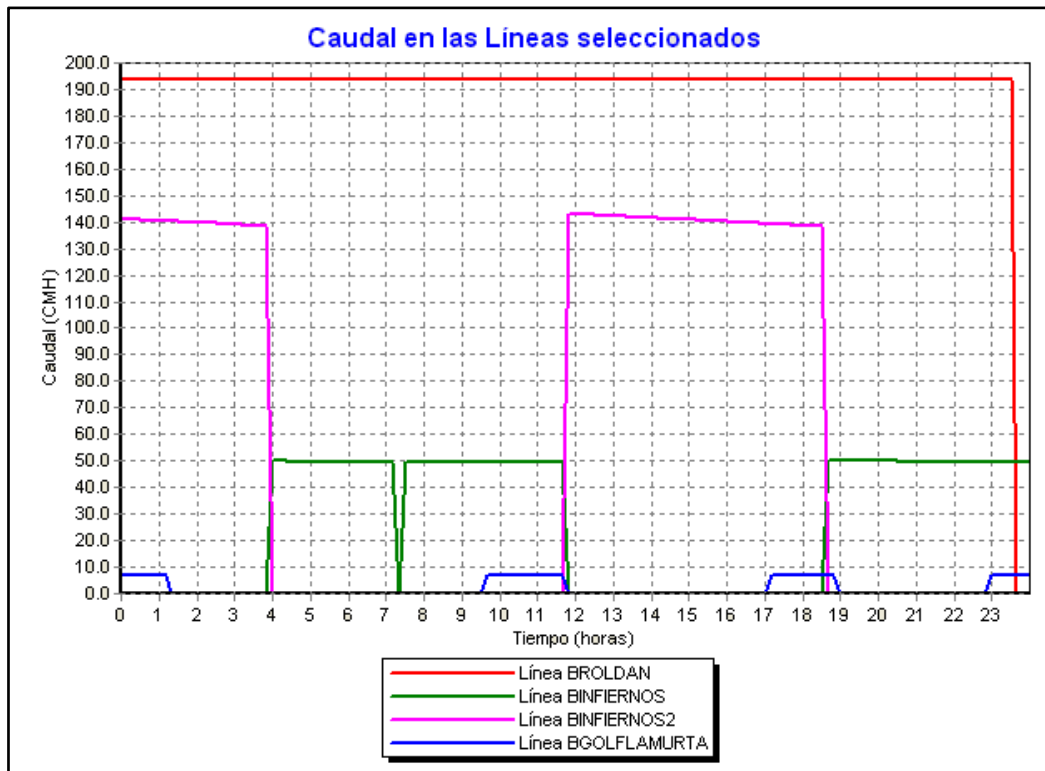


Figura 24: Caudal bombeado en la red original.

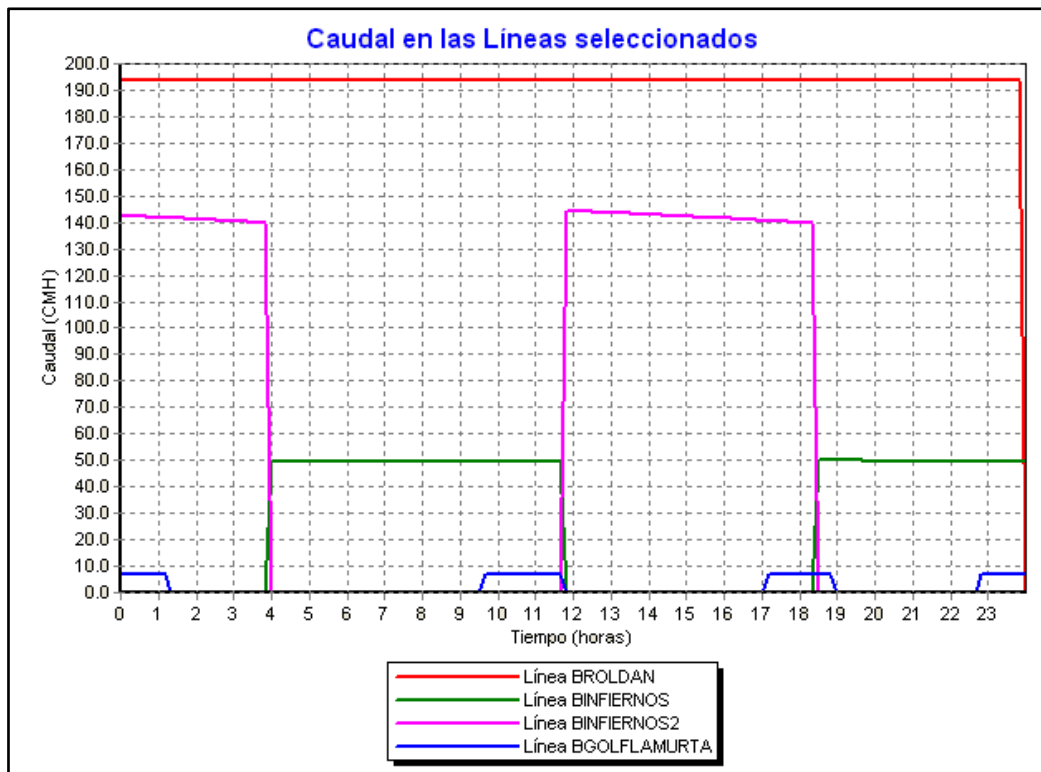


Figura 25: Caudal bombeado en la red reducida.

Se puede observar de la comparación de las figuras, que los caudales circulantes por los equipos de bombeo son prácticamente idénticos al pasar de un sistema a otro, esto permite asegurar un alto grado de analogía en el comportamiento hidráulico del modelo de análisis reducido que intenta simular el comportamiento de la red original.

Además a modo de contraste, se pueden analizar la evolución de las presiones en algunos de los nodos que no han sido alterados. Siendo estas un parámetro de comparación utilizado para ver si el comportamiento presostático de las redes original y reducido son similares.

Se presenta a continuación la variación de la presión en cuatro nodos del sistema que permanecieron de un esquema a otro, así como también el coeficiente de determinación que relaciona la variación de esta presión entre el esquema original y el esquema reducido.

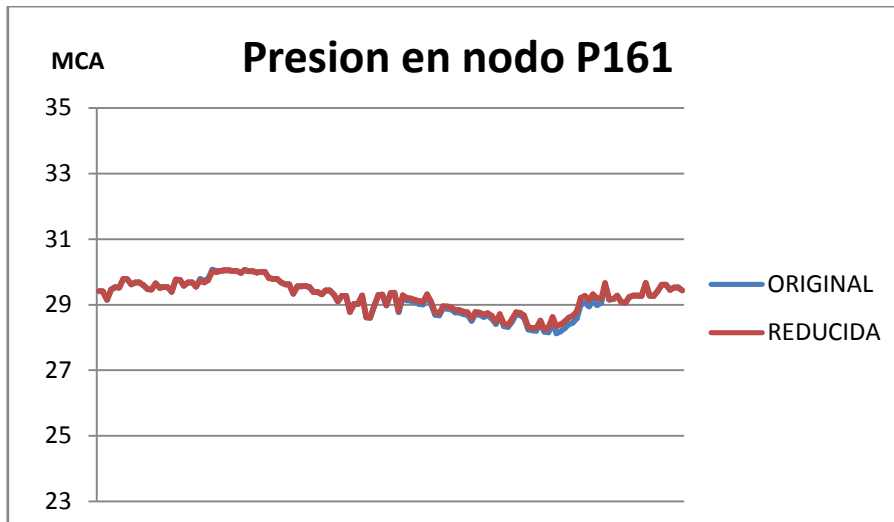


Figura 26: Variación de la presión a lo largo de 24 horas en el nodo P161.

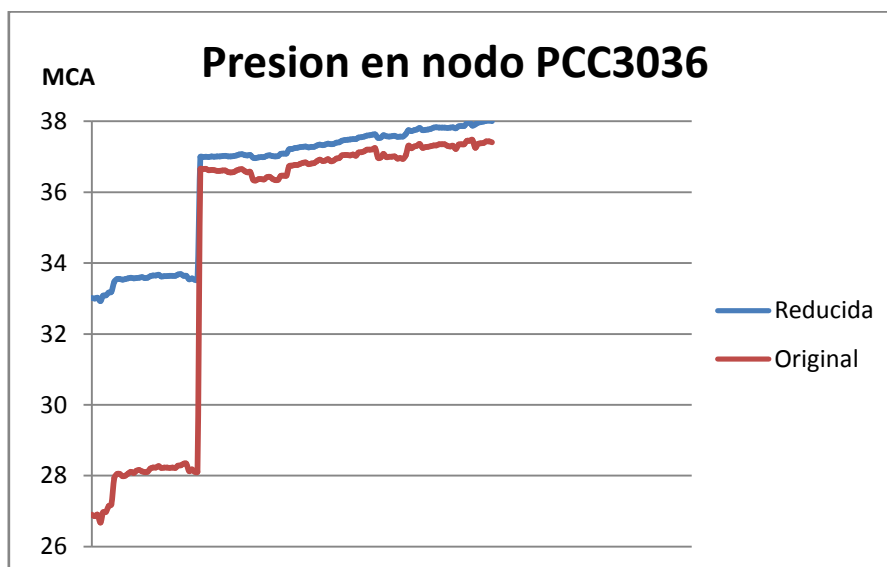


Figura 27: Variación de la presión a lo largo de 24 horas en el nodo PCC3036.

La variación de la presión en el nodo PCC3036 se debe a la pérdida de datos asociada a todo modelo de análisis reducido, debida principalmente a la eliminación de elementos en la red.

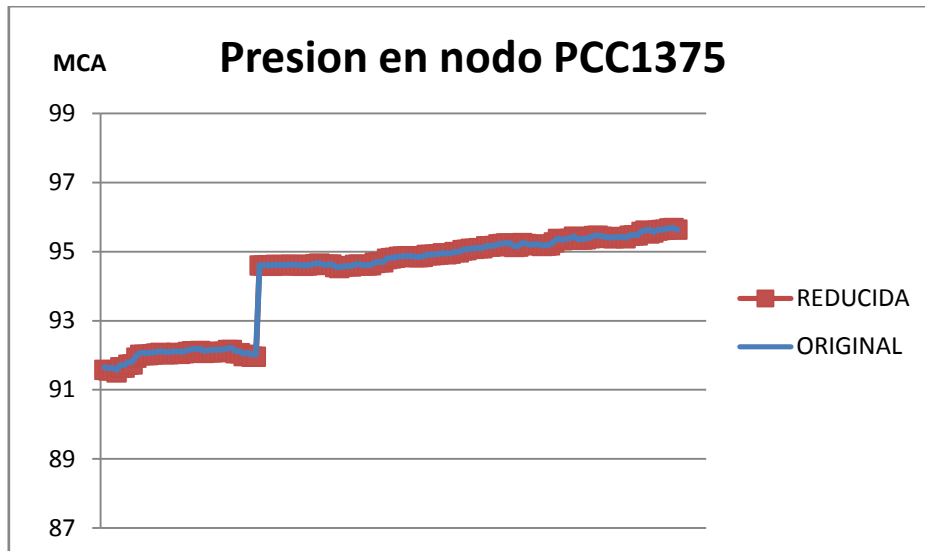


Figura 28: Variación de la presión a lo largo de 24 horas en el nodo PCC1375.

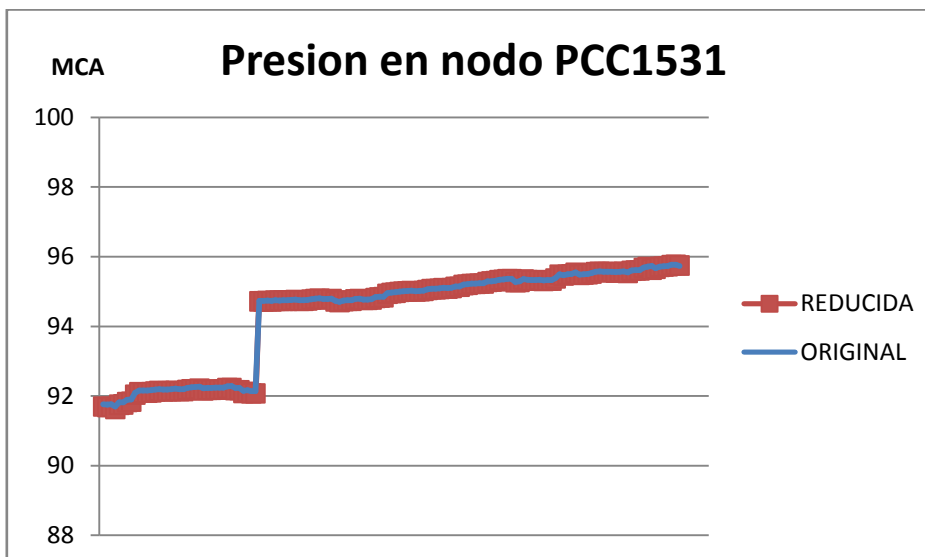


Figura 29: Variación de la presión a lo largo de 24 horas en el nodo PCC1531.

3.5 Pérdida de datos

La pérdida de datos es algo relevante a tener en consideración a la hora de la utilización de este modelo de simulación reducido. Puesto que si algunos de los comportamientos hidráulicos del sistema reflejan casi en su totalidad lo que ocurre en el sistema original, es indudable que algunos de los datos del sistema se han perdido y que la simulación obtenida con ésta red reducida no es más que el resultado de una simplificación del sistema, por lo que es imposible que no sea 100% igual a la que obtendríamos del modelo original.

En su mayoría los datos perdidos están asociados al comportamiento de nodos que ya no pertenecen al sistema (los que fueron eliminados). Datos como la variación horaria de su presión, o la variación del caudal circulante por las líneas que los unían al sistema.

Sin embargo al implementar en este modelo la confección de curvas de consignas asociadas a cada sector que ha sido eliminado del sistema, es posible contar con la información necesaria para asegurar en la gran mayoría de los nodos (todos aquellos eliminados con el método ramificado) que la presión mínima requerida en estos se cumpla.

A su vez al analizar la variación de las presiones en los nodos que se han mantenido en el sistema (figuras 26, 27, 28 y 29) podemos observar que no existe una concordancia total (aunque sí muy cercana), por lo que claramente parte de la información asociada a estos elementos también se ha perdido.

Ya que el objeto de este estudio es la optimización de costos de bombeo, algunas de las válvulas automáticas del sistema (sostenedoras, reductores, entre otras) han sido eliminadas. Estas válvulas al no poder ser manipuladas, no presentan una variable significativa para el algoritmo de optimización que se utilizó. De ésta manera la información asociada a estas válvulas se ha perdido en el modelo reducido, quedando sus consignas únicamente reflejadas en la confección de las curvas de consigna de cada sector. Siendo éstas piezas clave para la determinación de los nodos críticos en cada sector.

CAPITULO IV.- MODELOS DE OPTIMIZACION

4.1 Introducción.

Durante las últimas cuatro décadas se han desarrollado numerosos modelos para optimizar el coste de un sistema de distribución de agua. Todos ellos por medio de diferentes herramientas tratan de alcanzar el óptimo global que dará por solución la minimización de los costes de funcionamiento, operación y mantenimiento de una red de abastecimiento de agua.

Las dificultades que enfrentan estos modelos para obtener la solución óptima o cercana a la óptima son:

- La gran zona de búsqueda de soluciones y por consiguiente la pequeña cantidad de soluciones que pueden ser evaluadas en poco tiempo.
- La complejidad de las redes de abastecimiento de hoy en día.
- La necesidad de evaluar simplificaciones de las redes originales y simplificaciones de las ecuaciones que dominan las leyes de la hidrodinámica, sacrificando precisión en las soluciones.
- La tendencia de las soluciones a encontrarse con soluciones locales, sin poder alcanzar un óptimo global del sistema.

Algoritmos basados en meta-heurística como los algoritmos evolutivos han mostrado que pueden abordar estos problemas flanqueando algunas de las limitaciones (Ostfeld y Tuvaltzev, 2008). Uno de los inconvenientes de estos algoritmos es que necesitan de un gran número de evaluaciones antes de convergir a la solución.

Dado que el espacio de búsqueda del problema crece exponencialmente a medida que el número de variables de decisión, así como el número de elementos de control aumenta, y que por consiguiente aumenta aun más el número de evaluaciones necesarias para buscar dentro del área de la solución de forma adecuada, el problema se torna cada vez más difícil de evaluar. Adicionalmente, para grandes y complejas redes, cada evaluación de la función objetivo toma un tiempo considerable de cálculo y por ende un consumo de recursos computacionales elevado.

4.2 Modelos heurísticos de optimización basados en evolución.

Los algoritmos evolutivos (EA) son métodos estocásticos de búsqueda que buscan imitar la evolución natural o el comportamiento social de las especies. Algunos ejemplos de este tipo de algoritmos son las hormigas que encuentran el camino más corto hacia una fuente de comida o los pájaros en búsqueda de su ruta durante la migración. El comportamiento de estas especies está guiado por el aprendizaje, la adaptación y la evolución (Elbeltagi *et al*, 2005).

Los algoritmos evolutivos han dominado las técnicas independientes de búsqueda global heurística que buscan imitar los mecanismos de selección natural del principio de evolución de Darwin (Ostfeld y Tuvaltzev, 2008). Dentro de estos se encuentran los algoritmos genéticos (GA) cuya idea primaria es la de simular la evolución natural de los cromosomas, representados por estructuras de cadenas que evolucionan mediante: selección, cruzamiento y mutación. Las cadenas pueden tener valores enteros, reales y binarios.

Simpson *et al* (1994) fue el primero en usar un GA para el diseño mínimo de costos de un sistema de abastecimiento de agua. Aplicando y comparando la solución de un GA a la red de Gessler (1985) para su optimización. Savic y Walter (1997) usaron GA para resolver y compara la solución óptima de la red de dos bucles del sistema de carga única por gravedad. En esta misma línea son interesantes las aportaciones de los estudios de Alperovits y Shamir (1977), la red de Hanói (Fujiwara y Khang, 1990) y el sistema de los túneles de New York (Schaaake y Lai, 1969).

Salomons (2001) uso GA para resolver el diseño de coste mínimo incorporando periodos extensos de condiciones de demandas, depósitos y estaciones de bombeo. Vairavamoorthy y Ali (2005) presentaron un formato de GA para resolver el problema del diseño de coste mínimo de una tubería que excluía la búsqueda de la solución óptima en regiones donde la solución sería no factible, lo que mejoró la eficiencia de búsqueda de los GA.

En un intento para reducir el tiempo de procesamiento y mejorar la calidad de las soluciones, así como evitar quedarse atrapados en una solución local, se han desarrollado otros algoritmos evolutivos (EA). Adicionalmente a las mejoras en los GA también se han desarrollado otras técnicas de EA, tales como los algoritmos miméticos (MA), la optimización de nube de partículas (PSO), los sistemas de colonias de hormigas (ACO) y los algoritmos basados en los saltos de ranas (SFL); entre otros (Elbeltagi *et al*, 2005).

En los últimos 5 años, las técnicas de optimización evolutiva multiobjetivo han sido introducidas, permitiendo evaluar las ventajas y desventajas del diseño óptimo de costes con respecto a otras variables del diseño. Prasad y Park (2004) presentaron un algoritmo evolutivo multiobjetivo que buscaba el diseño óptimo de una red que buscaba minimizar el coste versus maximizar la resiliencia del sistema. Farmari *et al* (2005) compararon tres algoritmos evolutivos de optimización multiobjetivo, utilizando para el diseño de sistemas de distribución de agua la visualización del resultado mediante curvas de frente de pareto obtenidas para dos indicadores diferentes.

4.2.1 Tipos de modelos

Variadas técnicas de algoritmos heurísticos, del tipo evolutivo, han sido diseñadas en los últimos años. Dentro de estos se encuentran los conocidos como algoritmos meta-heurísticos basados en población. Estos manipulan en cada paso de la evolución a la población completa que es representada por todos los individuos (posibles soluciones) del problema.

Las técnicas meta-heurísticas que se han estudiado para dar una posible solución al problema que compete a este trabajo son:

4.2.1.1 Algoritmo genético (GA)

Los algoritmos genéticos son una técnica que sigue un proceso iterativo y estocástico que opera sobre una población de soluciones, denominadas individuos y están inspirados en la mejora de los sistemas biológicos a través de la evolución. (Elbeltagi *et al*, 2005)

Una solución para un problema dado viene representada por una cadena de números, llamada cromosoma (ver figura 30). Ésta consiste en un grupo de elementos llamados genes que contienen los valores para las diferentes variables de optimización.

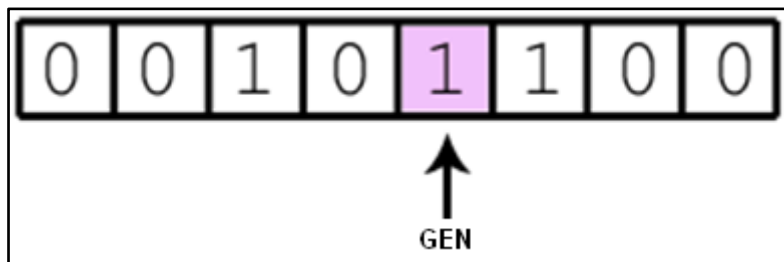


Figura 30: Cromosoma que representa una solución, y un gen de este. (Adaptado de Wong, 2002).

Los GA generan una población inicial con un grupo aleatorio de soluciones (cromosomas). La aptitud de cada cromosoma es determinada mediante la evaluación de la función objetivo, mediante las variables presentes en cada gen del cromosoma. Para simular el proceso natural de la evolución de los más fuertes, los mejores cromosomas son cruzados y mutados, para producir descendencia. La solución que presentan estos descendientes es evaluada y usada para evolucionar la población y proveer mejores soluciones.

Los parámetros principales que afectan el rendimiento de los algoritmos genéticos son cuatro: tamaño de población, número de generaciones, índice de cruzamiento e índice de mutación. A mayor tamaño de población y generaciones, aumenta la posibilidad de encontrar una solución óptima global, pero a su vez aumenta el tiempo de cálculo del algoritmo. Los índices de cruzamiento y mutación son los que van modificando la población de una generación a otra.

El cruzamiento al ser un proceso que ocurre con frecuencia en la naturaleza posee un índice elevado que varía entre 0.6 a 1.0. En el cruzamiento el intercambio de información entre una cadena y otra ocurre como se muestra en la figura siguiente:

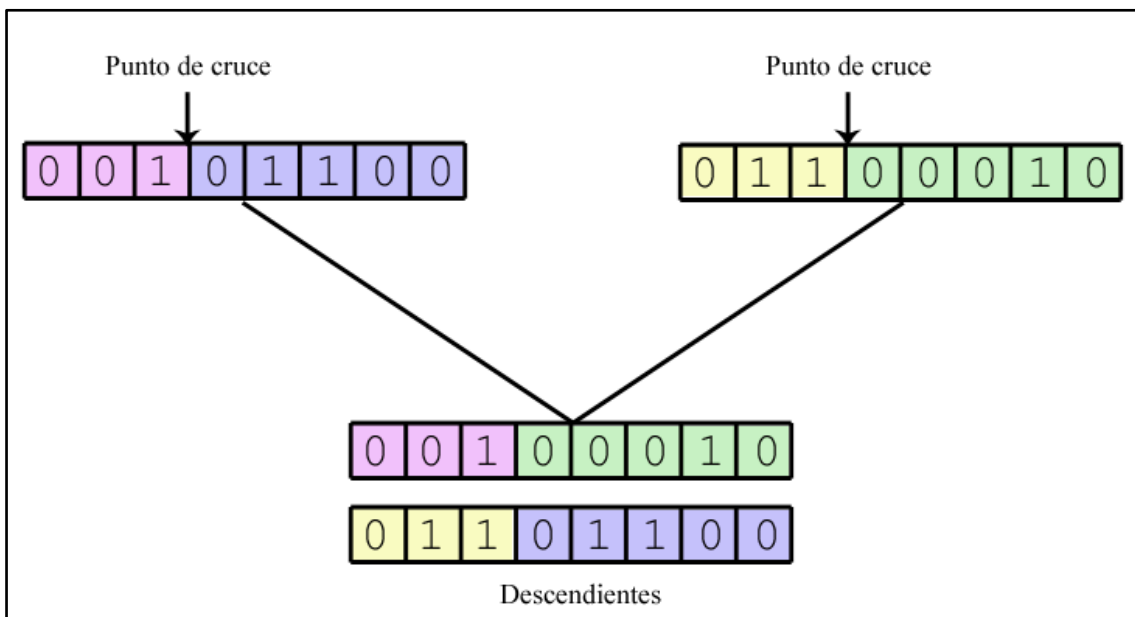


Figura 31: Forma de cruzamiento de dos cadenas y creación de una nueva generación. (Wong, 2002).

Por el contrario la mutación es un proceso que ocurre raramente y que representa un cambio repentino en una descendencia. Esto se logra al reemplazar aleatoriamente un cromosoma de la población y arbitrariamente cambiar algún gen de su información. El beneficio de la mutación es que introduce aleatoriamente nuevo material genético en el proceso evolutivo, lo que permite la búsqueda de una solución en áreas del espacio

de soluciones que de otra forma no serían inspeccionadas, permitiendo además escapar de óptimos locales. Un valor menor a 0.1 es generalmente usado para el índice de mutación. La forma en que se presenta la mutación en un cromosoma se puede observar en la figura siguiente:

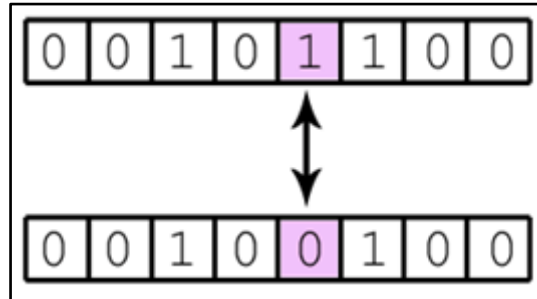


Figura 32: Mutación de una cadena alterando un único gen. (Wong, 2002).

El proceso completo es repetido hasta que se cumpla un cierto criterio de terminación, normalmente después de un número dado de iteraciones o después de que en cierta cantidad de generaciones el valor óptimo no cambie.

4.2.1.2 Optimización basada en cúmulos de partículas (PSO)

Los algoritmos de optimización basados en cúmulos de partículas o “Particle Swarm Optimization” (PSO) están inspirados en el comportamiento social del vuelo de las bandadas de aves o el movimiento de los bancos de peces. El algoritmo PSO mantiene un conjunto de soluciones, también llamadas partículas, que son inicializadas aleatoriamente en el espacio de búsqueda. Cada partícula posee una posición y velocidad que cambia conforme avanza la búsqueda. (Luna, 2008)

En el movimiento de una partícula influye su velocidad y las posiciones donde la propia partícula y las demás de su vecindario encontraron buenas soluciones. En el contexto de PSO, el vecindario de una partícula se define como un conjunto de partículas del cúmulo. El vecindario de una partícula puede ser global, en el cual todas las partículas del cúmulo se consideran vecinas, o local, en el que sólo las partículas más cercanas se consideran vecinas.

En los PSO cada solución es un pájaro en la bandada, este es análogo a un cromosoma en un GA. En forma opuesta a los GA, el PSO no crea nuevos pájaros a través del cruzamiento de sus padres, los pájaros en la población solamente evolucionan su conducta social y coordinan sus movimientos en dirección hacia un destino (Elbeltagi *et al*, 2005).

A medida que la bandada se mueve, cada pájaro busca una dirección específica y además estos identifican al pájaro que se encuentra mejor localizado, siguiéndolo en busca de mejores soluciones. Cada pájaro investiga un área de búsqueda desde su posición la cual es influenciada tanto por el conocimiento de él mismo (búsqueda local), como por el conocimiento del grupo (búsqueda global).

Durante todo el proceso cada partícula monitorea tres valores: su posición actual, la mejor posición alcanzada en el intervalo anterior y su velocidad de vuelo. En cada ciclo la posición del mejor pájaro es calculada, posteriormente cada partícula actualiza su velocidad para tratar de alcanzar esta posición. Con esto la posición de cada partícula dentro de la bandada es actualizada considerando: factor de aprendizaje, cambio máximo de velocidad de un pájaro e inercia del pájaro.

Los pesos asociados al conocimiento de cada pájaro versus el conocimiento de la bandada pueden ir variando durante el proceso de optimización. De esta forma se puede dar más énfasis a la solución local o a la solución global.

En este tipo de algoritmos los parámetros que se ingresan son: número de pájaros, número de ciclos, el cambio máximo de la velocidad de un pájaro y la inercia del pájaro. Todos estos parámetros son los que el modelo necesita calibrar para poder obtener una buena y rápida solución.

4.2.1.3 Optimización basada en los saltos de ranas (SFL)

El algoritmo basado en los saltos de rana o “Shuffled frog leaping” (SFL) combina los beneficios de un algoritmo genético y el comportamiento social de un algoritmo PSO. En los SFL la población consiste en un grupo de ranas que representan las soluciones que es particionado en subgrupos llamados memeplexes. En cada memeplex las ranas realizan una búsqueda local, durante el proceso retienen ideas que pueden ser influenciados por las ideas de los demás integrantes y evolucionar a través de una evolución mimética. Luego de varias etapas de evolución mimética, las ideas se traspasan entre memeplex mediante un proceso de mezclado (Elbeltagi *et al*, 2005).

Una vez mezclados los integrantes de todos los memeplex, se procede a distribuirlos nuevamente en memeplex. La distribución de las ranas se realiza de forma ordenada, mediante su rango dentro del total de la población (obtenido de ordenar las soluciones de mejor a peor). Luego de ser distribuidas en los grupos se busca mejorar solo a la rana con el peor desempeño en cada ciclo (similar a los PSO).

De esta forma los individuos pasaran a ser influenciados y a influenciar sobre un nuevo grupo de individuos, pasando su conocimiento adquirido en la etapa previa. Esto hace que el nuevo memplex pueda generar una mejor solución local y por consiguiente el grupo completo de memplex alcance una mejor solución global.

La población original es creada de forma aleatoria y el proceso de mezcla y evolución continua hasta que algún parámetro así lo estima.

Los parámetros a calibrar en los SFL son: número de ranas, número de memplex, número de generaciones en cada memplex antes del mezclado y tamaño máximo de paso.

4.2.1.4 Optimización basada en colonias de hormigas (ACO)

Los algoritmos de optimización basados en colonias de hormigas o Ant Colony Optimization (ACO) están inspirados en el comportamiento de las hormigas cuando buscan comida. Los ACO fueron desarrollados por Dorigo *et al* en el año 1996 (Elbeltagi *et al*, 2005) basándose en el hecho de que las hormigas son capaces de encontrar el camino más corto entre su hormiguero y una fuente de comida. Esto lo hacen dejando marcas de feromonas, las cuales son depositadas en su viaje por cada hormiga.

Este comportamiento es el siguiente: inicialmente, las hormigas exploran el área cercana a su nido de forma aleatoria. Tan pronto como una hormiga encuentra comida, la lleva al nido. Mientras que realiza este camino, la hormiga va depositando una sustancia química denominada feromona, esta sustancia ayudará al resto de las hormigas a encontrar la comida. (Luna, 2008)

La comunicación indirecta entre las hormigas mediante el rastro de feromona las capacita para encontrar el camino más corto entre el nido y la comida. Este comportamiento es el que intenta simular este método para resolver problemas de optimización. La técnica se basa en dos pasos principales: construcción de una solución basada en el comportamiento de una hormiga y actualización de los rastros de feromona artificiales.

Similar a los PSO, los ACO no evolucionan en su genética sino en su comportamiento social (Elbeltagi *et al*, 2005).

Como se ve en la figura 33, cuando las hormigas dejan su hormiguero en busca de comida, eligen aleatoriamente la ruta para pasar un obstáculo y originalmente la

marca de feromonas será igual en ambos lados del obstáculo (Elbeltagi *et al*, 2005). Cuando las hormigas en el lado más corto encuentran la comida comienzan a volver siguiendo su rastro de feromonas y depositando aun más feromonas en su camino de regreso.

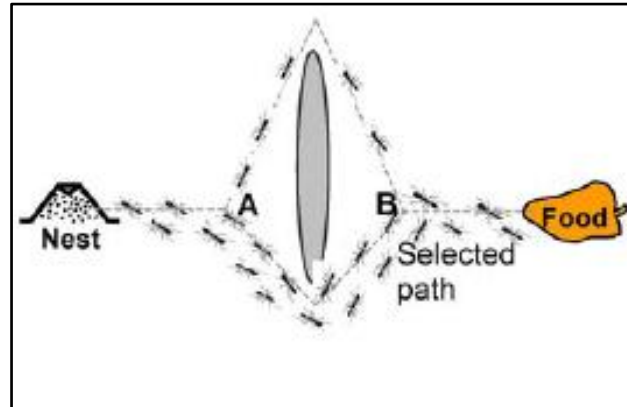


Figura 33: Forma en que las hormigas buscan comida por el camino más corto. (Elbeltagi *et al*, 2005)

Una hormiga que regresa es más probable que elija el camino más corto, puesto que es el que posee más feromonas. Por esta razón, nuevas hormigas que salgan en búsqueda de comida también elegirán el camino más corto. Eventualmente este procedimiento hará que todas las hormigas sigan el camino más corto.

4.2.1.5 Optimización basada en la búsqueda de la armonía (HS)

Esta técnica de optimización es más reciente que todas las anteriores, propone tratar de imitar el proceso de improvisación que realiza una orquesta en la composición de una melodía que se podría considerar perfecta. Geem (2001) publicó las bases de la técnica de optimización Harmony Search (HS). En los últimos años, Geem ha presentado distintos trabajos que utilizan esta técnica aplicada a todo tipo de problemas de optimización relacionados con las redes de distribución, como pueden ser el proceso de diseño óptimo de redes (Geem, 2006) o la optimización de sistemas de bombeo (Geem, 2009).

Pese a la relativa juventud del algoritmo HS, algunos investigadores ya han realizado diversas propuestas que modifican el algoritmo tratando de mejorar sus prestaciones. Mahdavi *et al.* (2007) proponen una variación del algoritmo original llamada IHS (Improved Harmony Search), donde la principal diferencia radica en el tratamiento de los parámetros de ajuste de los que dispone HS.

Omran y Mahdavi (2008) presentan otra modificación al algoritmo original, basada en el concepto de la inteligencia que propone la técnica de optimización PSO, mostrada con detalle en el apartado anterior. Esta variación recibe el nombre de Global-best Harmony Search.

4.2.2 Parámetros de calibración de los modelos utilizados

Para la correcta utilización de un algoritmo de optimización, una parte muy importante es la calibración de los parámetros a ser utilizados en el modelo. Dichos parámetros afectan de forma directa la forma en que el algoritmo aborda el problema, pudiendo influir en la calidad de la solución encontrada, la velocidad del algoritmo para efectuar el análisis, la posibilidad de encontrar un óptimo global y no solo un óptimo local, el área de la zona factible a ser evaluada, etc.

De esta forma, la correcta calibración de un modelo dependerá también de los objetivos que se planteen en la optimización, la cual se enfocara principalmente en determinar si se desea mayor precisión o mayor velocidad de resultados.

En el presente proyecto la optimización de la red de abastecimiento del Campo de Murcia, fue principalmente evaluada utilizando un algoritmo genético mediante la herramienta HOLORED. Los parámetros que se debieron calibrar para la utilización de este algoritmo fueron:

- Tamaño de la población.
- Coeficiente de cruzamiento.
- Coeficiente de Mutación.
- Condición de convergencia al óptimo.

La utilización de esta herramienta, su funcionamiento y la calibración de cada uno de sus parámetros se explica en el apartado correspondiente dentro de este mismo capítulo.

4.3 Herramienta HOLORED

HOLORED es una herramienta de optimización diseñada por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente como parte del convenio de colaboración suscrito entre la UPV y EMUASA, con el objetivo minimizar los costes energéticos operacionales de una red de abastecimientos de agua.

Este software utiliza una base optimizadora inspirada en los algoritmos genéticos, creando soluciones a partir de cadenas o cromosomas que contienen las diferentes variables de cada elemento de la red que pueden afectar al coste energético de la misma. Durante el transcurso de la optimización, una evolución de las soluciones ocurre gracias a procesos de cruzamiento y mutación de estas cadenas. Dichos procesos permiten la generación de nuevas cadenas que aportaran diferentes soluciones en la búsqueda de un óptimo. Una vez se alcance un punto de optimización deseado según un parámetro establecido se acepta que la solución encontrada es óptima.

Para ejecutar su motor de cálculo HOLORED necesita de un modelo de análisis hidráulico, el cual permite la evaluación de todos los parámetros asociados a los elementos de la red, para este propósito el software utilizado es EPANET.

4.3.1 Funcionamiento general de la herramienta

Para su funcionamiento HOLORED requiere de dos tipos de archivos disponibles, el primero de ellos debe contener todas las características de la red a optimizar en forma de fichero .inp, el cual es extraído de una red en EPANET. El segundo archivo requerido es un archivo de edición en forma de fichero .opt en forma de archivo de texto. En este fichero es donde se ingresan todas las opciones de optimización presentes en cada elemento de la red, así como el tipo de optimización a la que será sometida dicho elemento. Un ejemplo de archivo .opt se presenta en la siguiente figura:

Bombas: Para cada bomba tres posibilidades de control son permitidas:

- EPANET: Esto significa que la bomba en cuestión funcionara como indiquen los controles ingresados en EPANET.
- TANK: Implica que el arranque y paro de la bomba está asociado a la variación del nivel de un depósito. Este depósito debe ser especificado en la herramienta de edición del software. Si se desea además se pueden indicar el rango de niveles donde buscar el nivel de arranque y de paro, estos niveles serán optimizados por el software.
- TIME: Indica que la optimización de dicha bomba será en forma horaria, se indica además el número límite de operaciones de arranque y paro.

Válvulas: Para las válvulas la optimización funciona de forma similar a una bomba, pudiendo también elegir si se desea optimizar en función de un depósito (TANK), por temporización (TIME) o por controles de EPANET, pero además existe la posibilidad de optimizar su consigna (SETTING), para ello se debe ingresar los valores máximo y mínimo que puede tomar su consigna.

Tuberías: Las tuberías funcionan exactamente igual que las bombas, lo que cambie en ellas es su estado, pudiendo pasar de abiertas a cerradas y viceversa. Esto permite evaluar posibles fallos del sistema.

Nodos: A cada nodo que está consumiendo una demanda, se le puede ingresar un valor de presión mínima. Estos elementos no están sujetos a optimización y son solo utilizados para considerar posibles penalizaciones al sistema. Estas presiones mínimas pueden ser directamente la restricción de presión en el nodo o la presión necesaria en dicho nodo según la curva de consigna.

Con todos estos elementos y sus variables asociadas se procede entonces a la creación aleatoria de cadenas de soluciones, las cuales conforman la población inicial de soluciones que se evalúa para dar inicio al proceso de optimización.

HOLORÉD además considera diferentes tipos de penalización asociadas a la optimización de forma que considere un funcionamiento lo más real posible de la red de abastecimiento y poder cumplir con unos criterios deseables de funcionamiento. Las penalizaciones a considerar son relativas a la presión en los nodos, los niveles en los depósitos y a los horarios tarifarios eléctricos.

Las penalizaciones presentes en la ecuación consideran criterios de funcionamiento deseado. Éstas actúan directamente sobre el coste final obtenido por la optimización

mediante una sanción de costos asociada a los tres criterios. Las penalizaciones consideradas en el modelo HOLORED son:

- **Presiones:** Si no se cumple la presión mínima en un nodo, se imputara un coste igual al necesario para bombear con la bomba de mayor coste a modo de suplir esa presión necesaria.
- **Niveles:** Si los niveles en los depósitos al final del día no son iguales que al comienzo de éste, se imputara un coste igual al necesario para reponer la diferencia existente con la bomba que suponga un mayor coste en la instalación.
- **Tarifas eléctricas:** A modo de suplir las diferencias de nivel o de presión presentes en el sistema, se admitirá que todas estas penalizaciones de bombeo serán siempre a coste de horario punta.

Si consideramos que uno de los objetivos primordiales de un operador es el de minimizar el número de maniobras diarias manteniendo presiones adecuadas en el sistema (Lansey y Awumah, 1994), es lógico pensar que un número de maniobras limite durante el día es deseable.

Cabe destacar que a pesar de que en el presente proyecto no se contabilizaron costes de mantenimiento, HOLORED si presenta la posibilidad de limitar el número de operaciones de arranque y pare en las bombas. Esta herramienta permitió además que el espacio de búsqueda de la solución óptima sea más acotado, ya que al poseer solo un número limitado de operaciones en cada bomba durante el día, se disminuye el tamaño de la cadena (cromosoma) que conforma una posible solución en el algoritmo genético que utiliza el software.

Una vez definidas las variables que se desean modificar para buscar una solución óptima, es necesario ajustar los parámetros correspondientes al algoritmo genético que buscara la solución del problema. Los parámetros a ingresar en el software son:

- **Tamaño de población:** generalmente se recomienda que sea el doble que el número de elementos presente en una cadena.
- **Índice de cruzamiento:** entre 0.6 y 1.0.
- **Índice de mutación:** menor a 0.1, se recomienda que sea el inverso del número de elementos presentes en una cadena.
- **Número de iteraciones:** del orden de magnitud del tamaño de población, pero un poco mayor.

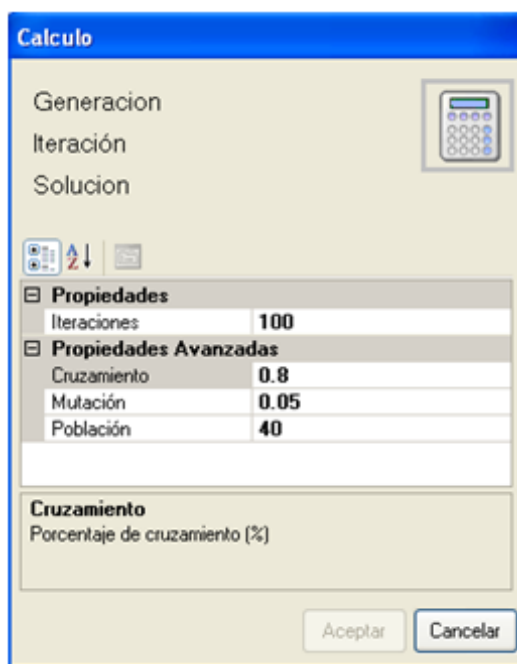


Figura 35: Parámetros de calibración de la optimización. Formato de ingreso en HOLORED.

Finalmente la simulación puede ser lanzada y el proceso de optimización da inicio. Se genera una población de soluciones (cadenas) aleatorias que son cruzadas y mutadas según los índices indicados. El proceso de búsqueda acaba cuando la solución encontrada hasta el momento no sufre variaciones durante una cierta cantidad de generaciones (número de iteraciones). En ese momento el algoritmo genético se detiene y entrega una solución.

Dicha solución puede ser extraída en forma de un fichero .inp el cual contiene todas las características de la red original optimizada, cambiando solamente lo referente a los controles simples. Estos nuevos controles simples contienen toda la información optimizada del funcionamiento de las bombas, válvulas y líneas del sistema; indicando así las operaciones que se deben llevar a cabo en la red con el objetivo de minimizar el coste de operación.

4.3.2 Funcionamiento particular al caso de estudio

A continuación se presentan todos los elementos optimizados en cada uno de los escenarios evaluados en la red del Campo de Murcia, así como los parámetros de éstos que fueron ingresados en la herramienta HOLORED.

Para los escenarios 0, 1 y 2 tan solo se optimizó el funcionamiento de las bombas. Todas estas fueron optimizadas en función del nivel de un depósito o por los controles de EPANET de las mismas, dejando de lado la optimización temporizada. Dicha optimización considero que 3 bombas funcionarían bajo controles simples de EPANET

y las 6 restantes serían optimizadas en función del nivel en determinados depósitos (detalladas en la Tabla 2).

Para la optimización de estos escenarios, fue necesario ingresar presión mínima requerida solo en 6 de los 20 que poseían demanda dentro de la red reducida (detallados en la tabla 13). Para los 14 nodos restantes no fue necesario puesto que conectan directamente con un depósito, en el caso de éstos, si el depósito no es capaz de entregar la presión mínima requerida, no será posible que el sistema evolucione hasta un estado donde esto se pueda realizar.

Tabla 13: Nodos con presión mínima asignada.

Nodo	Presión mínima requerida. (mca)
544	20.05
PCC0483	53.72
PCC0883	25.00
PCC1050	25.97
PCC2240	25.00
PCC3171	25.00

La forma en que se obtienen estas presiones mínimas esta en base al cálculo de las diferentes curvas de consigna del sistema. El detalle puede verse en el ANEXO 1.

Para el escenario 3 la optimización además considero la conectividad de tuberías que se encuentran fuera de servicio. En este caso particular solo una tubería fue manipulada a modo de ejemplificar posibles escenarios de fallo o nuevas conectividades en la red. La tubería manipulada fue la n31077 que conecta dos sectores sin conectividad en la red.

Para el escenario número 4 la optimización dependió también de la maniobra de algunas válvulas del sistema, que permitían influenciar la presión en los nodos y reducir el consumo de estos (pues se comportan como emisores). Las válvulas que se manipularon para la creación de este escenario fueron:

Tabla 14: Válvulas maniobradas en el escenario 4.

Válvula	Tipo	Consigna
VR38	Reductora	25
VR89	Reductora	35
VR98	Reductora	50

CAPITULO V.- ANALISIS Y RESULTADOS

5.1 Introducción

En el presente capítulo, se expondrán los resultados obtenidos con la herramienta de optimización HOLORED, de los diferentes escenarios planteados previamente en este estudio. Se procederá a comparar los costos de bombeo que se han obtenido de la optimización con los costos de bombeo asociados al esquema original de la red de abastecimiento del Campo de Murcia y se compararán las características de los resultados asociados a la red reducida versus la red en tamaño original. Para ello se analiza cada solución de HOLORED a un escenario y tras realizar el análisis dinámico en EPANET se determinan los costes de bombeo.

5.2 Simulación de los escenarios.

La red de abastecimiento del Campo de Murcia fue presentada para su optimización de costes de bombeo, para ello diferentes escenarios de funcionamiento se han planteado y un modelo de análisis reducido de los mismos ha sido desarrollado.

Para el cálculo de la red original consistente en 2363 nodos, 2699 líneas, 9 bombas, 9 depósitos, 28 válvulas y 20 patrones de consumo, entre otros elementos; una simulación de 24 horas segmentada en periodos de 10 minutos fue ejecutada con EPANET, para los escenarios 0, 1 y 2. Esta simulación toma típicamente unos 13 segundos en un computador con un procesador de 1.5 GHz y 480 mb RAM, para alcanzar su solución. Los escenarios 3 y 4 fueron construidos a partir de escenarios ya reducidos, es por ello que no se cuenta con una red en tamaño original que permita la evaluación directa de la reducción asociada a tiempos de cálculo en estos escenarios.

La misma simulación ejecutada en cada uno de los modelos reducidos pertenecientes a los diferentes escenarios toma en promedio 1 segundo, lo que implica una reducción del 92.3% en el tiempo de cálculo. Si bien estos tiempos de cálculo pueden considerarse pequeños en ambos casos (original y reducido), es importante considerar que durante el proceso de optimización cientos de simulaciones son ejecutadas con

cada uno de los escenarios, por lo que una reducción de pocos segundos en el proceso de simulación significa tiempos considerablemente menores durante la optimización.

Los controles simples que regulan el funcionamiento de las bombas, válvulas y líneas en la red original del Campo de Murcia, se muestran a continuación:

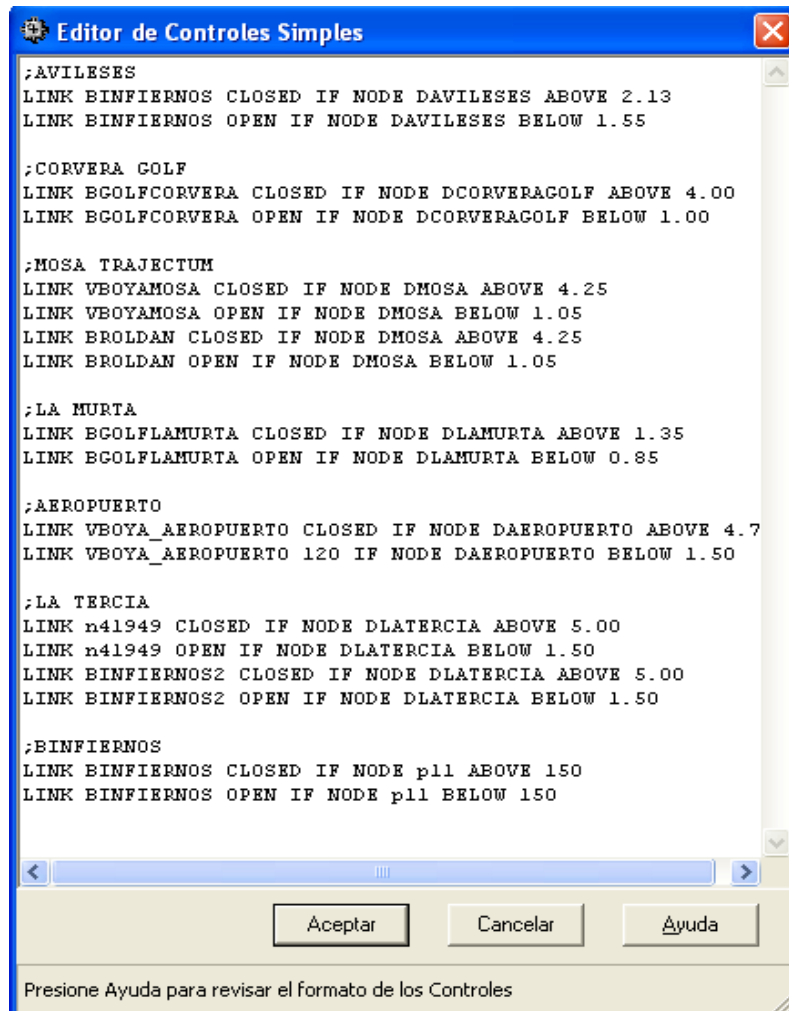


Figura 36: Controles Simples presentes en el modelo original.

Como se aprecia en la figura, la gran mayoría de los controles están asociados a niveles en los depósitos, exceptuando el control de BINFIERNOS el cual fue construido con la finalidad de recrear un funcionamiento alterno entre las bombas BINIFIERNOS y BINIFIERNOS2. Este control es parte de una premisa establecida por los operadores de EMUASA y no formara necesariamente parte de la solución final optimizada, puesto que limitaría demasiado la zona factible de soluciones.

El control original que regulaba este funcionamiento alterno estaba escrito en controles programados bajo el siguiente comando.

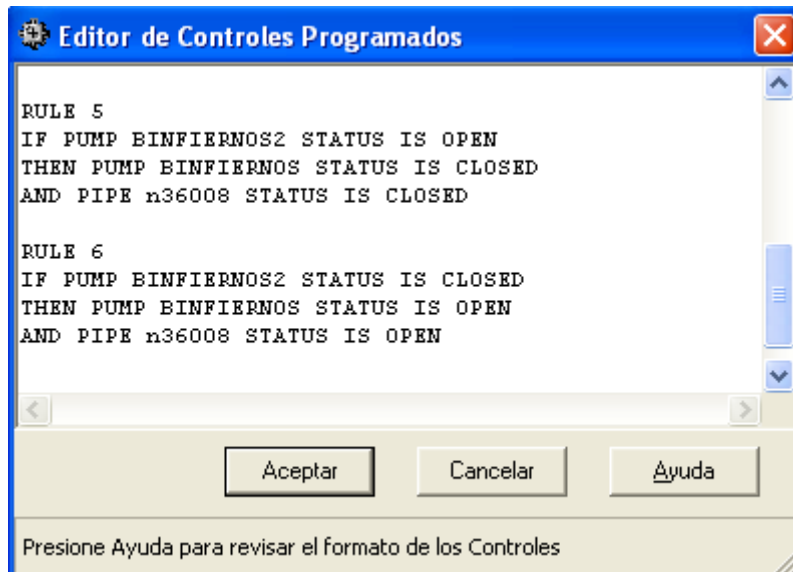


Figura 37: Control Programado que regulaba el funcionamiento alternado de BINFIERNOS Y BINFIERNOS2.

Sin embargo fue necesario transcribirlo a controles simples pues los tiempos de cálculo asociados a la herramienta de optimización se veían sumamente aumentados al introducir una red que cuente con controles programados. De esta manera todos los controles programados fueron transcritos a controles simples, manteniendo su regulación intacta sobre el sistema.

De la simulación con EPANET de la red original del Campo de Murcia que ya contaba con todas sus operaciones en modo de controles simples, se obtuvo un coste de bombeo asociado a los escenarios 0,1 y 2. Estos resultados son los que recoge la tabla 15.

Tabla 15: Costes de los escenarios en tamaño original.

Escenario	Coste de Bombeo para 24 horas. (€)
0	515.00
1	434.46
2	597.15

De la misma manera se procedió a calcular los costes energéticos en los modelos reducidos de la red para cada escenario, obteniendo los siguientes valores:

Tabla 16: Costes de los escenarios en tamaño reducido.

Escenario	Coste de Bombeo para 24 horas. (€)	Error respecto a la red original (%)
0	516.88	0.37
1	435.93	0.34
2	600.44	0.55

Se observa que en los modelos reducidos el coste de bombeo es levemente mayor, esto debido a pequeñas alteraciones en los patrones de consumo de la red original (del orden del tercer decimal), los cuales estaban diseñados para una simulación de 72 horas. Sin embargo al estar los escenarios por sobre el coste real de operación, podremos asegurar que la solución obtenida mediante la optimización será incluso un poco más baja en costos a la hora de implementarla en la realidad del sistema de abastecimiento.

Los costes asociados a los escenarios 3 y 4, serán referenciados al obtenido del escenario 0, pues a partir de este fueron realizadas las modificaciones de ambos.

Para cada escenario tanto en formato de red original como reducida, se presenta además en detalle, la configuración de todos sus elementos que formaran parte de la optimización económica: coste y porcentaje de utilización de cada bomba, y nivel inicial y final en cada depósito. La presión mínima requerida en cada nodo de estos escenarios es 25 m.c.a en la red original y para la red reducida la presión mínima requerida en cada nodo de interés es la enunciada en la tabla siguiente.

Tabla 17: Configuración de las variables del Escenario 0, formato Original.

Bomba	Porcentaje Utilización	Coste (€)	Deposito	Nivel inicial	Nivel final
BINFIERNOS	54.58	4.66	DAVILESES	2.45	2.54
BMARTINEZ	100	1.64	DMARTINEZ	2.40	2.40
BAVILESES	100	2.37	DAEROPUERTO	3.66	1.81
BSUCINA	0.00	0.00	DVALLADOLISES	2.55	2.33
BROLDAN	98.57	359.6	DMOSA	3.05	4.23
BGOLFLAMURTA	26.95	1.25	DLAMURTA	1.00	1.22
BGOLFCORVERA	0.00	0.00	DCORVERAGOLF	5.00	3.48
BINIFERNOS2	45.42	110.69	DLATERCIA	3.05	2.40
BnBYM	100	34.78	DBYM	3.00	3.23

Tabla 18: Configuración de las variables del Escenario 0, formato reducido.

Bomba	Porcentaje Utilización	Coste (€)	Deposito	Nivel inicial	Nivel final
BINFIERNOS	55.34	4.66	DAVILESES	2.45	2.54
BMARTINEZ	100	1.64	DMARTINEZ	2.40	2.40
BAVILESES	100	2.37	DAEROPUERTO	3.66	1.81
BSUCINA	0.00	0.00	DVALLADOLISES	2.55	2.33
BROLDAN	99.06	361.47	DMOSA	3.05	4.24
BGOLFLAMURTA	26.93	1.24	DLAMURTA	1.00	1.23
BGOLFCORVERA	0.00	0.00	DCORVERAGOLF	5.00	3.48
BINIFERNOS2	44.66	110.37	DLATERCIA	3.05	2.32
BnBYM	100	35.13	DBYM	3.00	3.24

Al comparar las propiedades de las tablas 17 y 18, se aprecia que tanto los equipos de bombeo como los depósitos casi no varían su comportamiento entre una red y otra.

Tabla 19: Configuración de las variables del Escenario 1, formato Original.

Bomba	Porcentaje Utilización	Coste (€)	Deposito	Nivel inicial	Nivel final
BINFIERNOS	54.58	4.66	DAVILESES	2.45	2.54
BMARTINEZ	100	1.64	DMARTINEZ	2.40	2.40
BAVILESES	100	2.37	DAEROPUERTO	3.66	1.81
BSUCINA	0.00	0.00	DVALLADOLISES	2.55	2.33
BROLDAN	98.56	279.06	DMOSA	3.05	4.23
BGOLFLAMURTA	26.96	1.25	DLAMURTA	1.00	1.22
BGOLFCORVERA	0.00	0.00	DCORVERAGOLF	5.00	3.48
BINIFERNOS2	45.42	110.69	DLATERCIA	3.05	2.40
BnBYM	100	34.78	DBYM	3.00	3.23

Tabla 20: Configuración de las variables del Escenario 1, formato Reducido.

Bomba	Porcentaje Utilización	Coste (€)	Deposito	Nivel inicial	Nivel final
BINFIERNOS	55.34	4.66	DAVILESES	2.45	2.54
BMARTINEZ	100	1.64	DMARTINEZ	2.40	2.40
BAVILESES	100	2.37	DAEROPUERTO	3.66	1.81
BSUCINA	0.00	0.00	DVALLADOLISES	2.55	2.33
BROLDAN	99.06	280.52	DMOSA	3.05	4.24
BGOLFLAMURTA	26.93	1.24	DLAMURTA	1.00	1.22
BGOLFCORVERA	0.00	0.00	DCORVERAGOLF	5.00	3.48
BINIFERNOS2	44.66	110.37	DLATERCIA	3.05	2.40
BnBYM	100	35.13	DBYM	3.00	3.23

Al igual que en el escenario anterior, las características de ambas redes son prácticamente idénticas. Se evidencia además que la única condición que cambia entre

el escenario 0 y el 1, son las características de la bomba BROLDAN ya que esta pasara a tomar agua desde una mayor cota, con lo que su coste de bombeo se vera sustancialmente reducido.

Tabla 21: Configuración de las variables del Escenario 2, formato Original.

Bomba	Porcentaje Utilización	Coste (€)	Deposito	Nivel inicial	Nivel final
BINFIERNOS	19.67	1.75	DAVILESES	2.45	0.22
BMARTINEZ	100	2.34	DMARTINEZ	2.40	2.40
BAVILESES	100	3.47	DAEROPUERTO	3.66	4.36
BSUCINA	0.00	0.00	DVALLADOLISES	2.55	1.61
BROLDAN	100	365	DMOSA	3.05	2.59
BGOLFLAMURTA	40.92	2.11	DLAMURTA	1.00	1.30
BGOLFCORVERA	0.00	0.00	DCORVERAGOLF	5.00	2.72
BINIFERNOS2	80.33	189.28	DLATERCIA	3.05	4.77
BnBYM	100	33.20	DBYM	3.00	3.13

Tabla 22: Configuración de las variables del Escenario 2, formato reducido.

Bomba	Porcentaje Utilización	Coste (€)	Deposito	Nivel inicial	Nivel final
BINFIERNOS	19.85	1.75	DAVILESES	2.45	0.22
BMARTINEZ	100	2.34	DMARTINEZ	2.40	2.40
BAVILESES	100	3.47	DAEROPUERTO	3.66	4.36
BSUCINA	0.00	0.00	DVALLADOLISES	2.55	1.61
BROLDAN	100	365	DMOSA	3.05	2.56
BGOLFLAMURTA	40.26	2.11	DLAMURTA	1.00	1.29
BGOLFCORVERA	0.00	0.00	DCORVERAGOLF	5.00	2.72
BINIFERNOS2	80.15	189.28	DLATERCIA	3.05	4.89
BnBYM	100	33.20	DBYM	3.00	3.15

Para este escenario además de su similitud entre la red original y reducida, se puede observar que los niveles en los depósitos se ven claramente mermados a lo largo del día debido al aumento de consumo en un 50%.

Para una correcta interpretación de la red existente en la realidad y de las posibles condiciones de funcionamiento de la misma, es importante corroborar que los modelos reducidos representan fielmente el comportamiento del modelo original. Para ello es muy importante en este caso particular verificar el comportamiento en los depósitos de cada sistema y compararlos en búsqueda de incidencias.

Siendo que ya es conocido el comportamiento de los depósitos y bombas en la red original y reducida para todos los escenarios y que se pudo constatar además que es el depósitos DAVILESES el que presenta un mayor grado de diferencia en la variación de

su nivel a lo largo del día, será este el depósito que se procederá a comparar para el escenario 1 y 2.

Las figuras 38 y 39 pertenecen al escenario 1 y 2 respectivamente. Éstas muestran la variación en los niveles en el depósito DAVILESES tanto para la red original como para el escenario reducido en ambos casos.

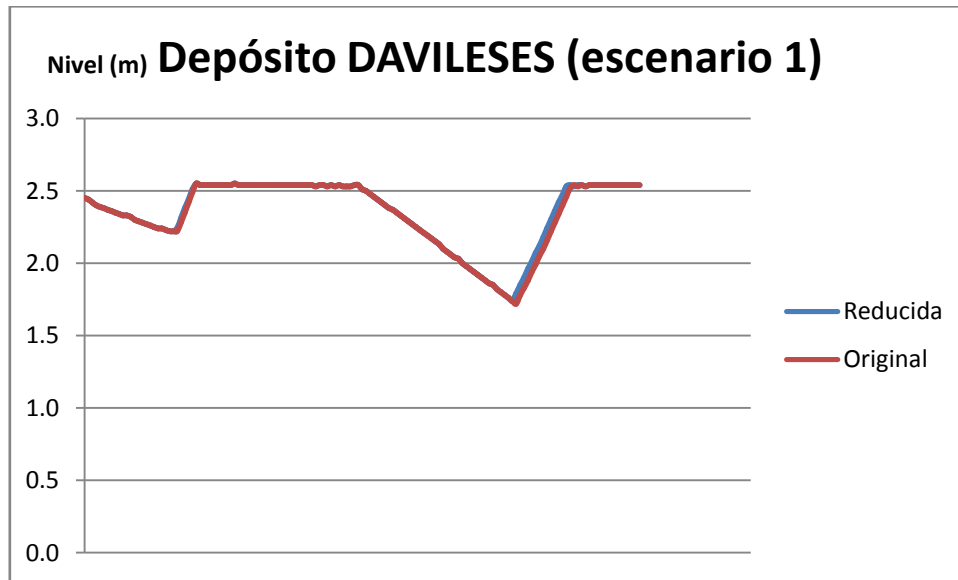


Figura 38: Variación del nivel del depósito DAVILESES en el escenario 1. (Red original y red reducida)

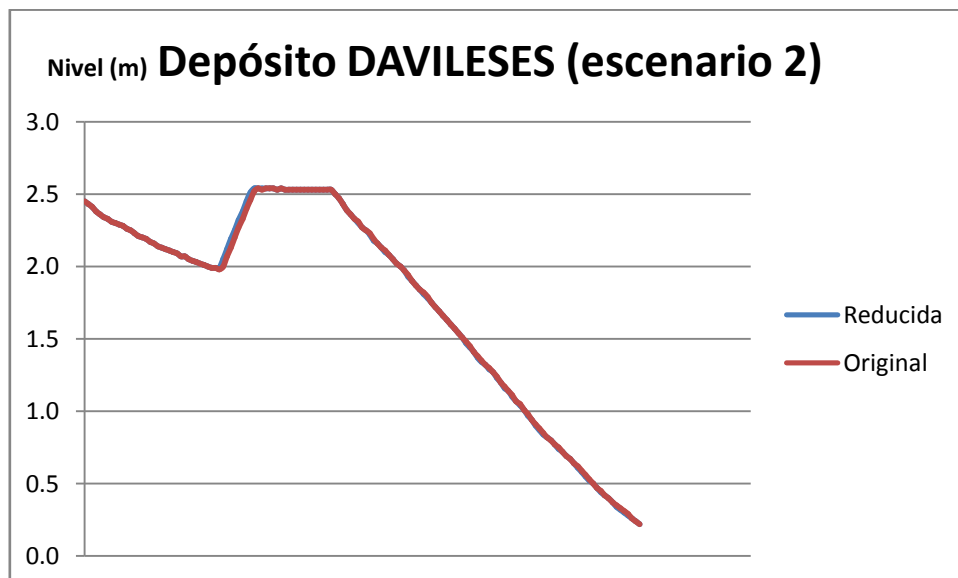


Figura 39: Variación del nivel del depósito DAVILESES en el escenario 2. (Red original y red reducida)

Como se aprecia en las figuras, la variación de los niveles en el depósito para ambos escenarios es prácticamente idéntica tanto para la red original como para los

escenarios reducidos. Los coeficientes de determinación entre estas curvas son $R^2 = 0.9916$ y $R^2 = 0.9997$ respectivamente.

Se puede entonces constatar que todos los escenarios reducidos son fieles reproducciones del comportamiento hidráulico de la red original y que por tanto son elementos que se pueden utilizar en la optimización energética de la red.

5.3 Optimización de los escenarios.

Para la optimización de los distintos escenarios anteriormente planteados, se debió estimar cuales serian los mejores parámetros relativos al algoritmo genético utilizado por HOLORED en cada uno de ellos. Para ello se analizaron y contabilizaron las variables de cada elemento presente en cada una de sus cadenas (soluciones) a ser manipuladas por el algoritmo.

Se estimo que para cada escenario diferente las cadenas de soluciones contaban para todos los casos entre 24 y 30 genes. Con este número se relacionó el tamaño de la población mínima y el índice de mutación necesario para obtener soluciones que pudieran ser aceptadas como buenas. El tamaño de población mínimo fue considerado el doble del tamaño de la cadena con el mayor número de genes y el índice de mutación se obtuvo como el inverso de este mismo número, el índice de cruzamiento se estableció de forma arbitraria y el número de generaciones sin cambio, necesarias para que la solución encontrada sea considerada óptima, fue elegida de un tamaño semejante al tamaño de la población.

Los valores utilizados en HOLORED referidos al algoritmo genético utilizado para todos los escenarios fue el siguiente:

Tabla 23: Parámetros del algoritmo genético más utilizados.

Parámetro	Valor
Tamaño población.	60
Iteraciones	60
Índice de cruzamiento	0.8
Índice de Mutación	0.04

Con estos valores se procedió a realizar la gran mayoría de las simulaciones en HOLORED, al buscar soluciones con algunas otras combinaciones de parámetros se llevo a la conclusión de que la solución obtenida con estos valores era una solución bastante cercana al óptimo global del sistema.

Los valores óptimos finales obtenidos por el software para cada escenario con la combinación de parámetros del algoritmo genético ya presentada, junto con el número de iteraciones que le tomo al software para encontrar la solución; se presentan a continuación:

Tabla 24: Costes de Bombeo optimo, asociados a cada Escenario.

Escenario	Coste HOLORED	Iteraciones	Coste EPANET
0	487.90	606	477.79
1	415.07	300	409.87
2	1295.63	608	575.10
3	493.49	1204	488.53
4	296.20	1064	295.30

En la tabla 24, se presentaron solo los mejores resultados obtenidos para cada escenario, sin embargo múltiples simulaciones fueron necesarias para alcanzar estos resultados. Se observa también en esta tabla, que los costes de bombeo obtenidos por HOLORED presentan diferencias con el coste energético calculado por EPANET, esto debido a los costes asociados a las penalizaciones de cada escenario.

Los resultados de cada escenario optimizado, presentando sus parámetros asociados al coste energético de la red: porcentaje de utilización y costo de cada bomba, y nivel inicial y final en los depósitos se presenta en las siguientes tablas:

Tabla 25: Configuración óptima de las variables del Escenario 0.

Bomba	Porcentaje Utilización	Coste (€)	Deposito	Nivel inicial	Nivel final
BINFIERNOS	22.28	4.33	DAVILESES	1.11	1.34
BMARTINEZ	100	1.64	DMARTINEZ	1.77	2.40
BAVILESES	100	2.37	DAEROPUERTO	2.98	3.04
BSUCINA	0.00	0.00	DVALLADOLISES	0.59	0.65
BROLDAN	93.75	341.44	DMOSA	2.56	2.56
BGOLFLAMURTA	27.86	1.17	DLAMURTA	0.97	1.25
BGOLFCORVERA	52.29	23.78	DCORVERAGOLF	4.53	4.51
BINIFERNOS2	48.47	93.87	DLATERCIA	1.34	1.65
BnBYM	42.03	9.19	DBYM	4.49	4.48

Tabla 26: Configuración óptima de las variables del Escenario 1.

Bomba	Porcentaje Utilización	Coste (€)	Deposito	Nivel inicial	Nivel final
BINFIERNOS	21.82	5.00	DAVILESES	1.01	1.20
BMARTINEZ	100	1.64	DMARTINEZ	0.99	2.40
BAVILESES	100	2.37	DAEROPUERTO	2.98	3.04
BSUCINA	0.00	0.00	DVALLADOLISES	0.08	0.13
BROLDAN	95.21	275.27	DMOSA	1.28	1.28
BGOLFLAMURTA	24.77	0.99	DLAMURTA	1.03	1.05
BGOLFCORVERA	52.86	32.17	DCORVERAGOLF	1.65	1.67
BINIFERNOS2	48.07	83.71	DLATERCIA	0.56	0.69
BnBYM	40.03	8.71	DBYM	4.19	4.18

En ambos escenarios los grupos de bombeo funcionan durante porcentajes del día similares, esto debido a que los estados de carga son los mismos para ambos escenarios. Aunque los niveles en los depósitos no son iguales entre al comienzo y al final del día en todos los casos, si se observa una tendencia a la similitud lo que implica una buena solución por parte del algoritmo optimizador.

Tabla 27: Configuración óptima de las variables del Escenario 2.

Bomba	Porcentaje Utilización	Coste (€)	Deposito	Nivel inicial	Nivel final
BINFIERNOS	30.85	5.94	DAVILESES	1.39	1.45
BMARTINEZ	100	2.33	DMARTINEZ	2.40	2.40
BAVILESES	100	3.47	DAEROPUERTO	1.16	1.86
BSUCINA	0.00	0.00	DVALLADOLISES	1.13	0.32
BROLDAN	100	365	DMOSA	2.56	1.50
BGOLFLAMURTA	37.15	1.89	DLAMURTA	1.31	1.31
BGOLFCORVERA	79.13	45.64	DCORVERAGOLF	1.86	1.86
BINIFERNOS2	74.61	150.82	DLATERCIA	0.78	1.55
BnBYM	0.00	0.00	DBYM	2.68	2.44

Se puede advertir de esta tabla que no es posible alimentar una demanda aumentada en un 50%, esto se observa en los depósitos DMOSA y DVALLADOLISES, los cuales bajan su nivel durante el día a pesar de que la bomba BROLDAN (que es la que los alimenta) esta activa las 24 horas. Es por esta razón que los costes obtenidos por HOLORED difieren en una gran cantidad con los obtenidos en EPANET, puesto que la penalización asociada a los desniveles en los depósitos es muy grande. En este caso una solución seria aumentar la capacidad de BROLDAN a modo de poder obtener una configuración optima de operación.

Para los nodos que tenían restricción de presiones mínimas, se muestra la presión que alcanzan estos durante el momento más desfavorable del día.

Tabla 28: Presión mínima de los nodos con restricción.

Nodo	P min Requerida	P min Escenario 0	P min Escenario 1	P min Escenario 2
544	20.05	21.16	21.18	20.62
PCC0483	53.72	66.20	66.20	61.39
PCC0883	25.00	63.95	63.66	63.48
PCC1050	25.97	83.88	83.84	83.15
PCC2240	25.00	28.72	28.42	25.84
PCC3171	25.00	63.95	63.66	63.48

Se puede observar que los escenarios optimizados evolucionan hasta una solución, donde se pueden cumplir todas las presiones mínimas en los nodos con restricción, por lo que no existen penalizaciones asociadas a este tipo en estos escenarios.

Tabla 29: Configuración óptima de las variables del Escenario 3.

Bomba	Porcentaje Utilización	Coste (€)	Deposito	Nivel inicial	Nivel final
BINFIERNOS	23.41	4.44	DAVILESES	0.93	1.29
BMARTINEZ	100	1.64	DMARTINEZ	2.30	2.40
BAVILESES	100	2.37	DAEROPUERTO	2.98	3.04
BSUCINA	0.00	0.00	DVALLADOLISES	0.72	0.77
BROLDAN	93.74	351.54	DMOSA	2.37	2.37
BGOLFLAMURTA	24.66	1.18	DLAMURTA	0.56	0.57
BGOLFCORVERA	53.00	31.48	DCORVERAGOLF	0.90	0.92
BINIFERNOS2	44.77	87.38	DLATERCIA	1.95	1.88
BnBYM	39.03	8.49	DBYM	3.68	3.67

Para este escenario una buena solución es encontrada, sin embargo a pesar de poseer la posibilidad de manipular una tubería (la cual si es manipulada 1 vez) no puede presentar soluciones mejores a las encontradas en el escenario 0. Esto se puede deber a que la manipulación de esta no puede aportar mejoras al sistema o debido a que la solución óptima con esta nueva variable no ha sido encontrada.

Tabla 30: Configuración óptima de las variables del Escenario 4.

Bomba	Porcentaje Utilización	Coste (€)	Deposito	Nivel inicial	Nivel final
BINFIERNOS	26.28	4.69	DAVILESES	0.34	1.04
BMARTINEZ	100	1.64	DMARTINEZ	2.33	2.40
BAVILESES	100	2.37	DAEROPUERTO	3.73	3.79
BSUCINA	0.00	0.00	DVALLADOLISES	0.41	0.53
BROLDAN	66.19	195.46	DMOSA	2.09	2.09
BGOLFLAMURTA	24.66	1.12	DLAMURTA	0.57	0.61
BGOLFCORVERA	37.09	17.99	DCORVERAGOLF	1.10	1.14
BINIFERNOS2	24.81	67.31	DLATERCIA	0.56	0.57
BnBYM	23.81	4.73	DBYM	3.03	3.04

Junto con presentar una buena solución de costo energético, el escenario 4 presenta una baja significativa en el consumo de caudales, consumiendo tan solo el 93% que los escenarios 0, 1 y 3. Lo que implica una reducción del 34% del volumen de fugas en la red, bajando este de unos 1230 m^3 a unos 813 m^3 aproximadamente.

Para los nodos que poseen restricción de presiones mínimas, se muestra la presión que alcanzan estos durante el momento más desfavorable del día.

Tabla 31: Presión mínima en los nodos con restricción. Escenarios 3 y 4.

Nodo	P min Requerida	P min Escenario 3	P min Escenario 4
544	20.05	21.18	17.39
PCC0483	53.72	65.98	49.02
PCC0883	25.00	64.22	61.76
PCC1050	25.97	83.92	80.25
PCC2240	25.00	28.72	27.80
PCC3171	25.00	64.22	61.76

El escenario 4 es el único que presenta problemas de presiones mínimas en la red, esto debido a que al poseer coeficientes emisores en los nodos, una baja de presión en ellos significa menor consumo y por lo tanto menor coste de bombeo. Sin embargo es debido a esta propiedad que este escenario presenta la mejor solución desde el punto de vista de optimización de costo energético.

Los tiempos de cálculo que necesitó HOLORED para converger a una solución variaron dependiendo del escenario y todos sus parámetros asociados; para un computador con un procesador de 1.5GHz y 480 mb RAM, las simulaciones variaron desde 5 a 20 minutos, siendo el promedio de estas 9 minutos, lo que implica que los tiempos de cálculo son de un orden de magnitud similar a tiempos de operación de la red de abastecimiento.

Del resultado de la optimización se obtuvo entonces una combinación de controles simples que indican la mejor combinación de operaciones a realizar en cada escenario a fin de alcanzar el objetivo de minimizar los costes de bombeo de la red de abastecimiento del Campo de Murcia. Los controles asociados al escenario 0 que logran la solución óptima del sistema, se puede observar en la figura a siguiente:

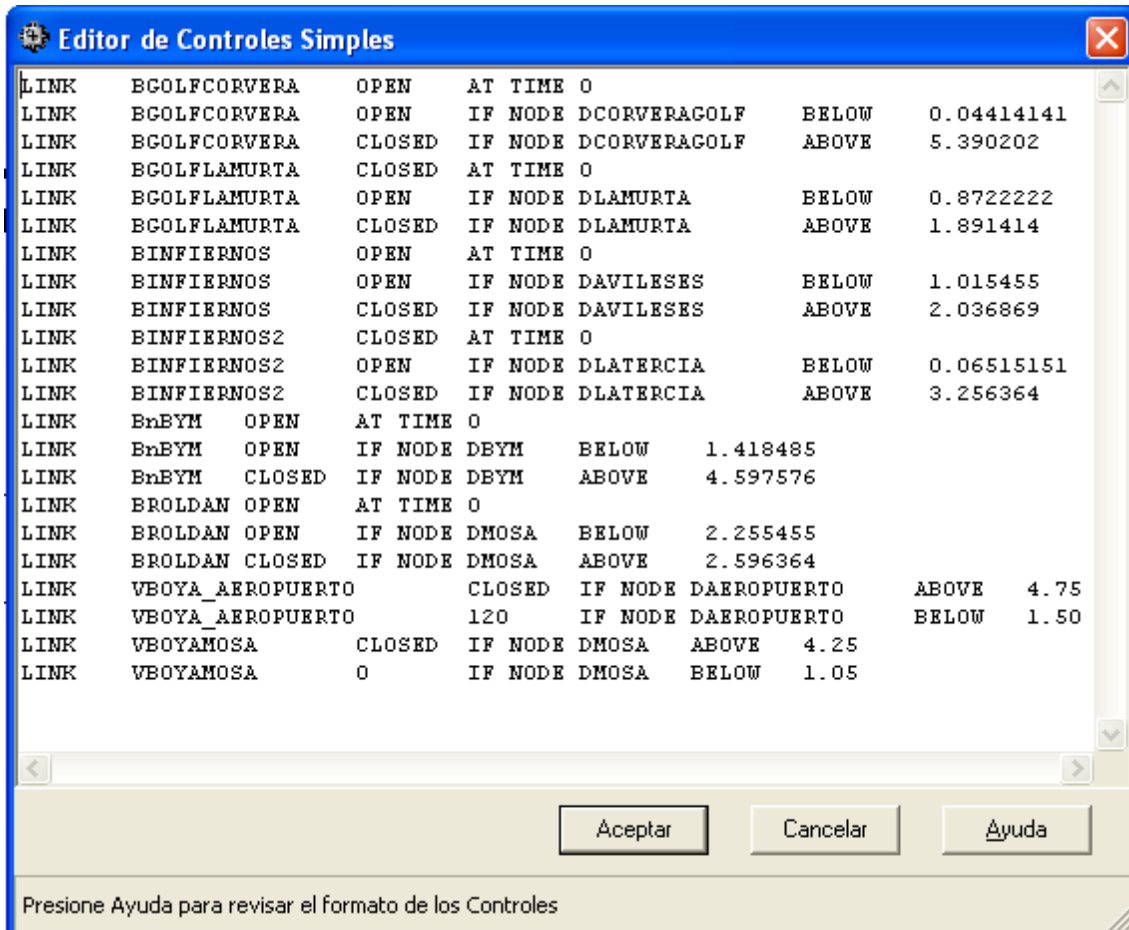


Figura 40: Controles simples de la solución óptima. Escenario 0.

Al introducir estos controles y los correspondientes niveles iniciales en el escenario 0, sobre la red en tamaño original, se pudo observar el comportamiento en detalle de la red de abastecimiento. Se pudo constatar entonces las presiones en todos los nudos, la variación de los niveles en los depósitos y los costos de bombeo arrojados, comprobando así que los resultados obtenidos con HOLORED son solución óptima y factible para cada uno de los escenarios planteados.

5.4 Comparación de resultados generales

Para poder comprender de forma más clara los beneficios obtenidos durante el proceso de esqueletización y optimización de la red de abastecimientos del Campo de Murcia, se procedió a comparar los resultados obtenidos de la optimización versus los valores iniciales asociados a la red que se encuentra en funcionamiento hoy en día.

Tabla 32: Comparación entre la red original y optimizada. Escenario 0

Red	Tamaño Red	Tiempo Simulación	Tiempo de Optimización	Coste bombeo (€)
Original	100%	13 segundos	Incompatible	518.90
Optimizada	2%	1 segundos	7 minutos	487.90

Asociada a los resultados de coste de bombeo obtenidos por la optimización, es importante destacar que en la red original y de la forma en que se encontraban planteados los controles simples que regulaban su funcionamiento, los niveles iniciales en los depósitos no se mantenían al final del día.

Dado que la simulación original fue planteada por EMUASA para un periodo de 72 horas, el llenado de los depósitos que se habían vaciado durante las primeras 24 horas significaría un aun mayor coste de operación, es por esta razón que el modelo de optimización fue pasado a 24 horas para una mejor operación y para encontrar una solución mas eficiente al problema.

Por estas razones es que podemos asegurar que la solución encontrada por el algoritmo de optimización presenta claras mejoras en la operación de la red del Campo de Murcia, significando una sustancial baja en los costos y unas mejores condiciones de servicio en general. Además asociada a la red simplificada encontramos claros beneficios en la reducción del tiempo de cálculo, sin la perdida de datos asociados a la red.

CAPITULO VI.- CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones

Se ha planteado la optimización energética de los controles y características asociados a la operación de la red de abastecimiento del Campo de Murcia, para ello un proceso conjunto de dos partes ha sido desarrollado en búsqueda de dar solución el problema. Una primera instancia consiste en la realización de un modelo de análisis reducido de la red. Esta primera fase permitió dar solución al problema del tamaño de la red original, permitiendo una reducción sustancial de esta y facilitando su maniobrabilidad. La segunda etapa del proyecto, contempló la optimización de este modelo de análisis reducido mediante la utilización de técnicas meta-heurísticas, basándose principalmente en la utilización de algoritmos genéticos para dar solución al problema de encontrar a solución óptima del problema.

Se presentan a continuación las conclusiones asociadas a cada etapa del proyecto y a los resultados obtenidos durante el desarrollo de este.

- Para la red del Campo de Murcia se han planteado diversos escenarios de funcionamiento, sin embargo cabe destacar que todos estos representan solo un pequeño porcentaje de todas las posibles combinaciones de posibles funcionamientos en la red.
- Puesto que un sin número de elementos componen la red, es viable pensar y plantear escenarios para cada situación diferente de fallo o conectividad en nuevas tuberías, manipulación de válvulas del sistema, implementación de nuevos sectores en la red por causas de crecimiento demográfico, potenciales demandas punta por eventos singulares, nuevas presiones mínimas requeridas por un cambio en las necesidades de servicio, entre otras múltiples variables.
- Se planteó una metodología para la obtención de un escenario que considere la posibilidad de fugas en el sistema. Esta metodología permitió así encontrar los coeficientes emisores en los nodos y la variación de los caudales consumidos por estos (sin fugas).
- Sería importante considerar también los costes asociados al mantenimiento del sistema, los cuales están relacionados principalmente a las cantidades de maniobras de arranque y paro en los equipos de bombeo, así como a la variación de la presión en el sistema.

- Los métodos de esqueletización estudiados permitieron la creación de todos los escenarios reducidos. Estas técnicas mostraron una gran capacidad para reducir la red a un tamaño considerablemente menor que la red original.
- Del análisis de estos métodos, se pudo constatar que una correcta y automática aplicación de estos puede significar una esqueletización a gran escala de casi cualquier red existente, manteniendo un alto grado de similitud en las características hidráulicas del sistema.
- En el presente estudio se pudo apreciar que a pesar de reducir la red en un 98% de su tamaño y por lo tanto eliminar muchos de los elementos de la red, el comportamiento hidráulico de todos los componentes asociados a costes energéticos se mantuvo prácticamente intacto, permitiendo así asegurar que el modelo de análisis reducido es un esquema que representa fielmente el comportamiento de la red original. Además los costes calculados con EPANET asociados a la red original se mantienen casi iguales a los obtenidos en la red reducida.
- La esqueletización además al ser una técnica aún en evolución, podría permitir resolver mediante la utilización de nuevas herramientas, la reducción de redes con una alta complejidad y un gran número de tramos mallados.
- La técnica de esqueletización descrita en el apartado 3.2.6, sería una gran contribución a los procesos automáticos de esqueletización, dando paso a posibles estudios relativos a este tema.
- Durante el proceso de optimización de la red de abastecimiento del Campo de Murcia, los modelos meta-heurísticos se mostraron como una herramienta capaz de abordar el problema.
- En particular el algoritmo genético utilizado por HOLORED mostró ser un algoritmo robusto en cuanto a la calibración de sus parámetros, permitiendo encontrar soluciones bastante cercanas al óptimo global sin tener que modificar mayormente sus parámetros. Esto significa una gran ventaja para el operador del software, ya que al no tener que descifrar cuales son con exactitud los mejores parámetros a utilizar, aun es posible llevar a cabo la simulación del problema y dar con una solución aceptable del mismo.
- HOLORED presentó una gran capacidad de convergencia hacia soluciones bastante buenas tanto a nivel de costo como de funcionamiento deseado de la red. Esto fue posible gracias a las penalizaciones asociadas a falta de presión en los nudos y desnivel en los depósitos del sistema.
- En general la herramienta HOLORED fue capaz de alcanzar soluciones en tiempos relativamente pequeños, lo cual es deseado cuando se desean implementar maniobras de operación en el sistema.

- En la red analizada, las soluciones encontradas por el software representaron una ventaja significativa en los costes asociados al bombeo, permitiendo dar una solución al problema de la optimización de la red.
- Para todos los escenarios analizados se encontró una solución que representaba mejora tanto en los costes de operación del sistema, como en sus condiciones de servicio
- Al comparar los distintos escenarios de funcionamiento (0, 1, 2, 3 y 4) se pudo constatar que la manipulación de válvulas y líneas en el sistema, puede aportar grandes ventajas en la operación del sistema.
- Se obtuvieron costos significativamente menores asociados al escenario número 4, puesto que una manipulación de válvulas en este significó un menor volumen de bombeo.
- La manipulación de válvulas como herramienta optimizadora permite también la disminución del volumen de fugas y por ende un menor consumo energético.

6.2 Desarrollos futuros.

- Estudios futuros podrían contemplar la posibilidad de utilizar las técnicas de esqueletización y la herramienta HOLORED para dar solución a diversas redes, permitiendo así que estas puedan alcanzar su nivel óptimo de funcionamiento.
- Otros estudios se podrían concentrar en la múltiple simulación de la red del Campo de Murcia a modo de dar con el óptimo global del sistema para diferentes escenarios.
- Mejoras del estudio podrían contemplar los rendimientos específicos de cada grupo de bombeo, incluyendo su curva de rendimientos. Asignando la posibilidad de costes específicos en cada bomba.
- Ampliar la herramienta HOLORED con otros algoritmos meta-heurísticos como motor de calculo, entre los cuales se podrían considerar los ACO, HS, PSO,SFL, entre otros.

BIBLIOGRAFIA

Alperovits, E., Shamir, U. 1977. "Design of optimal water distribution systems." *Water Resour. Res.*, 13(6), 885–900.

Chase, D. V., Ormsbee, L. E. 1993. "Computer generated pumping schedules for satisfying operation objectives." *J. Am. Water Works Assoc.*, 85(7), 54–61.

Dorigo, M., Maniezzo, V., Colomi, A. 1996. "Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B*, 26(1), 29–41.

Elbeltagi, E., Hegazy, T., Grierson, D. 2005. "Comparison Among Five Evolutionary-Based Optimization Algorithms", *Journal of Advanced Engineering Informatics*, Elsevier Science, Vol. 19, No. 1, pp. 43-53.

Farmani, R., Savic, D. A., Walters, G. A. 2005. "Evolutionary multi-objective optimization in water distribution network design." *Eng. Optimiz.*, 37(2), 167–183.

Fujiwara, O., Khang, D. B. 1990. "A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks." *Water Resour. Res.*, 26(4), 539–549.

Geem, Z. W. 2001. "Optimal cost design of water distribution networks using harmony search". Environmental Planning and Management Program. John Hopkins University.

Geem, Z. W. 2006. "Optimal cost design of water distribution networks using harmony search." *Eng. Optim.*, 38(3), 259–280.

Geem, Z. W. 2009. "Harmony search optimization to the pump-included water distribution network design." *Civ. Eng. Environ. Syst.*, 26(3), 211–221.

Gessler, J. 1985. "Pipe network optimization by enumeration." *Proc., Computer Applications for Water Resources*, ASCE, New York, 572– 581.

Haestad Methods INC. 2002. "Automated Skeletonization Techniques". Disponible en Internet en <http://www.haestad.com>. (Fecha de acceso: 25 de Julio, 2011).

IBERDROLA. Disponible en Internet <<http://www.iberdrola.es>> (Fecha de acceso: 15 de septiembre, 2011).

Jowitt, P. W., Germanopoulos, G. 1992. "Optimal pump scheduling in water supply networks." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 118(4), 406–422.

Lansey, K. E., Awumah, K. 1994. "Optimal pump operations considering pump switches." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 120(1), 17–35.

Leon, C., Martin, S., Elena, J. M., Luque, J. 2000. "EXPLORE— Hybrid expert system for water networks management." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 126(2), 65–74.

Luna, F. 2008. Meta heurísticas avanzadas para problemas reales en redes de telecomunicaciones. Universidad de Málaga.

Mahdavi, M., Fesanghary, M., Damangir, E. 2007. "An improved harmony search algorithm for solving optimizatin problems". *Applied Mathematics and Computation* 188, pp 1567-1579.

Nitivattananon, V., Sadowski, E. C., Quimpo, R. G. 1996. "Optimization of water supply system operation." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 122(5), 374–384.

Omran, M. Mahdavi, M. 2008. Global-best harmony search. *Applied Mathematics and Computation*, 198(2):643-656.

Ormsbee, L. E., Reddy, S. L. 1995. "Nonlinear heuristic for pump operations." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 121(4), 302–309.

Ostfeld, A., Tubaltzev, A. 2008. "Ant colony optimization for least cost design and operation of pumping and operation of pumping water distribution systems". *J. Water Resour. Plann. Manage.* 134(2), 107–118.

Prasad, T. D., Park, N.-S., 2004. "Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 130(1), 73–82.

Rao, Z., Wicks, J., West, S. 2005. "ENCOMS—An energy cost minimization system for real-time, operational control of water distribution networks." *Proc., 8th Int. Conf. on Computing and Control for the Water Industry*, D. A. Savic, G. A. Walters, R. King, and S. T. Khu, eds., University of Exeter, Exeter, U.K., 85–90.

Salomons, E. 2001. "Optimal design of water distribution systems facilities and operation." MS thesis, Technion, Haifa, Israel (in Hebrew).

Savic, D. A., Walters, G. A., Schwab, M. 1997. "Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling in water supply." *Lect. Notes Comput. Sci.*, 1305, 227–236.

Savic, D., Walters, G. 1997. "Genetic algorithms for least cost design of water distribution networks." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 123(2), 67–77.

Schaake, J. C., Lai, D. 1969. "Linear programming and dynamic programming application to water distribution network design." Rep. No. 116, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.

Shamir, U., Salomons, E. 2008. "Optimal Real-Time Operation of Urban Water Distribution Systems Using Reduced Models", *Journal of Water Resources Planning and Management Division, ASCE*, Vol. 134, No. 2, pp. 181-185.

Simpson, A. R., Dandy, G. C., Murphy, L. J. 1994. "Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 120(4), 423–443.

Ulanicki, B., Zhenpfund, A., Martinez, F. 1996. "Simplification of water distribution models." *Proc., Hydroinformatics 96*, A. Muller, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 493–500.

Vairavamoorthy, K., Ali, M. 2005. "Pipe index vector: A method to improve genetic-algorithm-based pipe optimization." *J. Hydraul. Eng.*, 131(12), 1117–1125.

van Zyl, J. E., Savic, D. A., Walters, G. A. 2004. "Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 130(2), 160–170.

Wong, F. 2002. "Algoritmos Genéticos". Disponible en Internet http://ramirezsolozano.blogspot.com/2010/07/algoritmos-geneticos_10.html (Fecha de acceso: 11 de Septiembre, 2011).

Yu, G., Powell, R. S., Sterling, M. J. H. 1994. "Optimized pump scheduling in water distribution systems." *J. Optim. Theory Appl.*, 83(3), 463–488.

ANEXO 1. CURVAS DE CONSIGNA

La confección de curvas de consigna, fue necesaria en cada nodo resultante del proceso de esqueletización de tramos ramificados, ya que al eliminar sectores completos y cargar sus demandas en los nodos cabecera de estos, fue necesario relacionar la presión de los nodos eliminados de la red original al nodo que permanecía en la red reducida. Las curvas de consigna de cada sector eliminado permiten traspasar esta información durante el proceso de esqueletización por tramos ramificados.

Para cada sector el procedimiento utilizado es fue el siguiente:

1º Crear un archivo en EPANET que contenga todos los nodos a ser eliminados y también el nodo cabecera del sector, manteniendo las cotas y consumos de los nodos; así como las características de cada línea y válvula del sector. Al nodo cabecera se conecta un embalse a una cota determinada (Hdep), mediante una tubería que no presente pérdidas de carga.

2º Se crea una curva de modulación en forma de rampa ascendente, la cual permitió crear una simulación por escenarios del comportamiento de los nodos en la red para distintos coeficientes de modulación. Como valor máximo de la rampa ascendente se considero el valor 3.6, puesto que es el mayor coeficiente de modulación presente en todos los patrones de consumo de la red del campo de Murcia. Se carga a todos los nodos de la red con un patrón de consumos igual a la rampa ascendente.

3º Una vez ejecutada la simulación en EPANET para la red en cuestión, se procede a determinar el nodo crítico de esta para cada instante de la simulación, la cual simula cada escenario de consumo posible en la red. Esto es necesario puesto que con la variación del consumo de los nodos es posible que la condición de nodo crítico se valla modificando con el tiempo. El nodo crítico debe ser seleccionado solamente entre los nodos que poseen un consumo asociado.

4º Determinados los nodos críticos de la red y durante que rango de coeficientes de modulación (de la rampa ascendente) se intercalan estos, es necesario determinar en ellos cual es la presión que necesitan en cada instante para alcanzar la presión mínima requerida del sistema. La forma de determinar esta presión viene dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{P_{requerida}}{\gamma} = \frac{P_{min}}{\gamma} + H_{dep} - Z_{Ncab} - \frac{P_{NCi}}{\gamma} \quad (8)$$

Donde P_{min} es la presión mínima requerida en todos los nodos del sistema, H_{dep} es la altura del embalse, Z_{Ncab} es la cota del nodo cabecera del sector y P_{NCi} es la presión existente en el nodo critico en cada instante de la simulación.

5º Determinada la presión requerida en cada nodo critico en cada instante, la curva de consigna se construirá con los valores obtenidos de la ecuación (8) para cada valor de la rampa ascendente.

Las diferentes redes, sus valores de curva de consigna y la grafica representativa de esta; se presenta a continuación para todos los sectores eliminados.

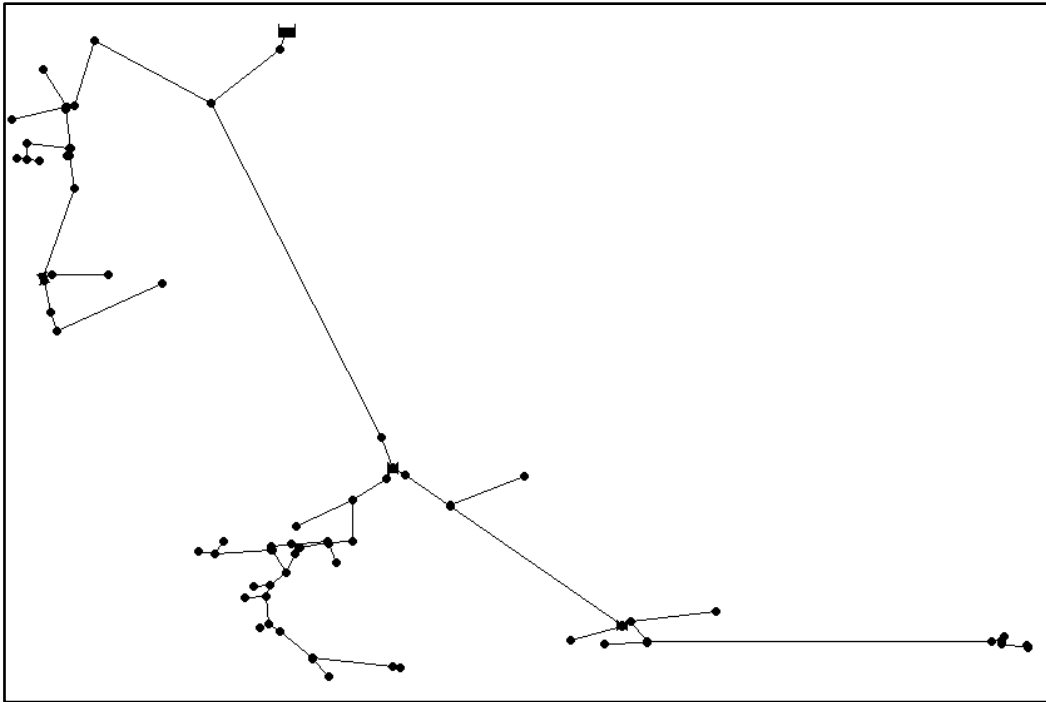


Figura 41: Red del nodo 154.

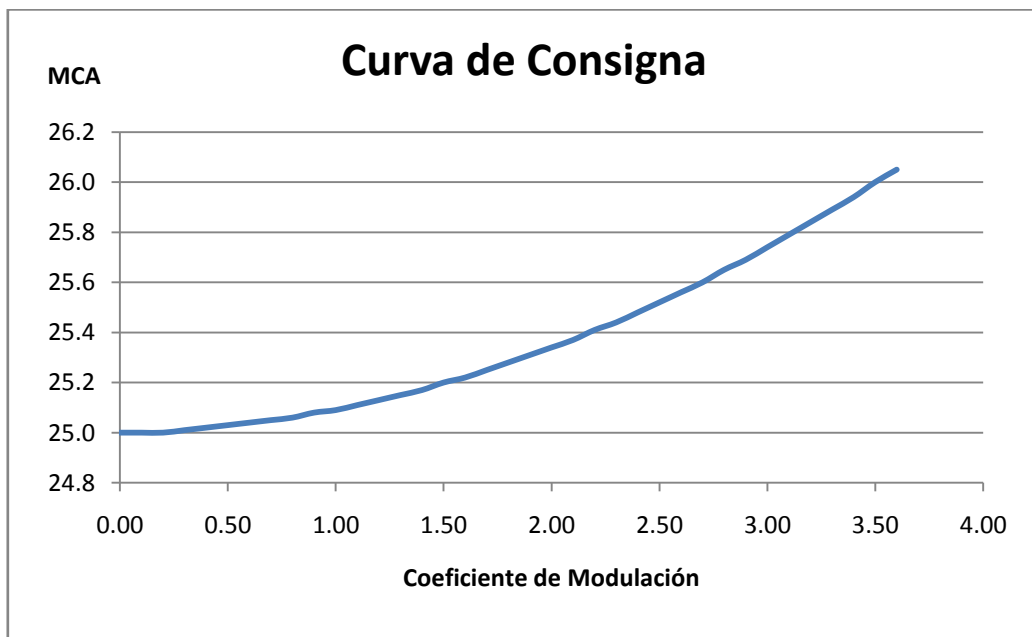


Figura 42: Curva de Consigna del nodo 154.

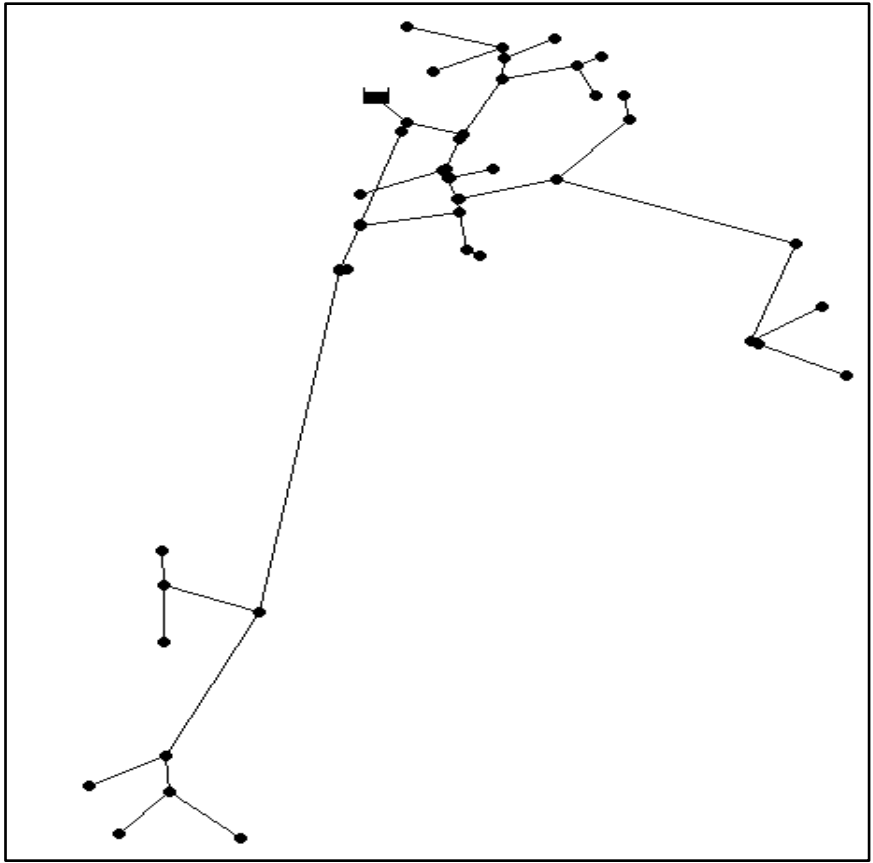


Figura 43: Red del nodo 157.

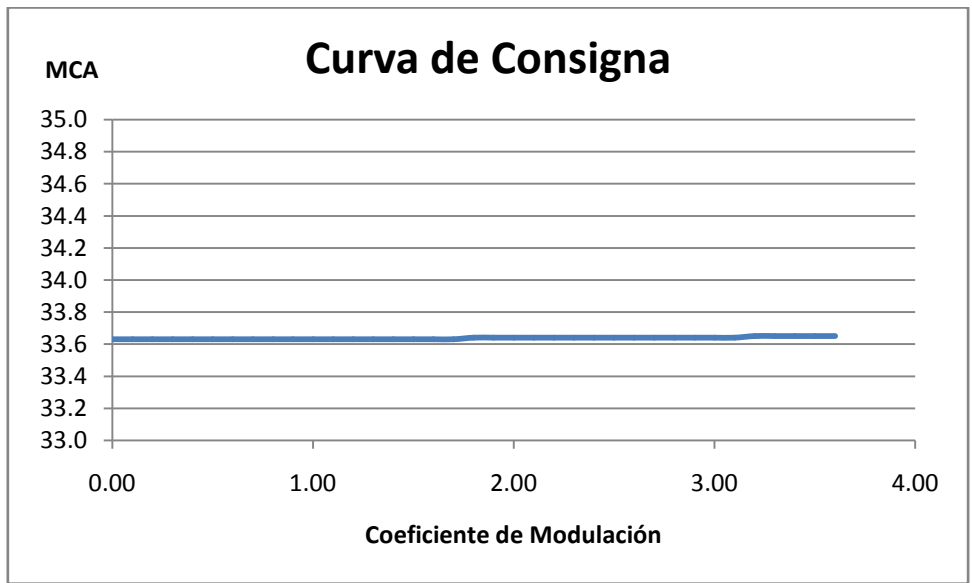


Figura 44: Curva de consigna del nodo 157.

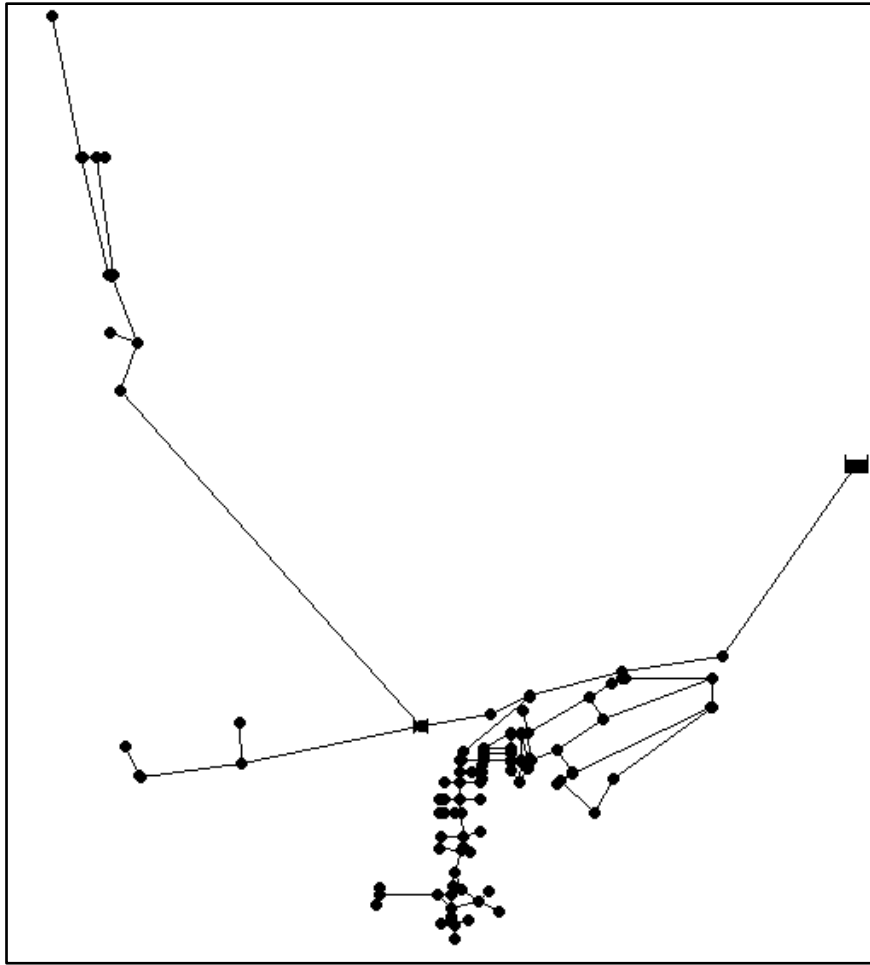


Figura 45: Red del nodo 166.

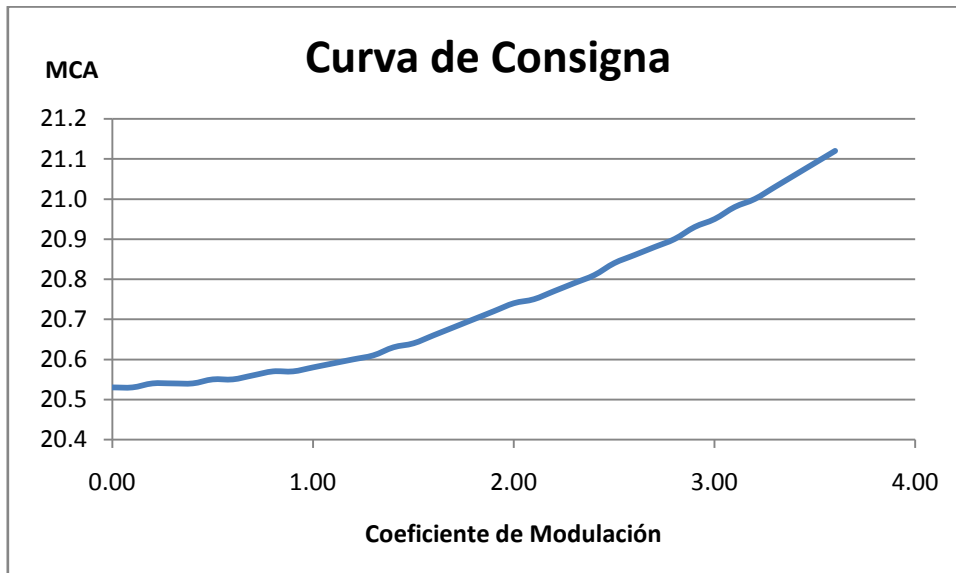


Figura 46: Curva de consigna del nodo 166.

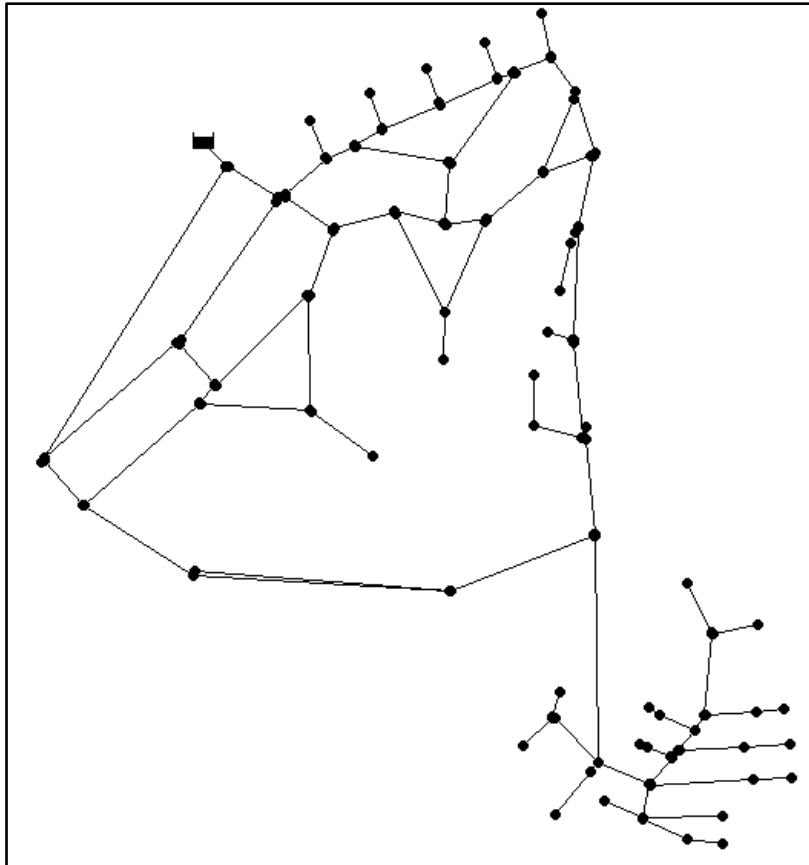


Figura 47: Red del nodo 388.

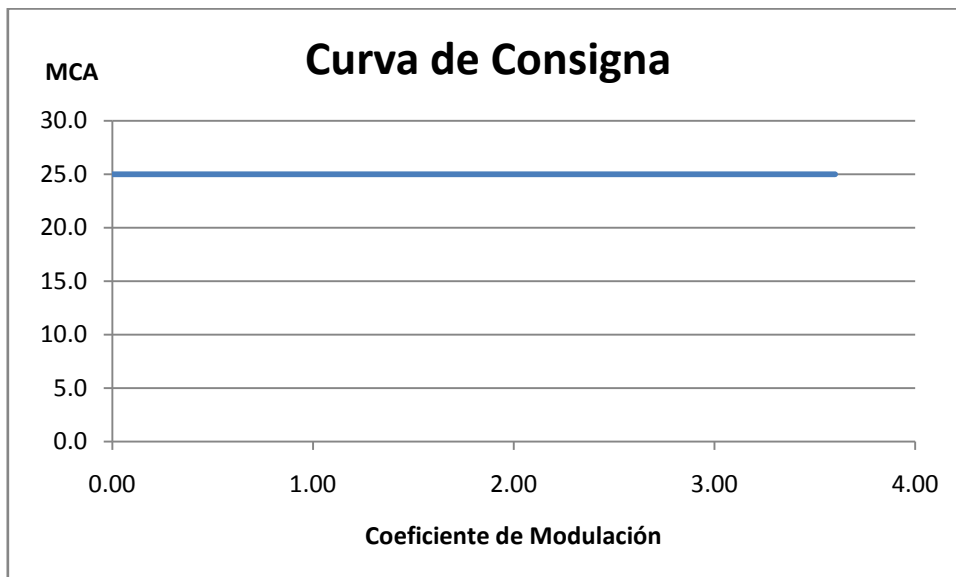


Figura 48: Curva de consigna del nodo 388.

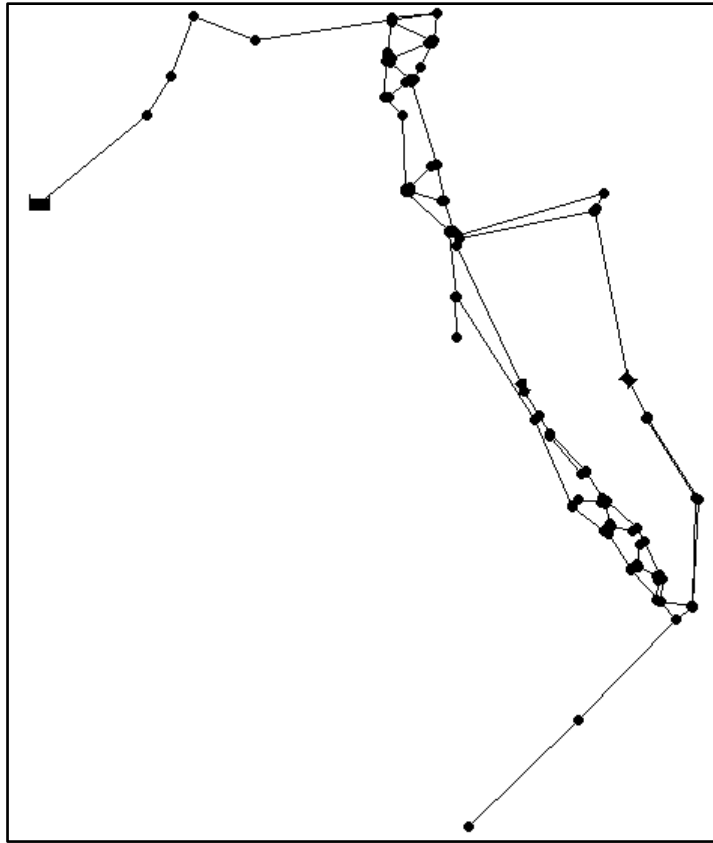


Figura 49: Red del nodo 538.

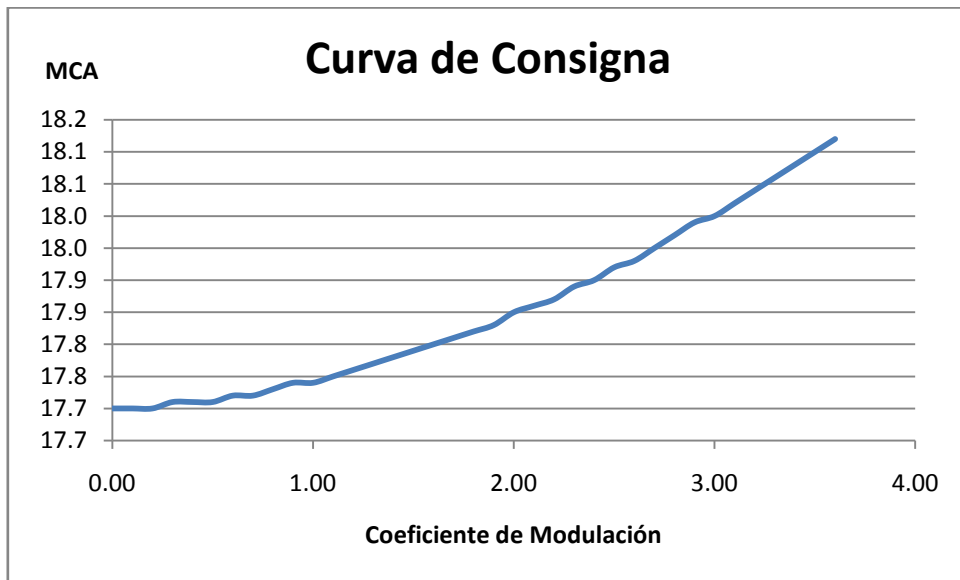


Figura 50: Curva de consigna del nodo 538.

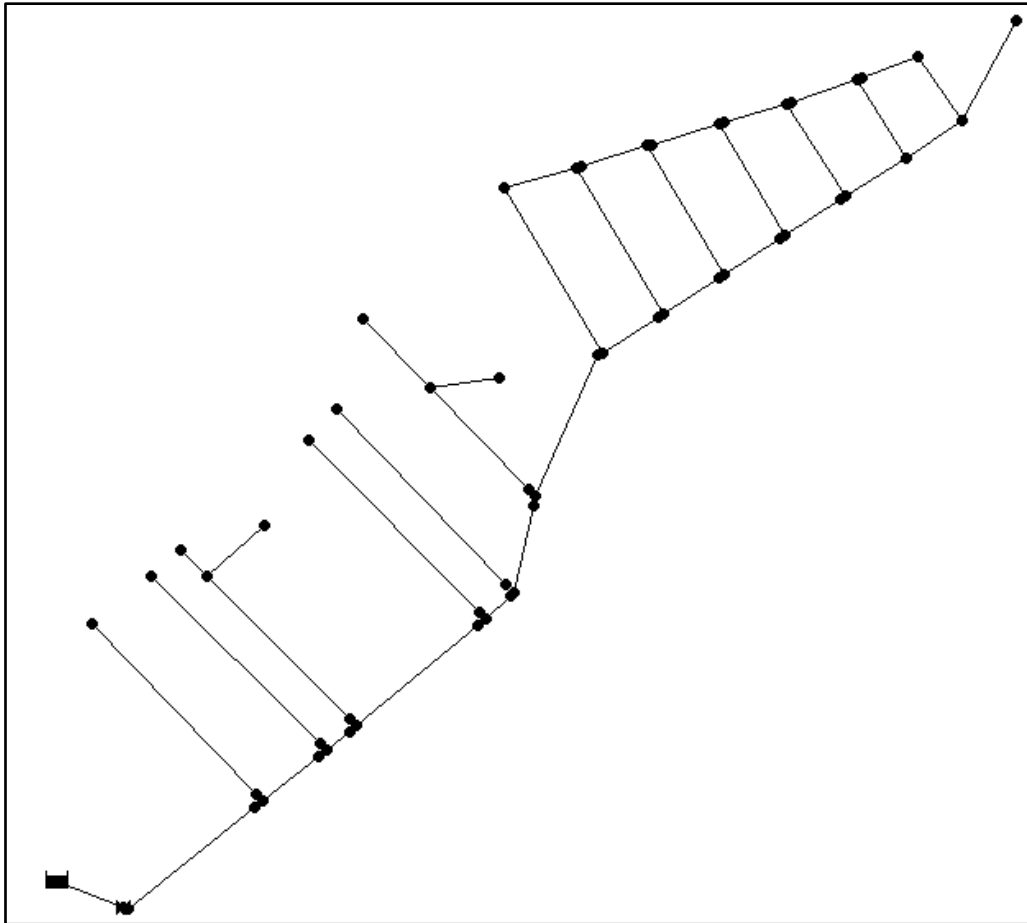


Figura 51: Red del nodo 544.

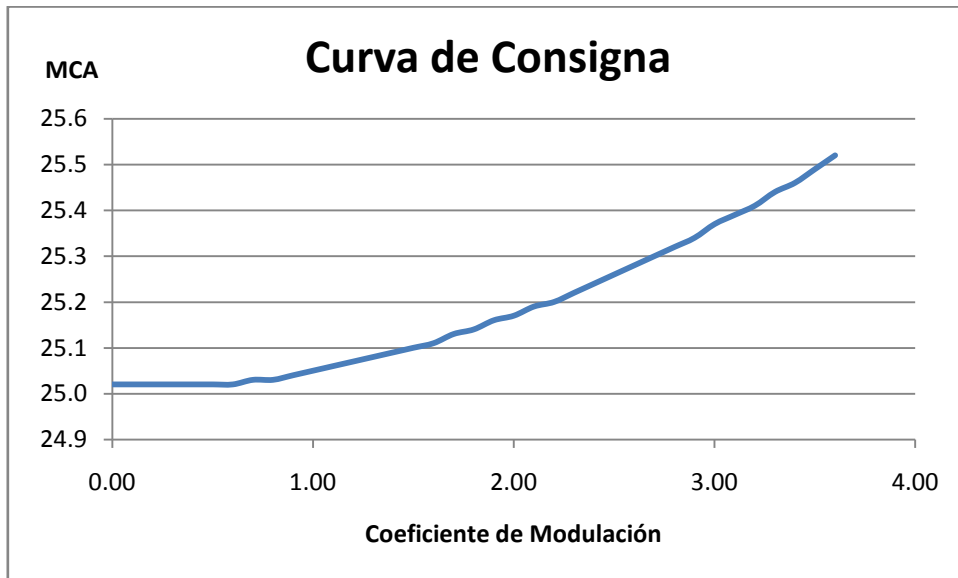


Figura 52: Curva de consigna del nodo 544.

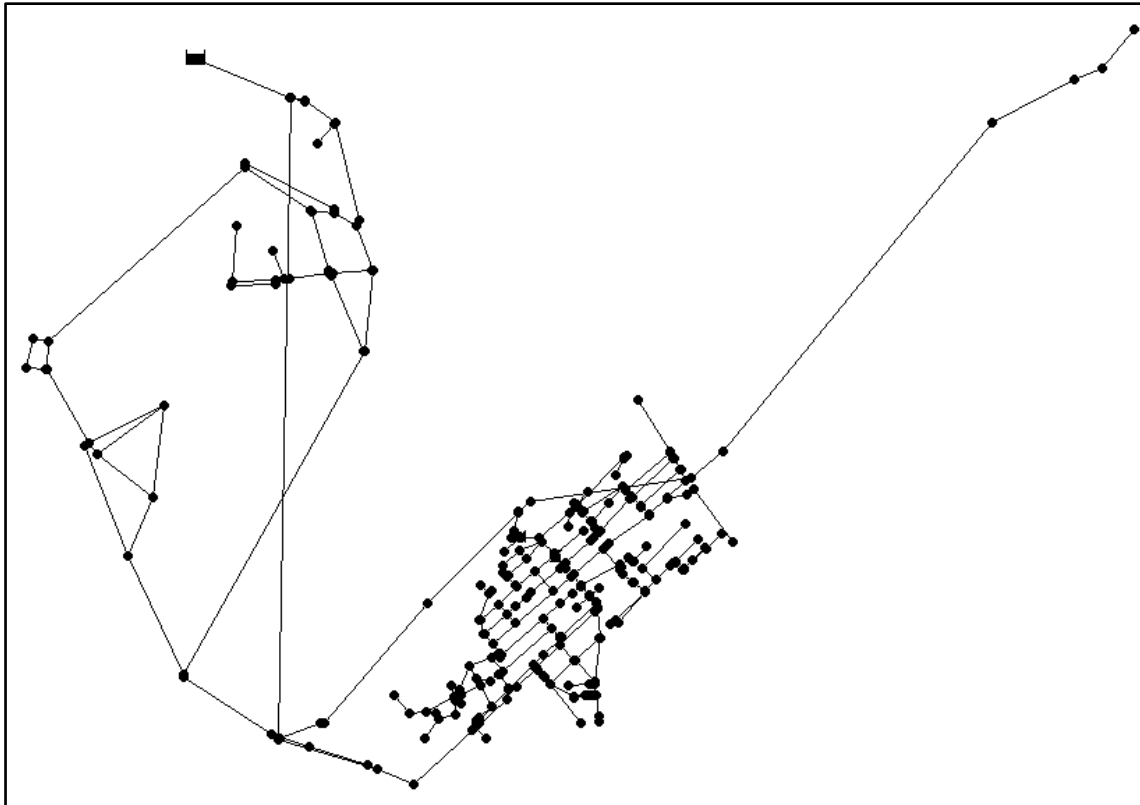


Figura 53: Red del nodo 682.

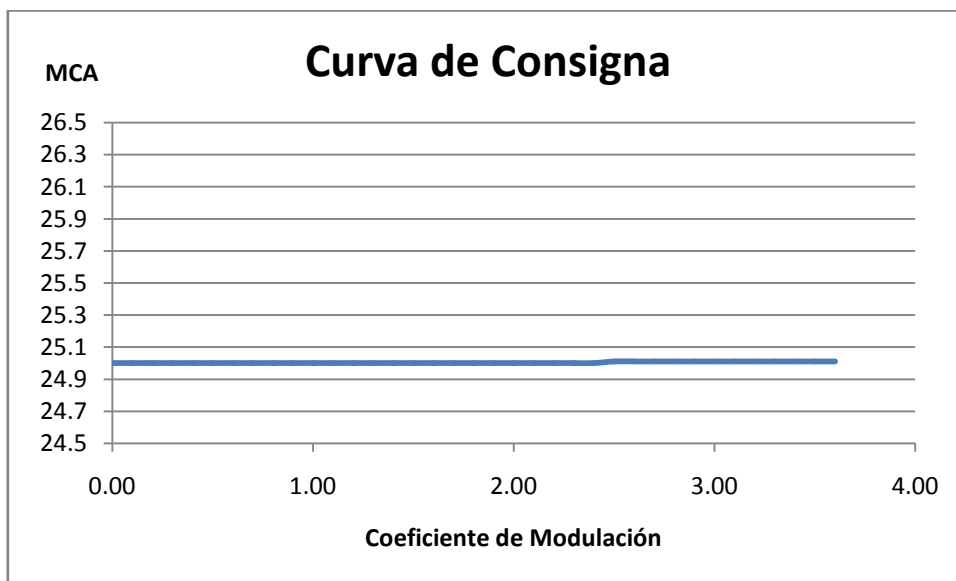


Figura 54: Curva de consigna del nodo 682.

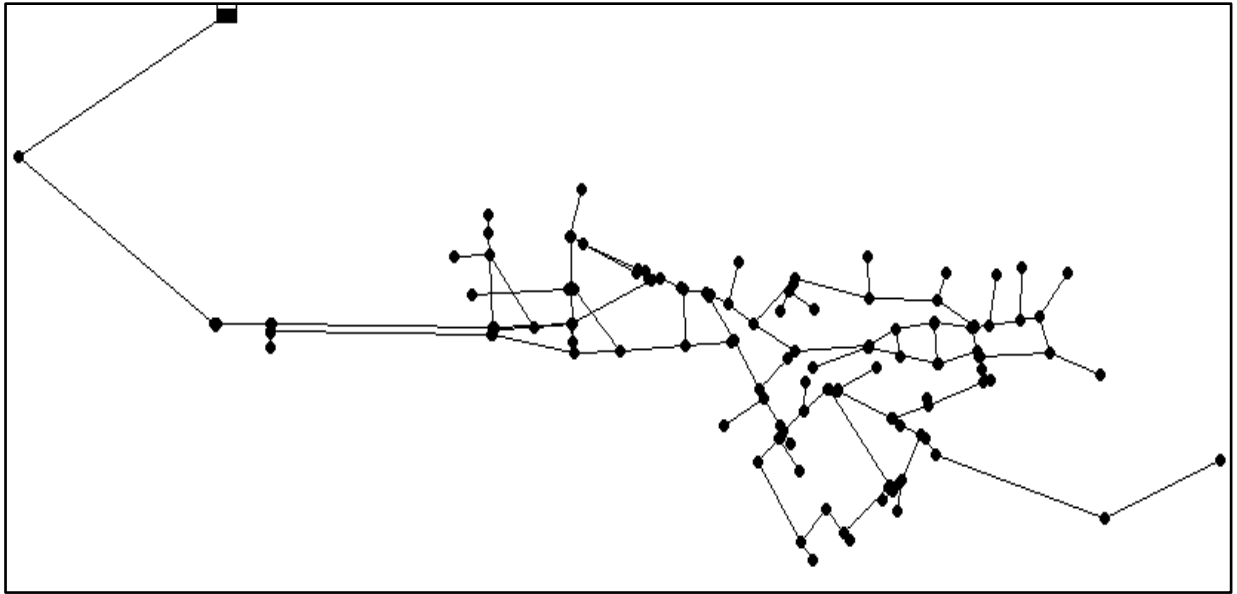


Figura 55: Red del nodo p158.

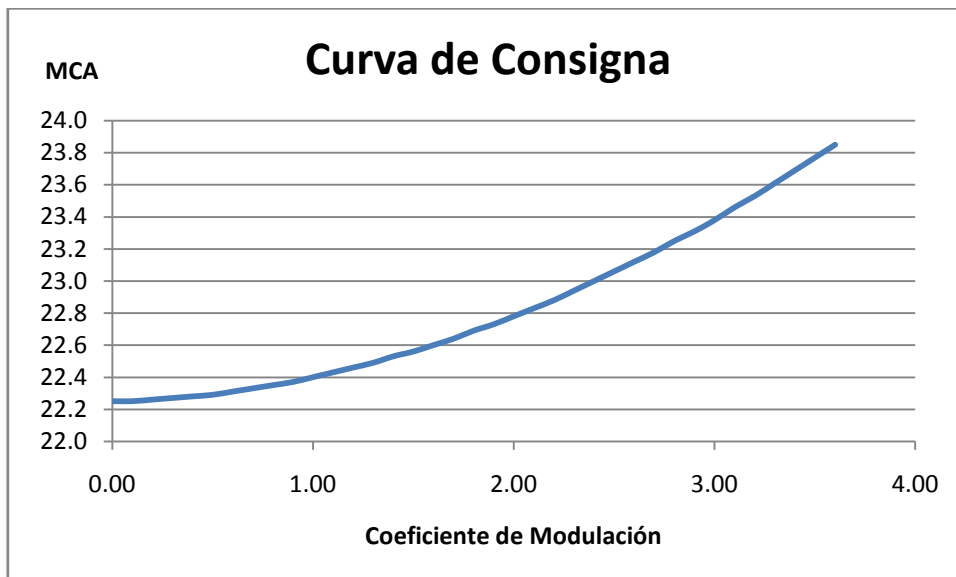


Figura 56: Curva de consigna del nodo p158.

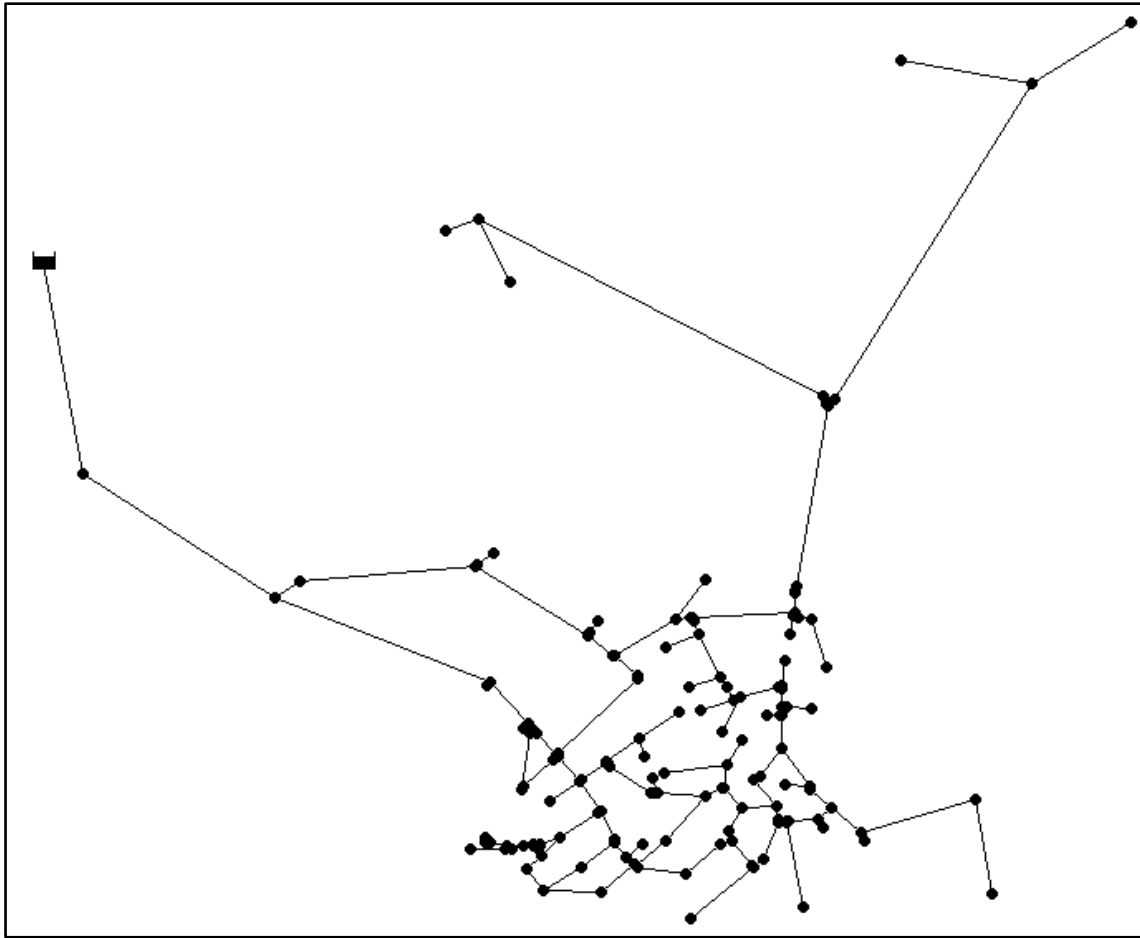


Figura 57: Red del nodo p161.

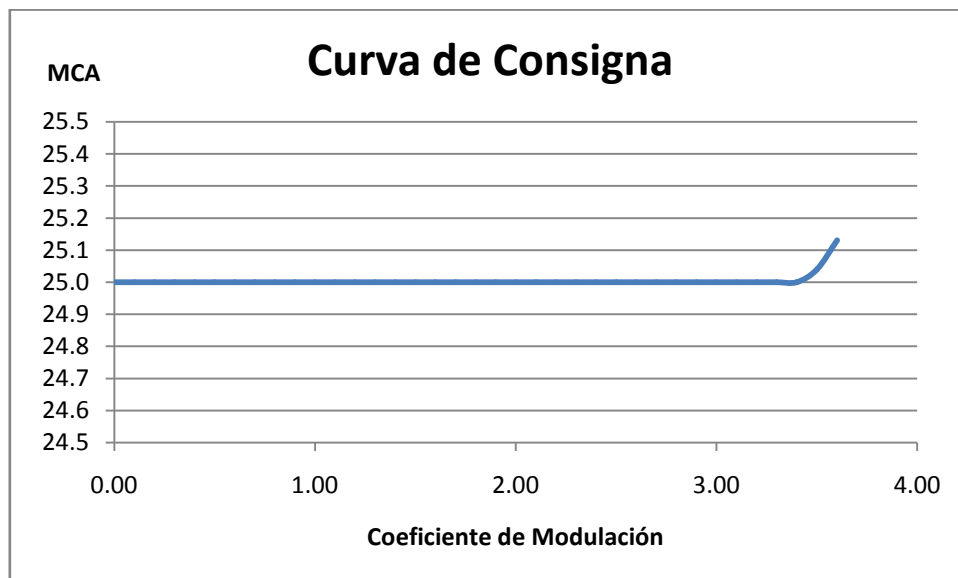


Figura 58: Curva de consigna del nodo p161.

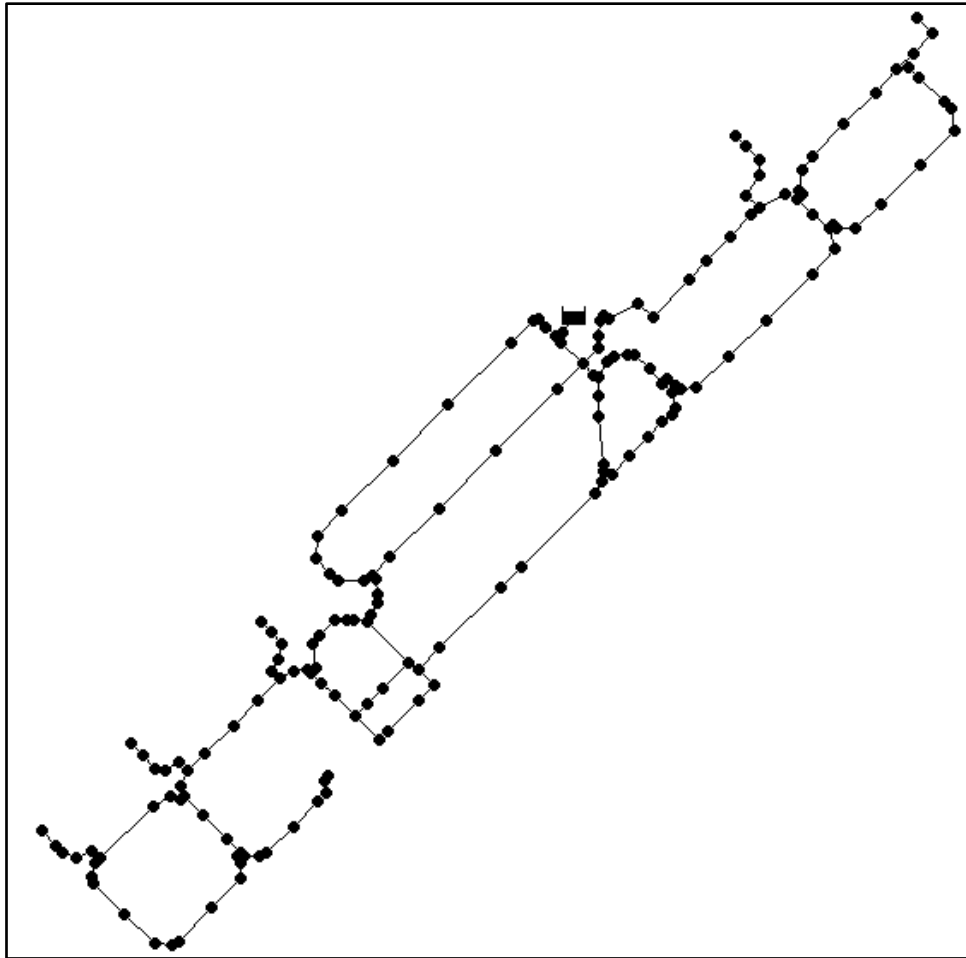


Figura 59: Red del nodo PAER0018.

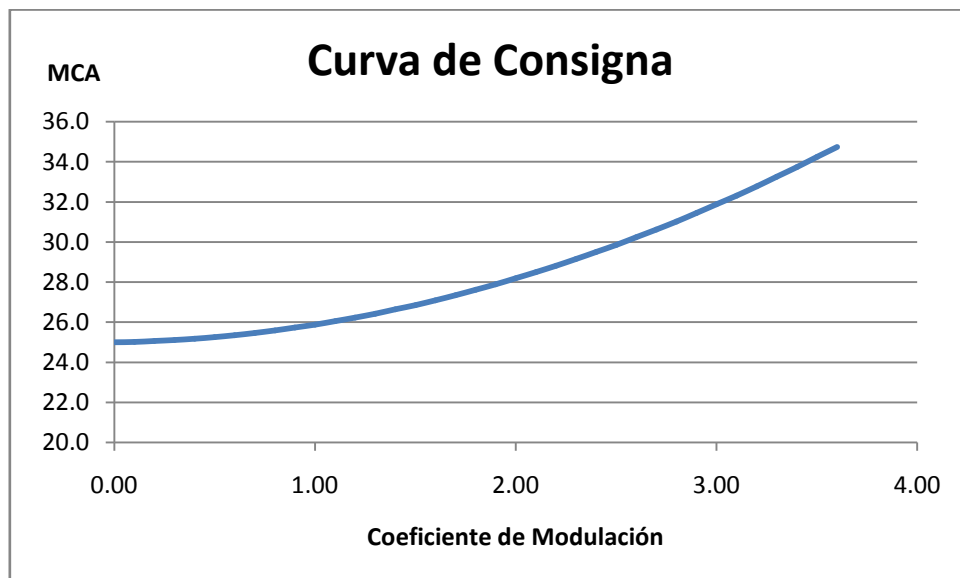


Figura 60: Curva de consigna del nodo PAER0018.

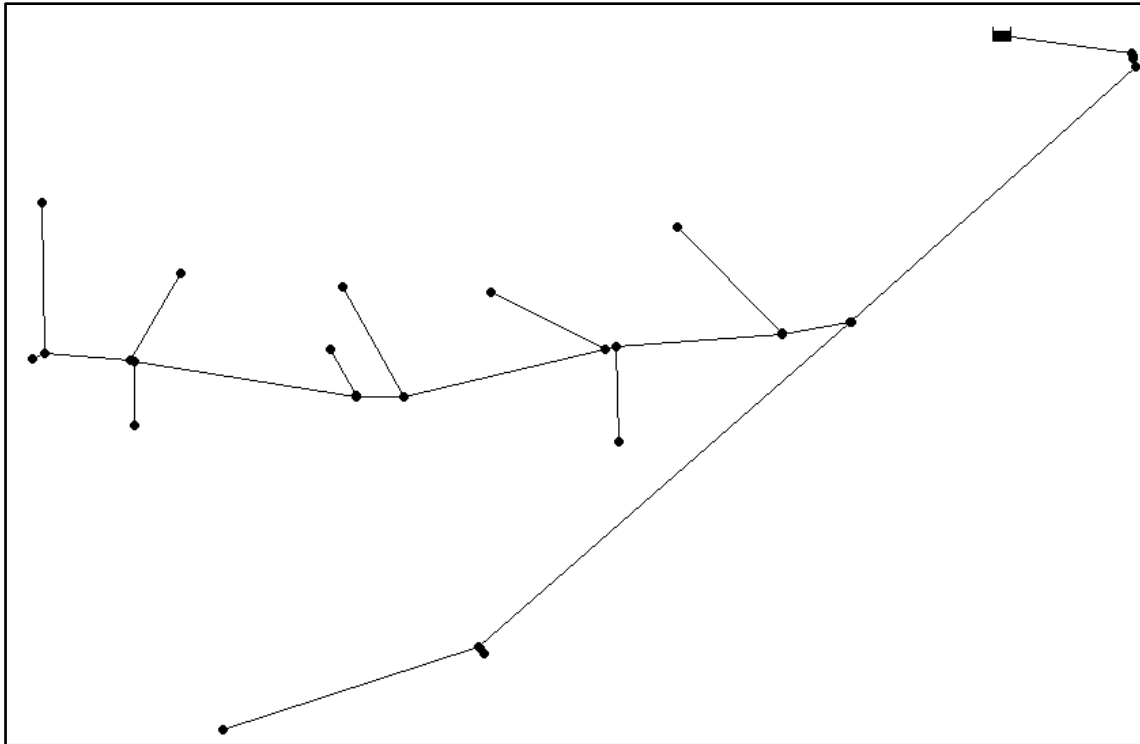


Figura 61: Red del nodo PCC0483.

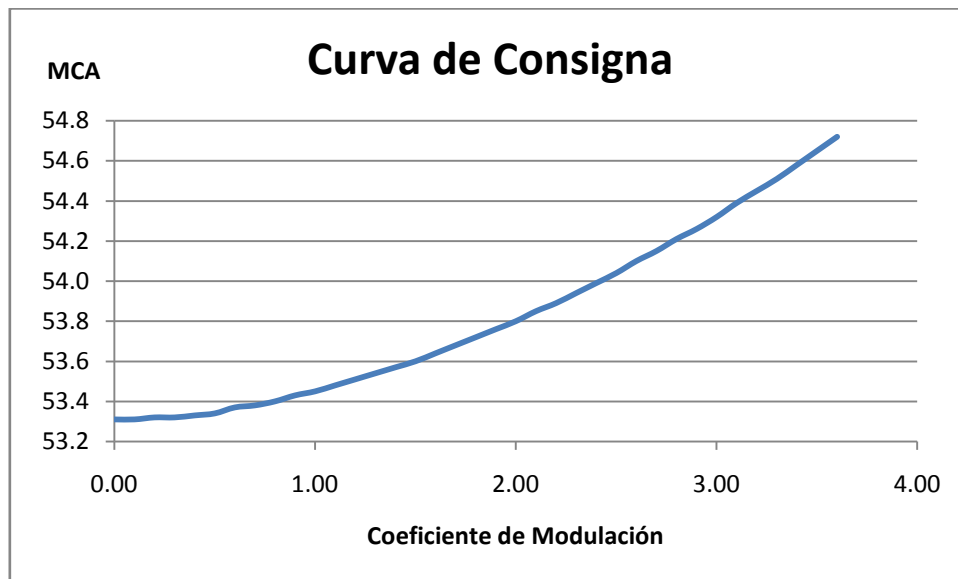


Figura 62: Curva de consigna del nodo PCC0483.

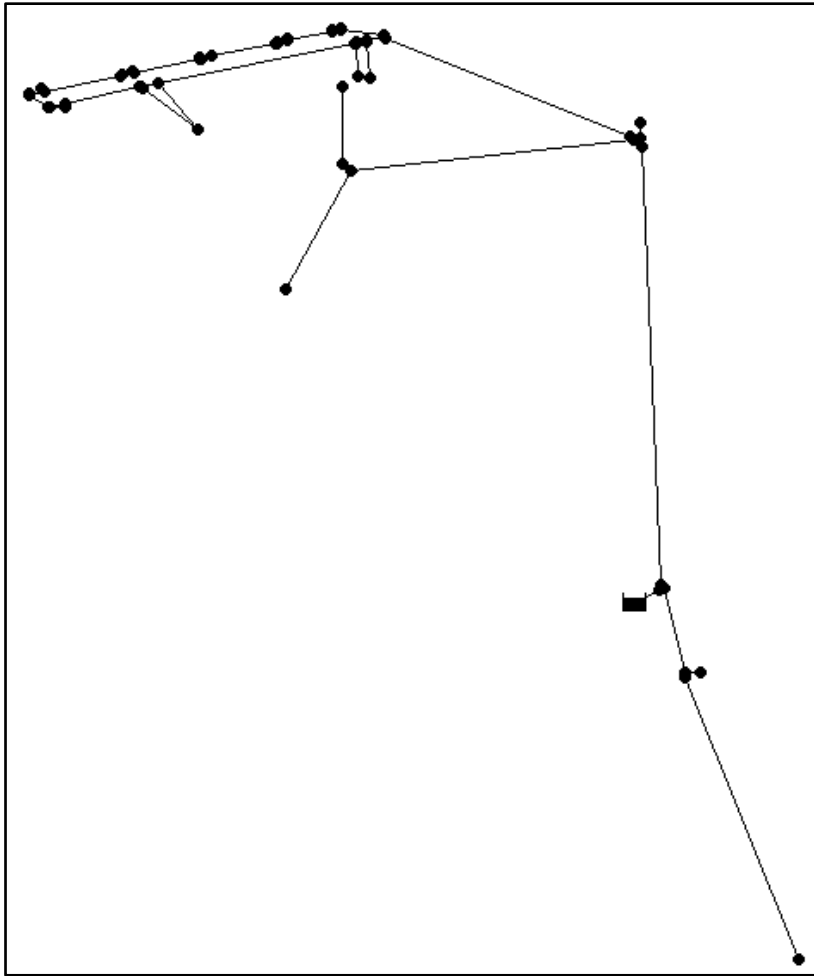


Figura 63: Red del nodo PCC1050.

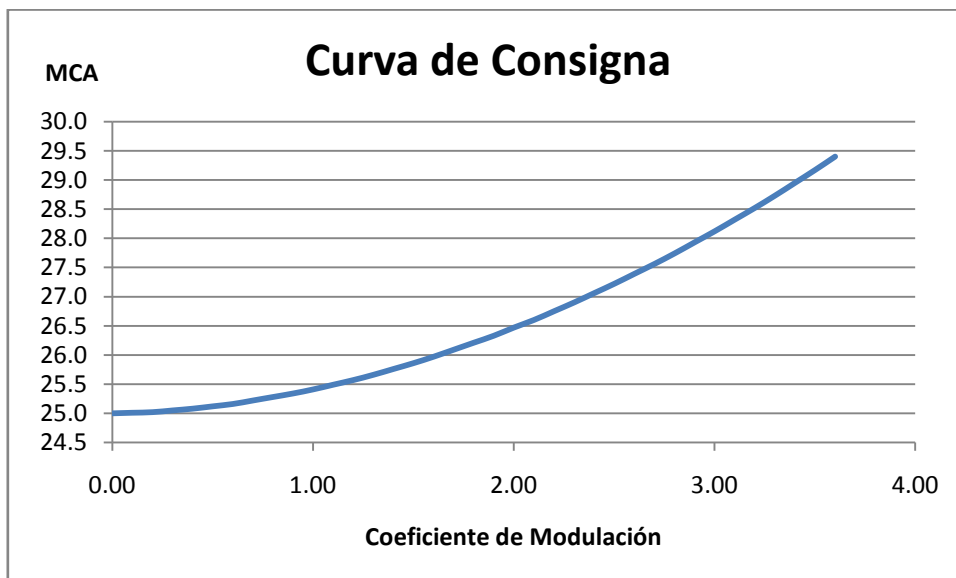


Figura 64: Curva de consigna del nodo PCC1050.

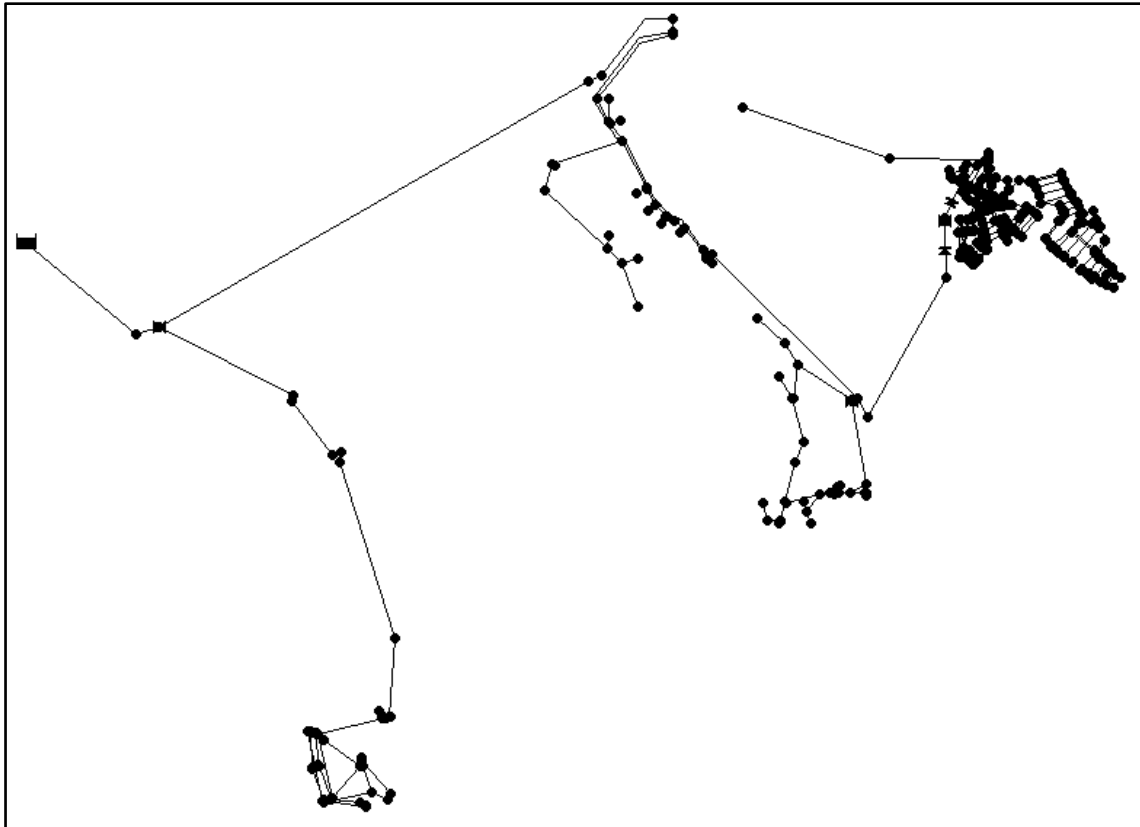


Figura 65: Red del nodo PCC2152.

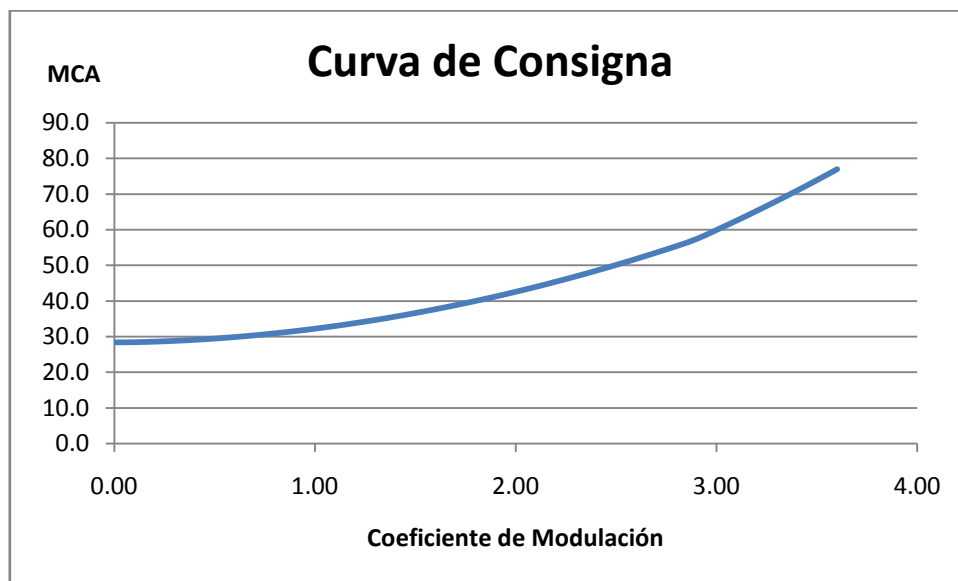


Figura 66: Curva de consigna del nodo PCC2152.

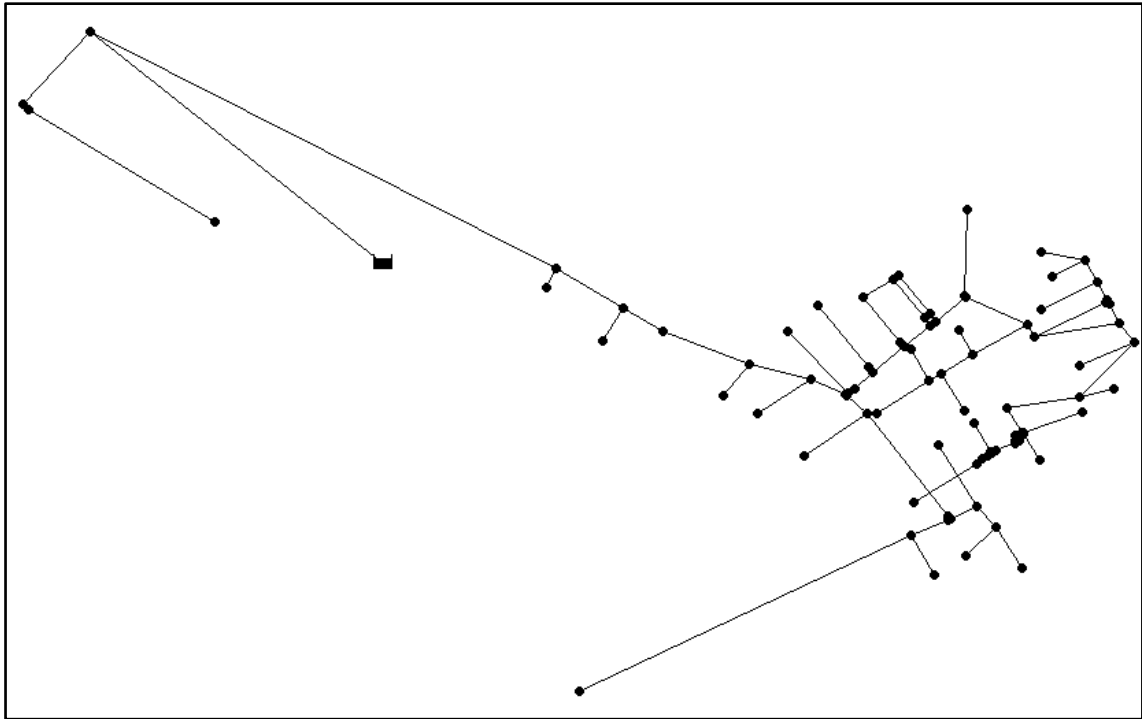


Figura 67: Red del nodo PCC3184.

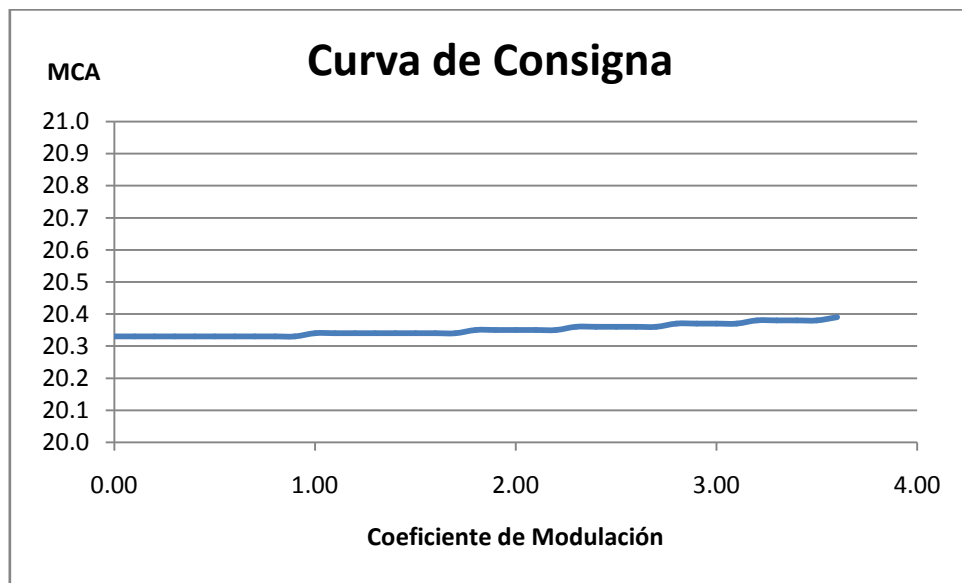


Figura 68: Curva de consigna del nodo PCC3184.

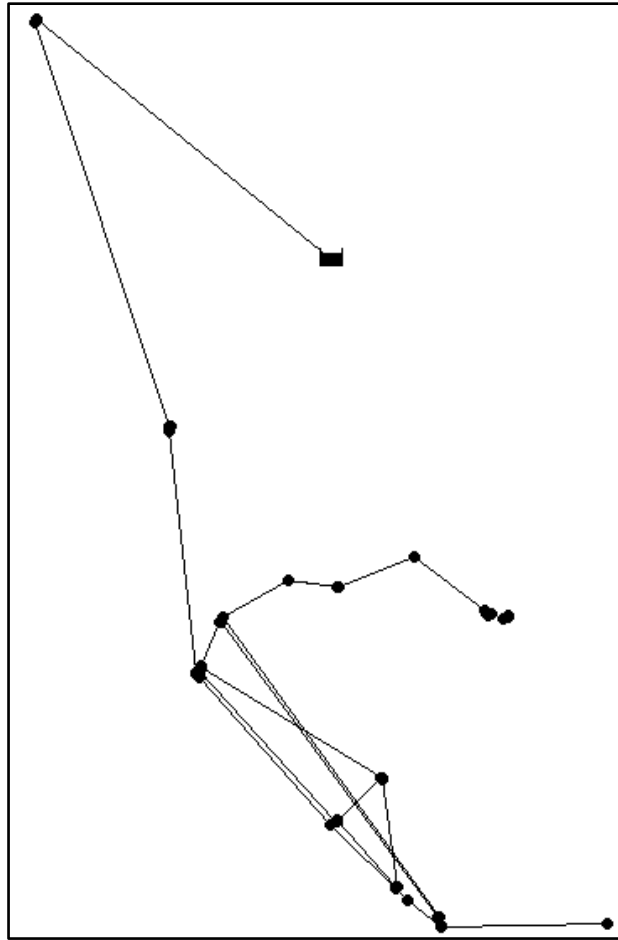


Figura 69: Red del nodo PCC3205.

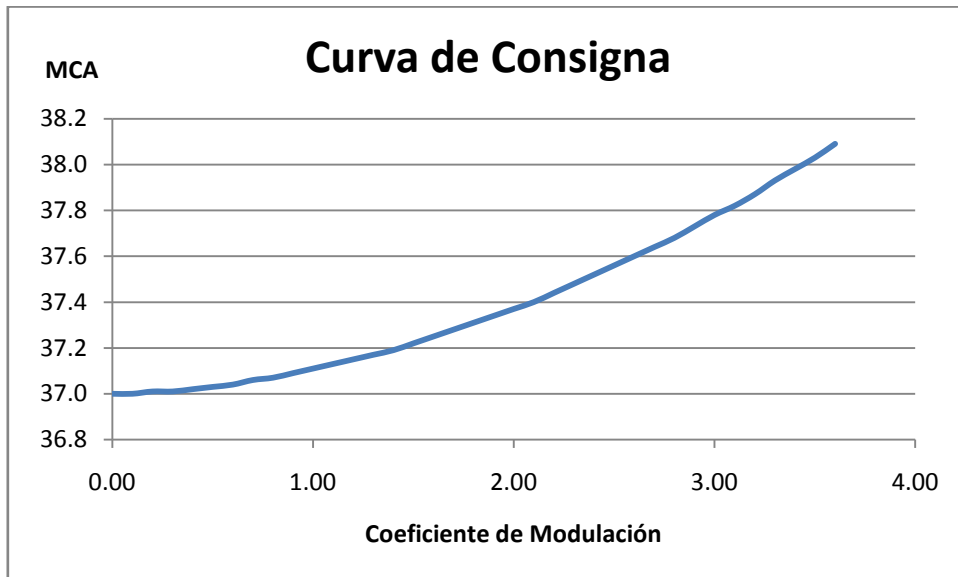


Figura 70: Curva de consigna del nodo PCC3205.